



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)



ООО «СТАНКОМАШСТРОЙ» (г. Пенза)

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА



КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»

КАФЕДРА «МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ»

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТАНКОСТРОЕНИЯ – 2025

Сборник статей по материалам
II Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием

г. Пенза, 23–25 октября 2025 г.

Под общей редакцией
д.т.н., профессора А. Е. Зверовщикова;
к.т.н., доцента С. А. Нестерова;
к.т.н., доцента Д. В. Кочеткова;
к.т.н., доцента Г. С. Большакова

Пенза
Издательство ПГУ
2025

УДК 62+33
ББК 3+39
А43

Актуальные проблемы станкостроения – 2025 : сб. ст.
А43 по материалам II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 23–25 октября 2025 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. А. Е. Зверовщикова; к.т.н., доц. С. А. Нестерова; к.т.н., доц. Д. В. Кочеткова; к.т.н., доц. Г. С. Большакова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2025. – 354 с.

ISBN 978-5-908089-60-9

Приведены итоги научно-исследовательской работы научной общественности и сотрудников предприятия станкостроительной отрасли России по следующим направлениям: проектирование и модернизация станочного оборудования; современные технологии и материалы станкостроения; эксплуатация, обслуживание, диагностика и ремонт станочного оборудования; системы управления и обеспечения функционирования станков и роботизированных комплексов.

Адресовано специалистам станкостроительной отрасли, а также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

**УДК 62+33
ББК 3+39**

*П р и к а з
о проведении II Всероссийской научно-практической
конференции с международным участием
«Актуальные проблемы станкостроения – 2025
(АПС – 2025)» № 1174/о от 13.10.2025*

ISBN 978-5-908089-60-9

© Пензенский государственный
университет, 2025

СЕКЦИЯ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»

УДК 67.05

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШПИНДЕЛЯ

Владимир Михайлович Утенков¹,
Александр Геннадиевич Ягопольский²,
Александр Алексеевич Макеев³

^{1,2,3}Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Исследовано влияние тепловых деформаций на геометрическую точность шпинделей металлорежущих станков. Методом компьютерного моделирования в COMSOL Multiphysics оценено распределение температур и деформаций. Установлено, что максимальные деформации возникают в зоне переднего подшипника и инструментальной оправки. Предложены меры для снижения температурных искажений, направленные на повышение точности шпинделя. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации конструкции и снижения погрешностей в металлообработке.

Ключевые слова: мотор-шпиндель, тепловые деформации, геометрическая точность, COMSOL Multiphysics, тепловое моделирование, система жидкостного охлаждения

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMOELASTIC DEFORMATIONS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF A SPINDLE

Vladimir M. Utenkov¹, Alexander G. Yagopolsky²,
Alexander A. Makeev³

^{1,2,3}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The study investigates the influence of thermal deformations on the geometric accuracy of metal-cutting machine tool spindles. Computer modeling in COMSOL Multiphysics was used to evaluate temperature distribution and deformation patterns. The results show that maximum deformations occur near the front bearing and tool arbor. Mitigation measures are proposed to reduce thermal distortions and improve spindle

precision. The findings can be applied to optimize spindle design and minimize machining errors.

Keywords: motorized spindle, thermal deformations, geometric accuracy, COMSOL Multiphysics, thermal modeling, liquid cooling system

Современное машиностроение требует высокой точности оборудования, где допуски могут достигать микронных значений. До 70 % погрешностей обработки связаны с тепловыми деформациями станка, особенно шпиндельного узла, что критично влияет на качество деталей. Исследования в этой области актуальны для разработки методов снижения деформаций и повышения эффективности систем охлаждения [1].

Основными источниками тепловых выделений в шпиндельном узле металлорежущих станков являются подшипниковые узлы (трение качения и вязкостное трение смазки), электродвигатель (потери в обмотках статора и вихревые токи в роторе) и процесс резания металла [2]. Эти факторы создают значительную тепловую нагрузку, требующую эффективного охлаждения и компенсации деформаций для обеспечения точности обработки (рис. 1).

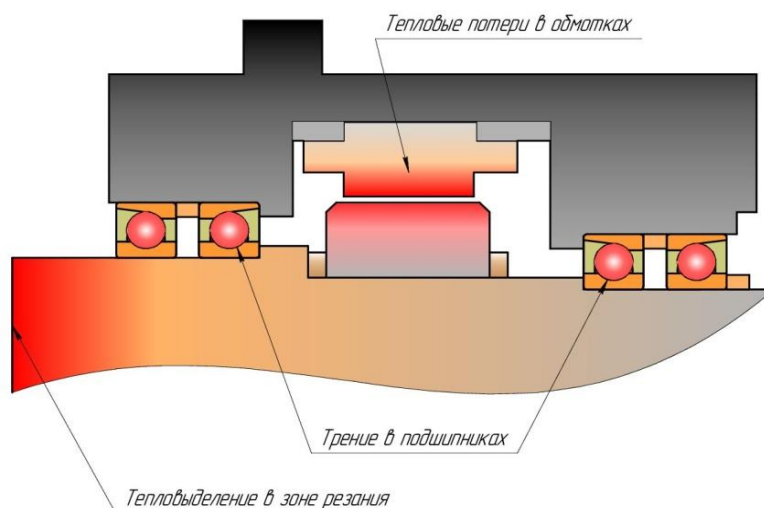


Рис. 1. Источники тепловых деформаций

Для исследования тепловых деформаций мотор-шпинделя была выбрана система инженерного анализа COMSOL Multiphysics, способная одновременно моделировать множество различных физических процессов на исследуемой модели [3].

При моделировании шпиндельного узла учитывались механические (радиальные и осевые силы резания, полное закрепление корпуса) и тепловые воздействия (нагрев подшипников, электродвигателя, зоны резания, а также конвективный и кондуктивный теплообмен). Эти факторы необходимы для точного анализа деформаций и температурных полей.

После задания граничных условий была построена расчетная сетка методом конечных элементов. Последующий статический и термоупругий анализ выявил значительную разницу в поведении шпинделя при холодном и нагретом состояниях.

Как видно из результатов, в холодном состоянии (20 °С) прогиб переднего конца шпинделя под действием механических нагрузок составил 7.5 мкм, что соответствует допустимым отклонениям для большинства операций черновой обработки. Однако при тепловом нагружении прогиб инструмента увеличился до 45 мкм, что в 6 раз превышает исходное значение (рис. 2). Максимальный нагрев был зафиксирован в узлах трения – передней подшипниковой опоре и активной зоне электродвигателя, где локальные температурыкратно превысили рабочие пределы.

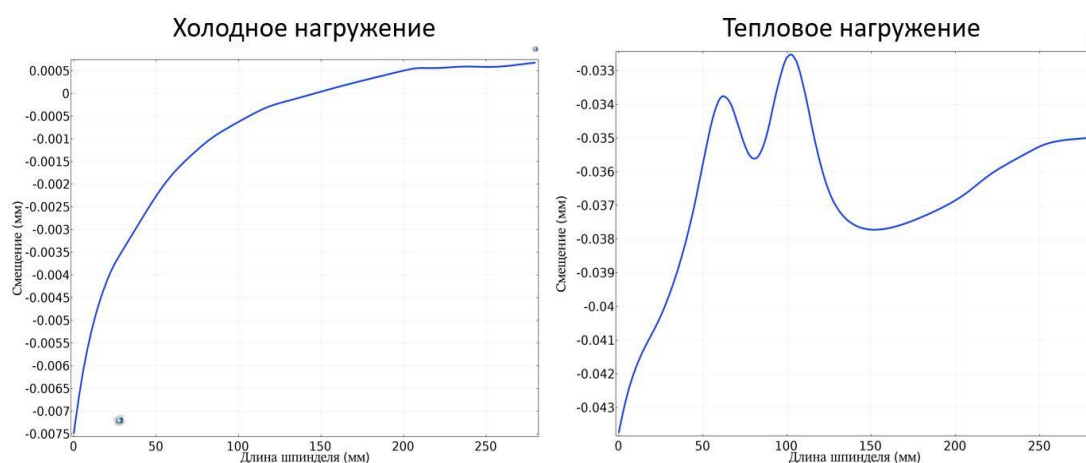


Рис. 2. Прогиб переднего конца шпинделя в холодном и нагретом состояниях

Результаты показывают, что тепловые деформации (до 45 мкм) критически влияют на точность шпинделя, превышая допустимые нормы (10–15 мкм). Появляется задача нивелирования температурных перепадов за счет оптимизации системы охлаждения.

Исследование влияния межопорных расстояний шпиндельного узла показало, что изменение интервала между первой и второй опорами значительно влияет на жесткость системы, в то время как расстояние между второй-третьей и третьей-четвертой опорами почти не сказывается на прогибе. Для предотвращения перегрева сдвоенных опор расстояние между ними зафиксировано на 10 мм. По итогам анализа выбран наиболее жесткий вариант конструкции (рис. 3).

После этого, для активного отвода тепла в конструкцию шпинделя была интегрирована жидкостная система охлаждения с водно-гликолевым теплоносителем (40 % этиленгликоля).

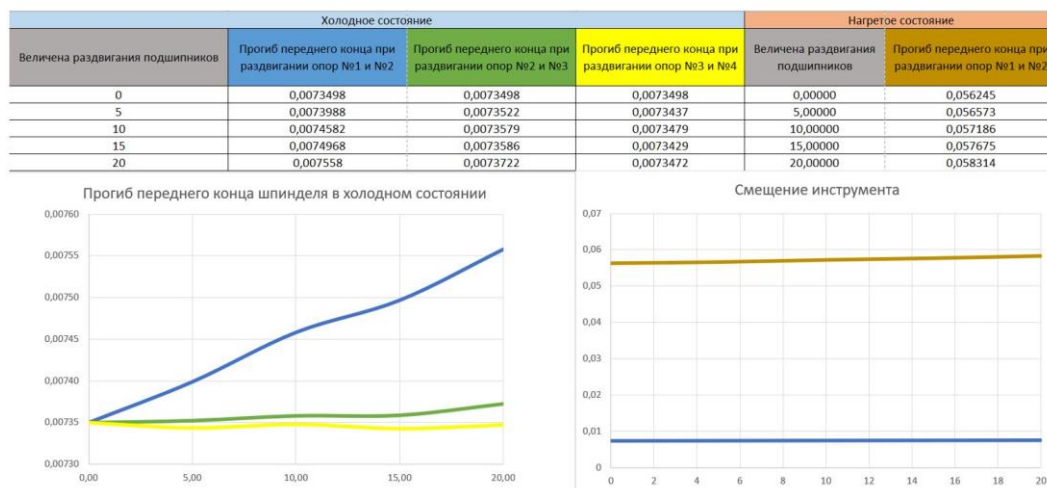


Рис. 3. Регулирование межопорного расстояния

Реализация данного решения позволила снизить прогиб переднего конца до 9,5 мкм (в 4,7 раза) и стабилизировать температуру рабочего режима шпинделя (рис. 4). Максимальная температура в наиболее нагруженной зоне передней опоры не превышает 50 °С (рис. 5), что обеспечило высокую точность и увеличило ресурс подшипниковых узлов на 35–40 % при сохранении компактности конструкции.

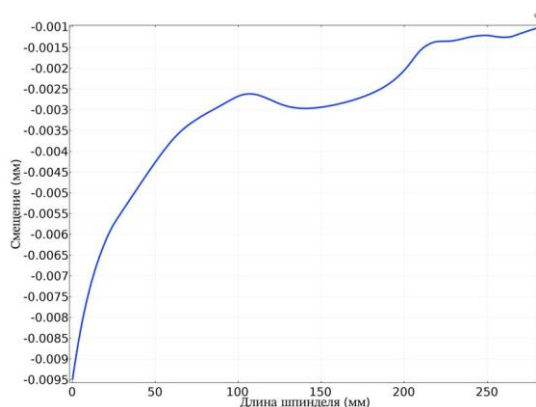


Рис. 4. Прогиб переднего конца шпинделя после охлаждения

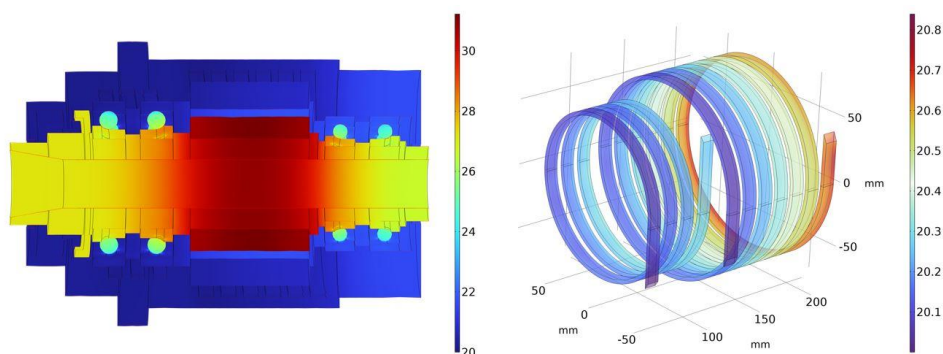


Рис. 5. Распределение температуры шпинделя и винтовых каналов

Исследование подтвердило, что тепловые деформации критически влияют на геометрическую точность шпинделя. Разработанная в COMSOL Multiphysics модель позволяет прогнозировать температурное поведение и оптимизировать конструкцию.

Список литературы

1. Kang C., Guo Y. The thermal drift modeling of spindle system based on a physical driven deformation methodology // Advanced Manufacturing Technology. 2024. № 130. P. 1207–1219. doi: 10.1007/s00170-023-12720-3
2. Денисенко А. Ф., Назаров Н. С. Разработка тепловой модели шпиндельного узла металлорежущего станка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2014. № 3 (43). С. 93–104.
3. COMSOL Multiphysics® : офиц. сайт. URL: <https://www.comsol.com> (дата обращения: 15.06.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Михайлович Утенков

доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Металлорежущие станки»,
Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (Россия,
г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
e-mail: utencov@bmstu.ru

Vladimir M. Utenkov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the department of metal-cutting
machine tools, Bauman Moscow State
Technical University (5 2-ya Baumanskaya
street, Moscow, Russia)

Александр Геннадиевич

Ягопольский

старший преподаватель кафедры
«Металлорежущие станки»,
Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (Россия,
г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5)
e-mail: argch@bmstu.ru

Alexander G. Yagopolsky

Senior lecturer of the department of metal-
cutting machine tools, Bauman Moscow
State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street, Moscow,
Russia)

Александр Алексеевич Макеев

студент, Московский
государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5)
e-mail: sasha.makeev.1104@mail.ru

Alexander A. Makeev

Student, Bauman Moscow State
Technical University
(5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ СТАНКОВ ЦИКЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ

**Александр Константинович Алешин¹,
Игорь Михайлович Кондратьев²,
Гагик Володяевич Рашоян³,
Андрей Александрович Романов⁴,
Глеб Сергеевич Филиппов⁵,
Константин Андреевич Шалюхин⁶,
Вячеслав Михайлович Алёшин⁷**

^{1,2,3,4,5,6,7}Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН,
Москва, Россия

Аннотация. Разработан метод диагностики механизмов станков, выполняющих многократно однопериодические движения и остановки в конечных положениях. В качестве источника диагностической информации используется координата положения исполнительного звена механизма в позиции остановки. Это параметр, характеризующий точность обработки, который рассматривается как случайная величина. При многократном измерении координаты положения исполнительного звена механизма в конечном положении остановки, одновременно с процессом выполнения механизмом рабочих движений, периодически строится гистограмма распределения координат положения, которая сравнивается с эталонными гистограммами. По результатам сравнения делается заключение о техническом состоянии механизма. **Ключевые слова:** механизмы циклового действия, гистограмма распределения, процедура диагностирования, работоспособное и дефектные состояния, датчик

DIAGNOSTICS OF MACHINES WITH CYCLES OF OPERATION

**Alexander K. Aleshin¹, Igor M. Kondratyev²,
Gagik V. Rashoyan³, Andrey A. Romanov⁴, Gleb S. Filippov⁵,
Konstantin A. Shalyukhin⁶, Viacheslav. M. Aleshin⁷**

^{1,2,3,4,5,6,7}Mechanical Engineering Research Institute of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A method for diagnosing mechanisms of machines that perform repetitive, uniform movements and stops at end positions has been developed. The coordinate of the position of the actuator of the mechanism in the stop position is used as a source of diagnostic information. This parameter characterizes the accuracy of processing and is considered a random variable. When repeatedly measuring the coordinate of the actuator's position in the final stop position, simultaneously with the mechanism performing

working movements, a histogram of the distribution of position coordinates is periodically constructed, which is compared with reference histograms. Based on the comparison results, a conclusion is drawn about the technical condition of the mechanism.

Keywords: cyclic action mechanisms, distribution histogram, diagnostic procedure, operational and defective states, sensor

В серийном и массовом производстве широкое применение находят механизмы циклового действия, которые многократно совершают повторяющиеся однотипные движения и остановки в конечных положениях. Это механизмы приводов движения суппортов станков, поворотные устройства, шаговые транспортёры, кантователи, манипуляторы, роботы – станки, которые входят в состав автоматических линий, работающих в серийном и массовом производстве. Применение методов диагностики позволяет увеличить ресурс работы механизмов и сократить простои оборудования, связанные с возникновением дефектов.

Экономический эффект от применения методов диагностики будет значительно больше, если будет применяться процедура превентивного распознавания дефектов на ранних стадиях развития. Это позволит на этапе зарождения дефекта, своевременно провести ремонтные работы и исключить аварийные ситуации и длительные простои технологического оборудования [1–7]. Такая реализация возможна, если процедура диагностирования проводится одновременно с выполнением производственного процесса, когда механизм выполняет заданную ему программу, не останавливаясь на переналадку, установку датчиков и проведение всех мероприятий, связанных с диагностированием.

Разработан метод диагностики механизмов станков циклового действия, основанный на многократном измерении координаты положения исполнительного звена механизма в позиции остановки. Статистический массив данных координат содержит полезную информацию о текущем техническом состоянии механизма. Возможность накопления диагностической информации в массиве данных связана с тем, что в переходном динамическом режиме, а именно, движение, торможение и остановка, проявляются одновременно инертные силы, силы трения в кинематических парах механизма и движущие силы со стороны привода. Детали механизма испытывают совокупное воздействие этих сил и в зависимости от текущего технического их состояния, реакция на силовые воздействия будет разной, что отражается на величине координаты положения исполнительного звена механизма, как результат воздействия на упругую систему станка. Эффект совокупного действия сил на механизм носит случайный характер. При этом инерционные, жесткостные, трибологические параметры механизма, зазоры в кинематических парах и др. сами испытывают случайные отклонения от

соответствующих номинальных значений. В результате координата x конечного положения представляет собой случайную величину, являющуюся функцией геометрических и физико-механических параметров p_i ($i = 1, 2, \dots, n$) механизма, каждый из которых характерным, специфическим для него образом влияет на величину координаты x , т.е.

$$x = f(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (1)$$

Отклонение Δp_i каждого параметра p_i от своего номинального значения приводит к изменению функциональной зависимости (1) координаты x от параметров p_i . Особенно ярко и полно эти отклонения проявляются в динамическом переходном режиме торможения и остановки. Например, отсутствовал зазор в кинематической паре, но в результате нагрузок и износа трущихся поверхностей в этом паре появился люфт. Динамические свойства механизма изменились, изменилась и функциональная зависимость (1).

Для исправного состояния координата x имеет свою характерную функцию плотности распределения вероятностей. Появление дефекта приводит к отклонению параметра механизма от своего номинального значения и к изменению функции (1), что меняет функцию плотности распределения вероятностей, т.е. форму гистограммы для координаты x . Отклонение гистограммы от своей характерной первоначальной формы свидетельствует о зарождении или наличии дефекта. Каждому дефекту механизма соответствует своя форма гистограммы распределения координаты x [8–10].

Известна зависимость функции плотности распределения вероятностей $\Psi(x)$ для случайной величины x от функции плотности распределения вероятностей $\varphi(p_i)$ одного из аргументов p_i [11]:

$$\Psi(x) = \varphi(F(p_1, p_2, \dots, p_n)) * |\partial F(p_1, p_2, \dots, p_n) / \partial p_i|,$$

где $F(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – функция, обратная к $f(p_1, p_2, \dots, p_n)$.

Для проверки чувствительности формы гистограммы распределения координаты x к отклонениям параметров механизма, была проведена экспериментальная проверка на прецизионном поворотном устройстве с гидроприводом. Планшайба поворотного стола медленно поворачивалась на заданный угол и останавливалась на жёстком упоре (фиксаторе). Оптическим автоколлиматором измерялся угол поворота планшайбы с погрешностью 0,1 угловой секунды. В конструкции поворотного стола была предусмотрена гидростатическая разгрузка направляющих планшайбы, которая могла меняться, что приводило к изменению силы трения в направляющих планшайбы. Благодаря этому целенаправленно менялось давление разгрузки $p_{\text{разгр}}$ в направляющих планшайбы, и тем самым менялась сила трения в направляющих

планшайбы. На рис. 1 *а,б,в* показана эволюция изменения формы гистограммы распределения величин углов поворота в положении остановки планшайбы при разных давлениях $p_{\text{разгр}}$ (разных силах трения), на основе которой можно контролировать качество работы системы смазки в направляющих. Как показали эксперименты, форма гистограмм в процессе эволюции заметно менялась.

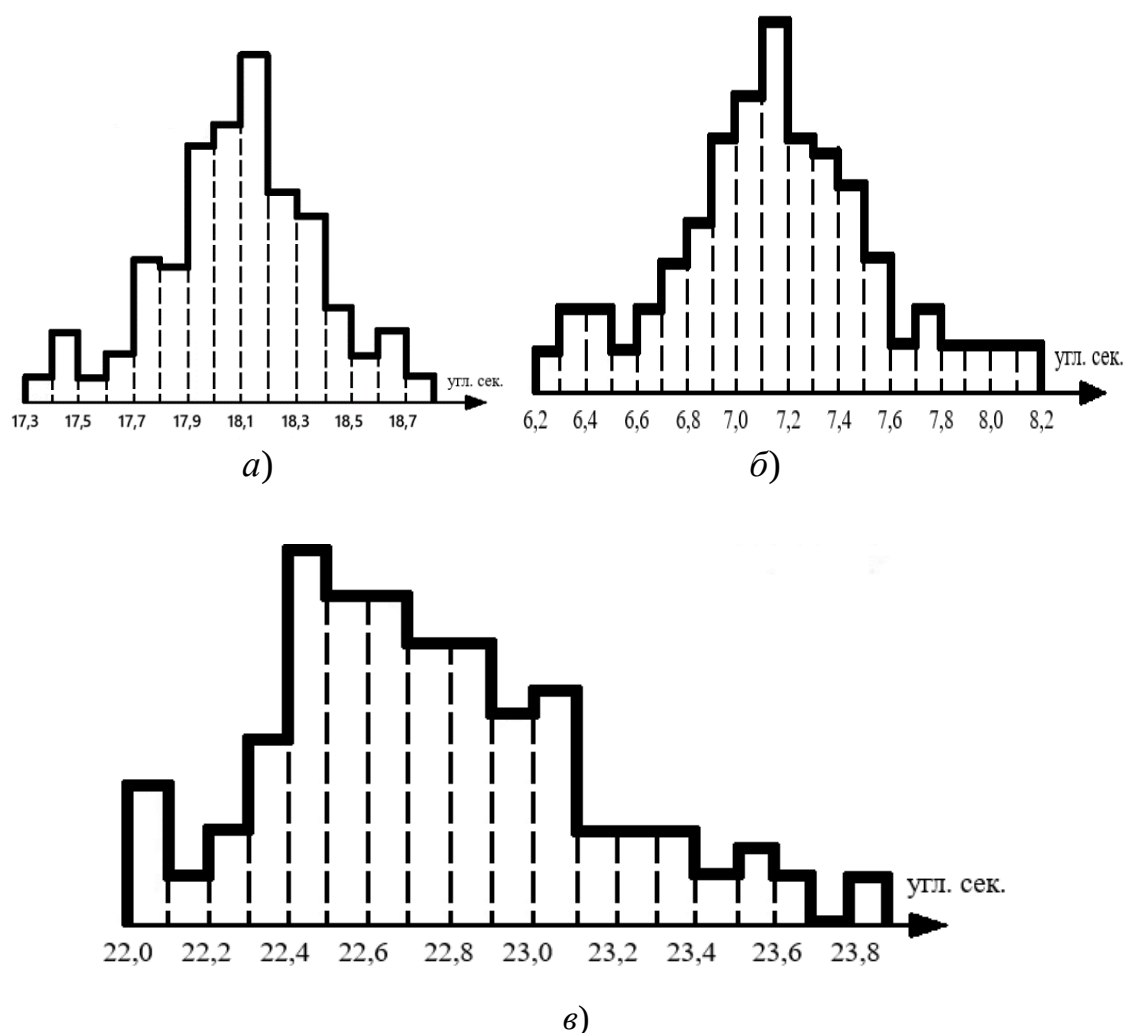


Рис. 1. Гистограммы распределения координат углового положения планшайбы при разных давлениях разгрузки $p_{\text{разгр}}$ в направляющих планшайбы: *а* – $p_{\text{разгр}} = 0,4$ мпа (исправное состояние);
б – $p_{\text{разгр}} = 0,1$ мпа; *в* – $p_{\text{разгр}} = 0,05$ мпа

Датчик положения для измерения координаты конечного положения (точки остановки) анализируемого узла станка устанавливается около этого положения и реагирует на его приближение к датчику. Сигнал с датчика передается в компьютер для построения гистограммы с помощью стандартного ПО. Для обеспечения необходимой точности статистический массив данных со значениями измеренных координат

для построения гистограмм содержит 150–200 таких значений. Предварительно необходимо провести обучение программы распознавания гистограмм для разных состояний механизма, исправного и дефектных.

Может оказаться, что регистрации одной координаты x будет недостаточно для распознавания всех возможных дефектных состояний механизма. В этом случае одновременно с выполнением механизмом рабочей программы, регистрируется дополнительный параметр, например вибрационный сигнал, измеряемый акселерометром, установленным на станке [12, 13].

Предлагаемый способ диагностики позволяет на конкретном производственном участке объединить различные работающие механизмы в общую сеть мониторинга и диагностики. Это даёт возможность рационально распределять рабочие нагрузки на механизмы и планировать производственный процесс с учётом текущего технического состояния каждой единицы технологического оборудования [2, 6]. При этом, для каждого механизма в процессе его эксплуатации формируется свой набор эталонных гистограмм для исправного и дефектных состояний, которые сохраняются в памяти компьютера для дальнейшего использования при диагностике.

Список литературы

1. Сальников В. С., Жмурин В. В., Анцев А. В. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 10. С. 257–264.
2. Юрцев Е., Савинов Ю., Куликова Д., Жигарь А. Современные методы диагностики сложных технических систем в условиях цифрового производства // Станкоинструмент. 2020. № 2. С. 64–70.
3. Писарев В. И., Ваганов А. А., Денисенко А. Ф., Тютюрев И. О. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 1. С. 508–514.
4. Hu S., Liu F., He Y. [et al.]. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools // J. Cleaner Prod. 2012. № 27. P. 133–140.
5. Schmidt B., Gandhi K., Wang L. Diagnosis of machine tools: Assessment based on double ball-bar measurements from a population of similar machines // Procedia CIRP. 2018. № 72. P. 1327–1332.
6. Archenti A., Gao Wei, Donmez A. [et al.]. Integrated metrology for advanced manufacturing // CIRP Annals. 2024. Vol. 73, iss. 2. P. 639–665. doi: 10.1016/j.cirp.2024.05.003

7. Mishra R. K., Choudhary A., Fatima S. [et al.]. A systematic review on advancement and challenges in multi-fault diagnosis of rotating machines // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 156. P. 111306. doi: 10.1016/j.engappai.2025.111306
8. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. М. : Издательство литературы по строительству, 1965. 275 с.
9. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 238 с.
10. Zito R. R. Decomposition of the Failure Histogram // Mathematical Foundations of System Safety Engineering. Springer, Cham., 2020. doi: 10.1007/978-3-030-26241-9_2
11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1964. 573 с.
12. Shaohu Ding, Sen Zhang, Chenchen Yang. Machine tool fault classification diagnosis based on audio parameters // Results in Engineering. 2023. Vol. 19. P. 101308. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101308
13. Zhao F., Mei X., Tao T. [et al.]. Fault diagnosis of a machine tool rotary axis based on a motor current test and the ensemble empirical mode decomposition method // Proc. Inst. Mech. Eng. 2011. № 225. P. 1121–1129.

Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Константинович
Алешин**

доктор технических наук, ведущий
научный сотрудник, Институт
машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: aleshin_ak@mail.ru

Alexander K. Aleshin

Doctor of technical sciences, leading
researcher, Mechanical Engineering
Research Institute of the Russian
Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Игорь Михайлович Кондратьев

старший научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: otdelsnab2008@gmail.com

Igor M. Kondratyev

Senior researcher, Mechanical
Engineering Research Institute of the
Russian Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Гагик Володяевич Рашоян

доктор технических наук, главный
научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: gagik_r@bk.ru

Gagik V. Rashoyan

Doctor of technical sciences, chief
researcher, Mechanical Engineering
Research Institute of the Russian
Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Андрей Александрович Романов
старший научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: otdeksnab2008@gmail.com

Andrey A. Romanov
Senior researcher, Mechanical
Engineering Research Institute of the
Russian Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Глеб Сергеевич Филиппов
доктор технических наук,
заместитель директора по научной
работе, Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: filippov.gleb@gmail.com

Gleb S. Filippov
Doctor of technical sciences, deputy
director for research, Mechanical
Engineering Research Institute of the
Russian Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Константин Андреевич Шалюхин
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: otdeksnab2008@gmail.com

Konstantin A. Shalyukhin
Candidate of technical sciences, senior
researcher, Mechanical Engineering
Research Institute of the Russian
Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

Вячеслав Михайлович Алёшин
старший научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: otdeksnab2008@gmail.com

Viacheslav M. Aleshin
Senior researcher, Mechanical
Engineering Research Institute of the
Russian Academy of Sciences (4 Maly
Kharitonyevsky lane, Moscow Russia)

УДК621.838.222

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

**Михаил Павлович Шишкарев¹,
Максим Дмитриевич Гавриленко²**

^{1,2}Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты с дополнительным регулированием и сравнительной

оценки нагрузочной способности вариантов муфт. Показано, что при одинаковых параметрах основной фрикционной группы наибольшей нагрузочной способностью обладает второй вариант адаптивной фрикционной муфты, в математической модели которого присутствует комплексный числитель.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, вариант, коэффициент усиления, точность срабатывания, нагрузочная способность

Финансирование: работа выполнена в рамках инициативной НИР.

RESEARCH OF LOAD CAPACITY OF ADAPTIVE FRICTION COUPLING WITH ADDITIONAL ADJUSTMENT

Mikhail P. Shishkarev¹, Maxim D. Gavrilenko²

^{1,2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The paper presents the results of a study of the accuracy of the adaptive friction clutch with additional control and a comparative assessment of the load capacity of the coupling options. It is shown that with the same parameters of the main friction group, the second variant of the adaptive friction clutch has the greatest load capacity, in the mathematical model of which there is a complex numerator.

Keywords: adaptive friction clutch, variant, gain factor, actuation accuracy, load capacity

Financing: the work was carried out as part of an initiative research project.

Ранее проведено исследование первого варианта адаптивной фрикционной муфты (АФМ) первого поколения с дополнительным регулированием [1–3]. Показано, что точность срабатывания АФМ с дополнительным регулированием зависит от величины коэффициента усиления обратной связи основной фрикционной группы, при которой нагрузочная характеристика муфты имеет максимум внутри интервала изменения коэффициента трения и равные друг другу значения вращающих моментов при граничных величинах коэффициента трения. В свою очередь, упомянутая величина коэффициента усиления (КУ) зависит от числа пар трения основной фрикционной группы. Установлено, что с увеличением числа пар трения основной фрикционной группы увеличивается коэффициент усиления и возрастает точность срабатывания муфты. Установлено, что для одного из двух остальных вариантов математической модели АФМ нагрузочная характеристика может также иметь максимум внутри интервала изменения коэффициента трения, причем, как и для первого варианта, наибольшая точность срабатывания муфты достигается при равенстве друг другу величин вращающих моментов для граничных значений коэффициента трения.

Нами была поставлена задача Исследование точности срабатывания и проведение сравнительной оценки нагрузочной способности вариантов АФМ.

Рассмотрим принципиальную схему АФМ с ПОС прямого действия, показанную на рис. 1.

Исследуем точность срабатывания АФМ, если ее математическая модель отвечает требованиям второго варианта (см. выше). В этом случае величина КУ дополнительной фрикционной группы C_1 должна удовлетворять поставленному условию, а знак между первым и вторым комплексными членами в числителе найденного соотношения изменяется на положительный.

Анализ ранее найденного выражения показывает, что оно содержит второе слагаемое, которое при определенных величинах z (где z – число пар трения основной фрикционной группы) и C_1 может быть отрицательным. Следовательно, первая производная этого выражения может быть отрицательной при некоторых значениях текущего коэффициента трения f_i , что требует проведения дополнительного исследования.

Заменим в ранее найденном соотношении параметр f_i последовательно на $f_{\min}$ и на $f_{\max}$ (где $f_{\min}$ и $f_{\max}$ – соответственно минимальный и максимальный коэффициент трения) и, приравняв друг другу составленные выражения, решим полученное уравнение относительно C . Корни указанного уравнения равны:

$$C_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}, \quad (1)$$

где $A = zz_1 f_{\min} f_{\max} (f_{\max} - f_{\min})(z_1 C_1 f_{\min} f_{\max} + f_{\max} + f_{\min})[1 - (z - 1)C_1]$,

$$B = z_1[1 - (z - 1)C_1][f_{\max}^3 - f_{\min}^3 + C_1 f_{\min} f_{\max}(z_1 f_{\max}^2 - z f_{\min}^2)] - \\ - zz_1 C_1 f_{\min} f_{\max} (f_{\max} - f_{\min}),$$

$$D = f_{\max} - f_{\min},$$

где z_1 – число пар трения дополнительной фрикционной группы.

Согласно исходному условию $1 - (z - 1)C_1 > 0$, следовательно, и $A > 0$. Корни (1) будут положительными, если $B < 0$, а дискриминант корней (1) – положительным или равным нулю.

Численный анализ показывает, что при больших величинах z (> 16) первое условие выполнимо, второе условие не выполняется ни при каких приемлемых значениях параметров, т. е. дискриминант корней отрицательный. Следовательно, составленное квадратное уравнение имеет два комплексно сопряженных корня:

$$C_1 = \frac{-B}{2A} + \frac{\sqrt{4AD - B^2}}{2A} i,$$

$$C_2 = \frac{-B}{2A} - \frac{\sqrt{4AD - B^2}}{2A} i,$$

а реальных значений C , удовлетворяющих условию равенства величин вращающих моментов, которые соответствуют минимальному и максимальному значениям коэффициента трения, для рассматриваемого варианта математической модели АФМ не существует.

Оценим точность срабатывания АФМ, нагрузочная характеристика которой имеет вид возрастающей кривой в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$. Поскольку ограничения сверху величины C в данном случае не существует, переменным параметром будем считать КУ основной фрикционной группы.

На рис. 1 показан график зависимости $K_T(C)$ (где K_T – коэффициент точности муфты), построенный по соотношению

$$K_T = \frac{f_{\max}(1 + zCf_{\min})(1 + z_1C_1f_{\min})\{1 + z_1Cf_{\max}^2[1 - (z - 1)C_1]\}}{f_{\min}(1 + zCf_{\max})(1 + z_1C_1f_{\max})\{1 + z_1Cf_{\min}^2[1 - (z - 1)C_1]\}}. \quad (2)$$

При построении графика были приняты следующие исходные данные: $f_{\min} = 0,1$, $f_{\max} = 0,8$, $z = 5$, $C_1 = 0,23$, $z_1 = 1$.

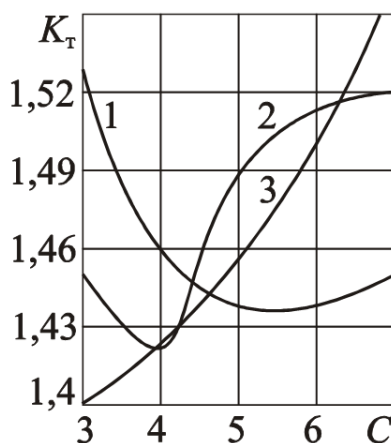


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента точности от коэффициента усиления основной фрикционной группы

График (кривая 1) показывает, что точность срабатывания АФМ возрастает в интервале значений $C = 3 \dots 5$, затем стабилизируется в интервале $C = 5 \dots 6$ и начинает уменьшаться при увеличении C свыше значения $C = 6$.

Анализ соотношения (2) показывает, что на величину K_T большее влияние оказывают члены, заключенные в первой скобке числителя и знаменателя и значительно меньшее влияние – члены в фигурных скобках. Поскольку упомянутые члены содержат параметр z , исследуем его влияние на точность срабатывания АФМ при $z = 8$ и $z = 12$.

Графики, отражающие зависимость $K_T(C)$ при указанных значениях z , показаны на рис. 1 соответственно кривыми 2 и 3. При построении графиков величина C_1 равнялась соответственно 0,13 и 0,08.

Кривые 2 и 3 показывают следующее:

- при увеличении z точность срабатывания АФМ увеличивается только при значениях $C = 3 \dots 4$. При более высоких значениях C точность срабатывания становится меньше;

- увеличение z свыше значения $z = 8$ нецелесообразно, поскольку не приводит к повышению точности срабатывания АФМ.

Сравнительная оценка нагрузочной способности вариантов АФМ. Как показано выше, АФМ, математические модели которых представлены различными вариантами, обладают неодинаковой точностью срабатывания. Оптимальным для предохранительных муфт, в том числе АФМ, является сочетание наибольшей точности срабатывания и наибольшей нагрузочной способности, так как применение таких АФМ обеспечивает абсолютную минимизацию массогабаритных и экономических показателей приводов машин, в составе которых эксплуатируются муфты [1].

Поскольку наибольшей точности срабатывания соответствует определенная величина КУ, которая влияет и на нагрузочную способность муфты [2], оценку нагрузочной способности будем производить при одинаковых параметрах различных вариантов АФМ, варьируя величину C .

Приняв $F_{\Pi} = 800$ Н (где F_{Π} – сила натяжения замыкающей пружины), $R_{\text{ср}} = 0,1$ м (где $R_{\text{ср}}$ – средний радиус поверхностей трения основной и дополнительной фрикционных групп), $z = 4$, $z_1 = 1$, $C_1 = 0,5$, используем графический способ оценки. На рис. 2 приведены графики зависимости $T_{\Pi}(C)$ для различных вариантов АФМ, отражаемых соответствующими математическими моделями:

- кривая 1 отражает математическую модель согласно соотношению (2) со знаком «—» между первым и вторым (комплексным) членами в числителе;

– кривая 2 отражает математическую модель согласно соотношению (2) со знаком «+» между первым и вторым (комплексным) членами в числителе;

– кривая 3 отражает математическую модель по соотношению (2), в котором второй (комплексный) член в числителе равен нулю.

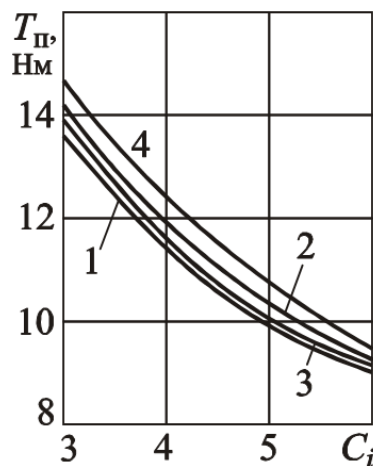


Рис. 2. Графики зависимости вращающего момента вариантов АФМ от КУ

Анализ графиков показывает, что наибольшей нагрузочной способностью обладает второй вариант АФМ, хотя разница в нагрузочной способности второго и третьего вариантов невелика ($\Delta T_{\Pi} = 0,2 \dots 0,3$ Нм).

Если учитывать точность срабатывания различных вариантов АФМ, то при $C = 6$ третий вариант имеет $K_T = 1,06$, а второй вариант – $K_T = 1,44$ (см. рис. 1, кривая 1). Первый вариант АФМ имеет $K_T = 1,09$, однако нагрузочная способность АФМ в данном случае самая низкая.

В качестве сравнения на рис. 2 приведена нагрузочная характеристика АФМ первого поколения (базовый вариант) [3, 4] (кривая 4), построенная при тех же значениях параметров, что и для кривых 1–3, по следующей формуле:

$$T_{\Pi} = z F_{\Pi} R_{\text{ср}} \frac{f_i}{1 + z C f_i}. \quad (3)$$

Все обозначения в формуле (3) соответствуют приведенным выше. Рис. показывает, что базовый вариант АФМ обладает наибольшей нагрузочной способностью, однако точность срабатывания ее характеризуется следующими величинами коэффициента точности, соответствующими указанным на рис. 2 значениям C_i : $K_T = 1,66; 1,51; 1,41; 1,35$. Указанные величины коэффициента точности существенно выше

величин K_T исследуемой АФМ, что говорит о более низкой точности срабатывания базово варианта муфты.

Результаты исследования могут быть использованы при синтезе и эксплуатации АФМ первого поколения с дополнительным регулированием и оптимальными эксплуатационными характеристиками. Кроме того, полученные в работе новые научные знания могут послужить отправной точкой для дополнительных исследований процессов, происходящих в АФМ первого поколения в переходные периоды и, в частности, проблемы повышения точности срабатывания муфты.

Выводы

1. Существует ограничение числа пар трения, свыше которого точность срабатывания АФМ практически не увеличивается.

2. При одинаковых параметрах основной фрикционной группы наибольшей нагрузочной способностью обладает второй вариант АФМ, в математической модели которого присутствует комплексный числитель.

3. По совокупности показателей «нагрузочная способность – точность срабатывания» наилучшие данные имеет вариант АФМ, математическая модель которой не содержит в числителе второго комплексного члена.

Список литературы

1. Шишкарёв М. П. Компоновочные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // Вестник машиностроения. 2003. № 7. С. 7–12.
2. Шишкарёв М. П. Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 5. С. 18–24.
3. Шишкарёв М. П. Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет. Ростов н/Д. : Изд-во РГАСХМ, 2002. 228 с.
4. Шишкарёв М. П. Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 6–9.

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Павлович Шишкарёв
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, Центр
научных компетенций, Донской
государственный технический
университет (Россия,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: shishkarev_m_p@mail.ru

Mikhail P. Shishkarev
Doctor of technical sciences,
professor, chief researcher, center
scientific competence, Don State
Technical University (1 Gagarin
Square, Rostov-on-Don, Russia)

Максим Дмитриевич Гавриленко
старший преподаватель кафедры
«Технология машиностроения»,
Донской государственной
технической университет (Россия,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: aaakot@yandex.ru

Maxim D. Gavrilenko
Senior lecturer of the department of
technology of mechanical engineering,
Don State Technical University
(1 Gagarin square,
Rostov-on-Don, Russia)

УДК621.838.222

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУМОИЗОЛЯЦИИ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕННОЙ КАБИНЕТНОЙ ЗАЩИТЫ

**Дмитрий Сергеевич Кокарев¹,
Сергей Александрович Нестеров²,
Владимир Зиновьевич Зверовщikov³,
Наталья Владимировна Сорокина⁴,
Андрей Александрович Вьюговский⁵**

¹ООО «Станкомашстрой», Пенза, Россия

^{1,2,3,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке шумоподавляющих свойств новой конструкции кабинетной защиты на предприятии ООО «Станкомашстрой», которые показали эффективность новой конструкции для приведения уровня шума при работе с металлообрабатывающим оборудованием до норм санитарно-эпидемиологических требований на рабочих местах.

Ключевые слова: шумоизоляция, звукопоглощающий материал, кабинетная защита, токарный станок с ЧПУ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF NOISE ISOLATION OF LATHE MACHINES THROUGH IMPROVED CABINET PROTECTION

**Dmitry S. Kokarev¹, Sergey A. Nesterov²,
Vladimir Z. Zverovshchikov³, Natalia V. Sorokina⁴,
Andrey A. V'yugovskiy⁵**

¹LLC Stankomashstroy, Penza, Russia

^{1,2,3,4,5}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article presents the results of experimental studies on the assessment of the noise-reducing properties of a new design of office protection at the Stankomashstroy

LLC enterprise, which showed the effectiveness of the new design in reducing the noise level when working with metal-working equipment to the standards of sanitary and epidemiological requirements in the workplace.

Keywords: noise isolation, sound-absorbing material, office protection, CNC lathe

В настоящее время предприятие «СтанкоМашСтрой» решает задачу модернизации выпускаемых защитных кабин для соответствия требованиям СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», которые обязывают работодателя создавать приемлемые акустические условия труда. Предельно допустимый уровень шума на рабочих местах составляет 80 дБА, а работа при шуме свыше 85 дБА недопустима. Следовательно, необходимо разработать шумоизолирующую конструкцию.

Для эффективного снижения энергии звуковых волн необходимо покрывать поверхности кожуха звукопоглощающим материалом (ЗПМ). К таким материалам относятся пористые вещества с коэффициентом звукопоглощения на средних частотах $\alpha > 0,2$.

В качестве звукопоглощающего материала (ЗПМ) рассматривались различные варианты. Выбор был сделан в пользу микропористой резины «Микропористый EPDM» с плотностью 160 кг/м³, поставляемой в рулонах толщиной 8 мм. Для упрощения установки материал имеет клеевой слой на одной стороне. Аббревиатура EPDM образовалась из первых букв слов, обозначающих происхождение материала. А именно: этилен (E), пропилен (P), диен (D), а последняя буква M говорит о принадлежности к стандарту ASTM 1418.

Предполагается, что данный материал будет наноситься непосредственно на внутренний слой защиты кабины без предварительной подготовки, с последующей обрезкой в соответствии с геометрией поверхности, при этом сама кабинетная защита должна быть изготовлена в виде «Сэндвича» с наружным и внутренним размещением металлических листов, с расположением между ними звукопоглощающего материала.

Для оценки уровня звукового воздействия в рабочей зоне выполним измерение шума при функционировании техники в цехах ООО «СтанкоМашСтрой». В цехе № 2 в качестве объекта исследования был токарный станок с числовым программным управлением модели СТ16А25.

Проверку проведем в 4 режимах:

- холостой режим работы с открытой кабинетной защитой;
- холостой режим работы с закрытой кабинетной защитой;
- рабочий режим с точением проходным резцом с открытой кабинетной защитой;

– рабочий режим с точением проходным резцом с закрытой кабинетной защитой.

Процесс измерения приведен на рис. 1.



Рис. 1. Измерение уровня шума

Измерения проводились с использованием Шумомера-анализатора спектра 1-го класса точности АССИСТЕНТ SIU.

Анализ данных табл. 1 показывают, что улучшение качества шумоизоляции кабинетной защиты являются актуальными.

Таблица 1

**Данные экспериментальной проверки уровня шума
в производственном помещении**

Режим работы станка	Измеренный уровень шума, дБ
Холостой режим работы с открытой кабинетной защитой	83,2
Холостой режим работы с закрытой кабинетной защитой	78,4
Рабочий режим с точением проходным резцом с открытой кабинетной защитой	98,4
Рабочий режим с точением проходным резцом с закрытой кабинетной защитой	93,6

Проведение оценки требуемых параметров звукопоглощающего материала было проведено на экспериментальной установке выполненной по схеме, приведенной на рис. 2.

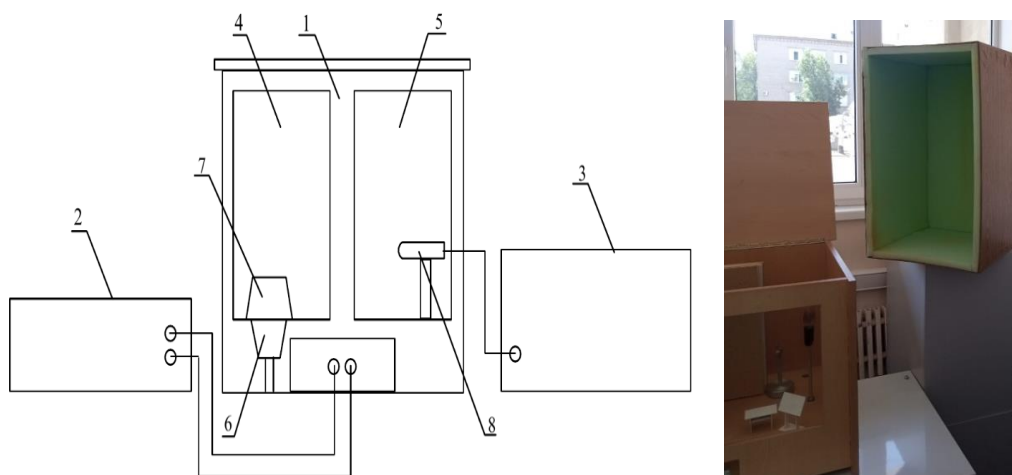


Рис. 2. Схема и фотография экспериментальной установки для измерения параметров шума

Установка включает: макет помещений 1, функциональный генератор электрических сигналов 2, измеритель шума и вибрации 3. Макет помещений состоит из двух камер. В левой камере 4 в качестве источника шума за защитной решёткой помещён громкоговоритель 6, имитирующее оборудование. В правой камере 5 установлен микрофон 8, с помощью которого исследуются параметры шума. Правая камера 5 имитирует рабочее место производственного участка. Для имитации параметров шума используется функциональный генератор электрических сигналов ФГ-100. 3D модель объекта эксперимента, размещенного между камерами 4 и 1 представлена на рис. 3.

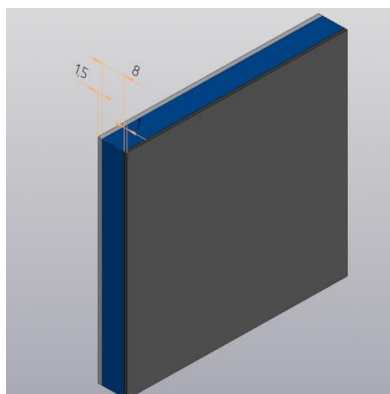


Рис. 3. 3D модель объекта эксперимента

Для проведения эксперимента были выделены 2 фактора: толщина ЗПМ (4 и 8 мм), и плотность (100 и 160 кг/м³) ЗПМ. Параметры были взяты исходя из наиболее эффективного влияния на подавление шума. Кроме того, параметры были выбраны исходя из возможности легкого управления варьированием технологических факторов и доступностью управления.

Исследования проводились классическим экспериментом на основе рототабельного униформ-планирования с построением математической модели и оценкой её адекватности (рис. 4).

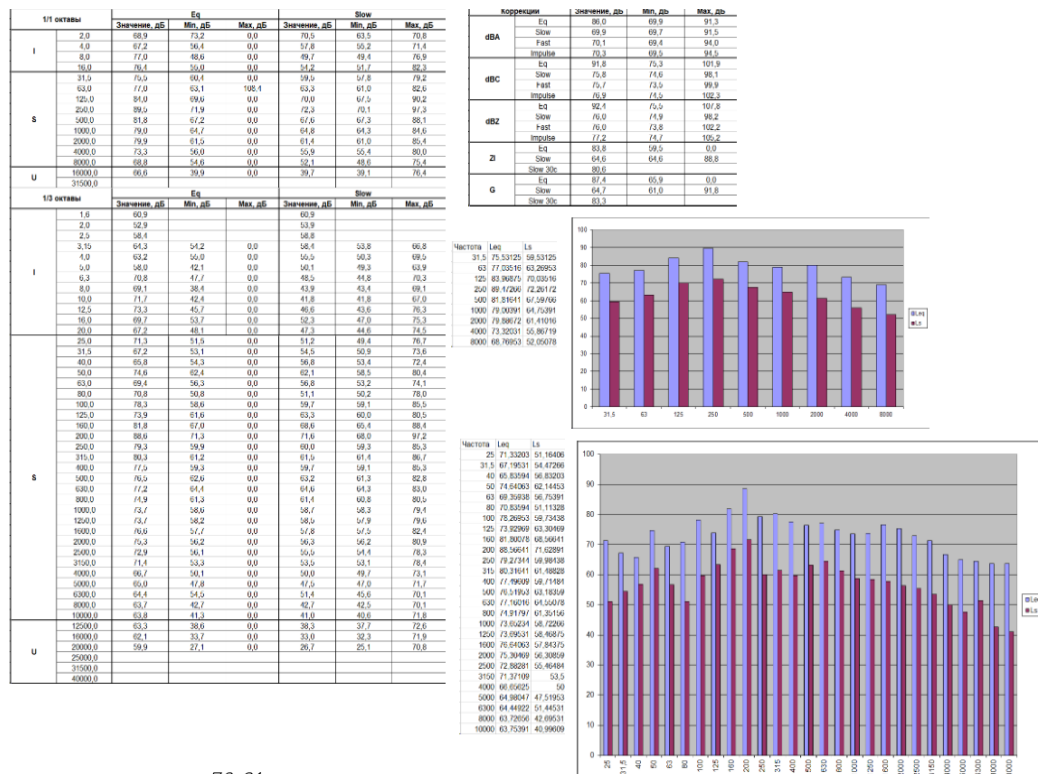


Рис. 4. Результаты исследований шумомером АССИСТЕНТ

Графические зависимости оценки уровня шума от значений входных факторов приведены на рис. 5, 6.

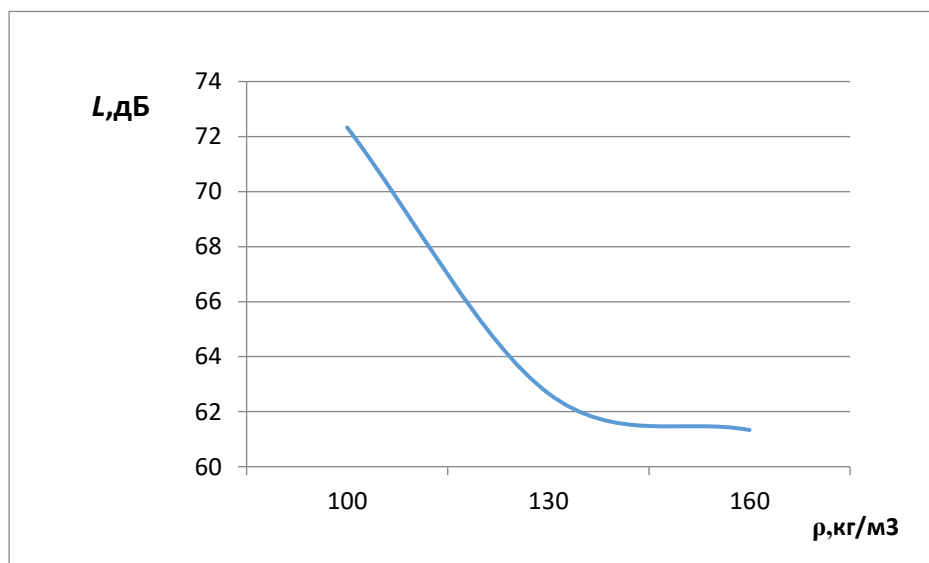


Рис. 5. Зависимость уровня шума от значений толщины звукопоглощающего материала t

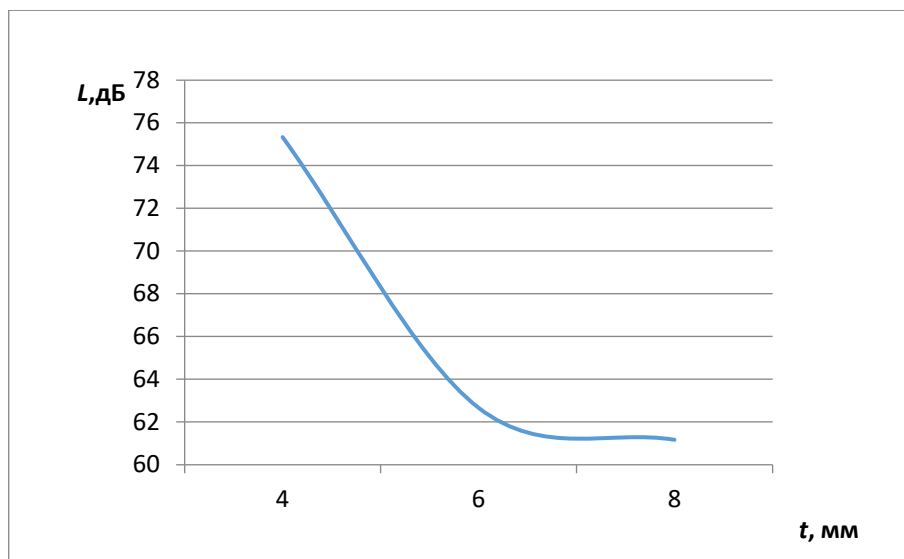


Рис. 6. Зависимость уровня шума от значений плотности звукопоглощающего материала ρ

Изучение представленных графических данных демонстрирует, что воздействие толщины и плотности звукопоглощающего материала на результирующий уровень шума защитного кожуха проявляется в виде выраженной нелинейной зависимости. Наблюдается тенденция к ослаблению этого воздействия по мере увеличения значений указанных параметров. Это дает основание для определения рациональных значений данных параметров с целью снижения уровня шума станка до значений, соответствующих установленным нормам.

Анализ графиков показывает, что даже минимальные из протестированных значений толщины и плотности материала гарантируют уровень шума ниже 80 дБ. Таким образом, в конструкции можно использовать следующие параметры: толщина материала 8 мм, плотность 160 кг/м^3 , что обеспечит достаточный запас по шумоизоляции даже при более интенсивных режимах обработки, чем те, что были использованы в экспериментах. Этим требованиям соответствует ЗПМ марки «Микропористый EPDM» с плотностью 160 кг/м^3 . В заключение, полученные результаты позволяют утверждать, что эффективность разработанной конструкции в плане снижения уровня шума на рабочем месте подтверждена экспериментально.

Список литературы

1. Павлова С. В., Аюшеев Т. В. Метод геометрического моделирования многослойных конструкций изделий легкой промышленности // Вестник ВСГУТУ. 2014. № 1. С. 13–18.
2. Ящерицин П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении : справ. пособие. Минск : Выш. шк., 1985. 286 с.

3. ГОСТ 12.0.002–2003. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2019.

4. Арзамасов Б. Н., Соловьева Т. В., Герасимов С. А. [и др.]. Справочник по материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. М. : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. 640 с.

5. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение-1, 2003. Т. 2. 944 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Сергеевич Кокарев

инженер, ООО «Станкомашстрой»
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 9);
студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: tmspgu@mail.ru

Dmitry S. Kokarev

Engineer, LLC "Stankomashstroy"
(9 German Titov street, Penza,
Russia); student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Александрович Нестеров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nesterovs@list.ru

Sergey A. Nesterov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
technologies and equipment of
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Владимир Зиновьевич Зверовщиков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: wzzwer@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of technologies and
equipment of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Наталья Владимировна Сорокина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nvsor@list.ru

Natalia V. Sorokina

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
technology and equipment for
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Андрей Александрович Вьюговский
кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры «Техносферная
безопасность», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: ot@pnzgu.ru

Andrey A. V'yugovskiy
Candidate of biological sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
technosphere safety, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 531.3

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

Александр Николаевич Литвинов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Высокочастотные роторные системы (РС) на упругих опорах широко применяются в станкостроении, а также в различных машинах и механизмах, например, в прядильных блоках пневмопрядильных текстильных машин и других изделий машиностроения. Существенной особенностью является то, что динамическое поведение РС существенно определяет надежность и точность работы механизма, в котором они установлены. В современном станкостроении наблюдается тенденция повышения скоростей вращения, что приводит к повышенному износу подшипниковых опор и, как следствие, к снижению точности обработки деталей. Таким образом, исследование динамики высокоскоростных РС с учетом податливости упругих опор является весьма актуальным. В работе изложена методика расчета критических скоростей РС на упругих опорах.

Ключевые слова: динамика, высокоскоростные роторные системы, износ, упругие опоры, критическая скорость

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF HIGH-SPEED ROTOR SYSTEMS

Alexander N. Litvinov

Penza State University, Penza, Russia

Abstract. High-frequency rotary systems (RS) on elastic supports are widely used in machine tool manufacturing, as well as in various machines and mechanisms, such as spinning units of pneumatic textile machines and other engineering products. A significant

feature is that the dynamic behavior of the RS significantly determines the reliability and accuracy of the mechanism in which it is installed. Thus, the study of the dynamics of high-speed vehicles taking into account the compliance of elastic supports is very relevant. In this work, the method of calculating the critical speeds of RS on elastic supports has been modified.

Keywords: dynamics, high-speed rotary systems, wear, elastic supports, critical speed

Рассматривается динамическая модель высокоскоростного ротора, представленная на рис. 1.

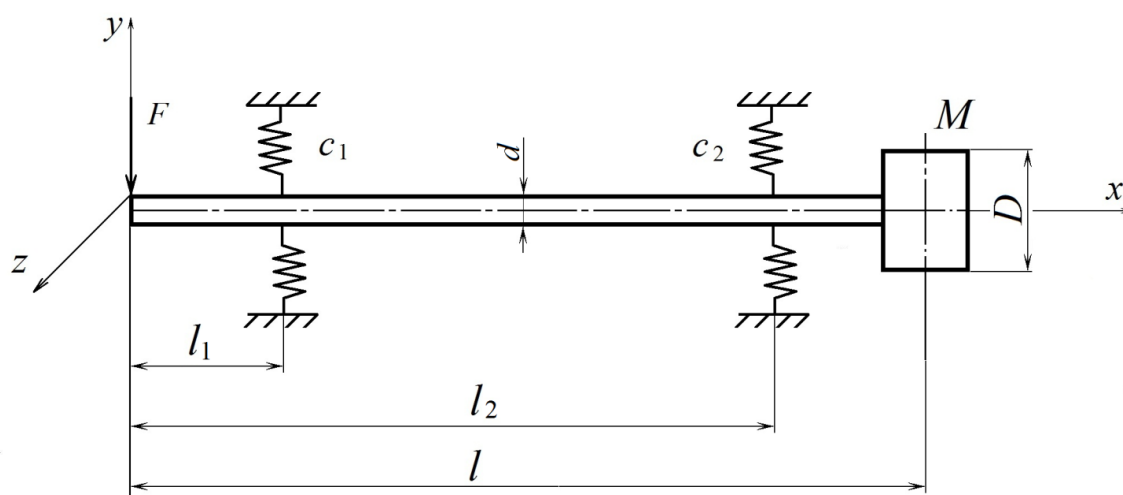


Рис. 1. Динамическая модель ротора

Ротор рассматривается как вращающаяся упругая система с распределенными параметрами, несущая массу M и совершающую изгибные колебания при вращении. Считаем, что жесткости подшипниковых опор (c_1 и c_2) соизмеримы с изгибной жесткостью вала. Задача решается в системе координат x, y, z . Вал имеет диаметр d и размеры l_1, l_2, l ; F – усилие, действующее со стороны привода роторной системы (РС).

Уравнение движения РС в пространстве при угловой скорости вращения ω записывается в виде [1]:

$$EJ \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - m\omega^2 \varphi(x) = M\omega^2(l) + F|_{x=0} + \sum_{i=1}^2 c_i \varphi(l_i), \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала вала; $J = \pi d^4/64$; m – распределенная масса вала; $\varphi(x)$ – форма изгибных колебаний.

Решение уравнения (1) находим операционным методом с использованием функций Крылова [2]:

$$\varphi(x) = R(x) + \Phi(x), \quad (2)$$

где $R(x)$ – решение однородного уравнения, а $\Phi(x)$ – частное решение неоднородного уравнения (2), которые имеют вид

$$R(x) = AS(kx) + B \cdot T(kx) + c \cdot U(kx) + DV(kx); \quad (3)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{k^3} \int_0^x f(\xi) V[k(x - \xi)] d\xi, \quad (4)$$

Здесь A, B, C, D – постоянные интегрирования; S, T, U, V – функции Крылова; $k = \sqrt[4]{m\omega^2/EJ}$ – частотный коэффициент; $f(\xi)$ – правая часть уравнения (1).

Вычисляя интеграл в (4) с учетом того $\Phi(0) = \Phi'(0) = \Phi''(0) = \Phi'''(0) = 0$, получим

$$\Phi(x) = (EJk^3)^{-1} \left\{ M\omega^2 \varphi(l) V[k(x - l)] + FV(kx) + \sum_{i=1}^2 c_i \varphi(l_i) V[k(x - l_i)] \right\}. \quad (5)$$

Удовлетворяя граничным условиям $\varphi'(0) = \varphi'''(0) = 0$ и учитывая свойства функций Крылова и их производных получим, что $C = 0$; $D = -(EJk^3)^{-1} F$. Граничные условия при $x = l$ (рис. 1) принимают вид

$$\varphi''(l) = Ak^2 \cdot U(kl) + Bk^2 V(kl) + (EJk)^{-1} \sum_{i=1}^2 c_i \varphi(l_i) T[k(l - l_i)] = 0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varphi'''(l) = Ak^3 \cdot T(kl) + Bk^3 U(kl) + (EJk)^{-1} \times \\ \times \sum_{i=1}^2 c_i \kappa(l_i) S[k(l - l_i)] + (EJ)^{-1} M\omega^2 \varphi(l) = 0. \end{aligned}$$

Выражения для форм колебаний РС, входящие в (6), записываются в виде:

- при $0 \leq x \leq l_1$: $\varphi_1(x) = AS(kl_1) + BT(kl)$;
- при $l_1 \leq x \leq l_2$: $\varphi_2(x) = \varphi_1(x) + (EJk)^{-1} c_1 \varphi_1(l_1) V[k(x - l_1)]$; (7)
- при $l_2 \leq x \leq l$: $\varphi_3(x) = \varphi_2(x) + (EJk^3)^{-1} c_2 \varphi_2(l_2) V[k(x - l_2)]$.

Подставляя выражения (7) в систему уравнений (6), и проводя преобразования с учетом свойств функций Крылова окончательно находим систему двух уравнений относительно произвольных постоянных A и B в виде:

$$\begin{cases} a_{11}A + a_{12}B = 0; \\ a_{21}A + a_{22}B = 0, \end{cases}$$

где для коэффициентов a_{jk} при $j, k = 1, 2$ получены следующие соотношения

$$\begin{aligned} a_{11} &= \alpha^2 U(\alpha) + \frac{W_1}{\alpha} \cdot S(\alpha\beta_1) \cdot T[\alpha(1-\beta)] + \\ &+ \frac{W_2}{\alpha} \cdot T[\alpha(1-\beta_2)] \left\{ S(\alpha\beta_2) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot S(\alpha\beta_1) \right\}; \\ a_{12} &= \alpha^2 U(\alpha) + \frac{W_1}{\alpha} \cdot T(\alpha\beta_1) \cdot T[\alpha(1-\beta_1)] + \\ &+ \frac{W_2}{\alpha} \cdot T[\alpha(1-\beta_2)] \left\{ T(\alpha\beta_2) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot T(\alpha\beta_1) \right\}; \\ a_{21} &= \alpha^3 T(\alpha) + W_1 \cdot S[\alpha(1-\beta_1)] \cdot S(\alpha\beta_1) + W_2 \cdot S[\alpha(1-\beta_2)] \times \\ &\times \left\{ S(\alpha\beta_2) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot S(\alpha\beta_1) \right\} + n\alpha^4 \times \\ &\times \left\{ \left\{ S(\alpha) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(1-\beta_1)] \cdot S(\alpha\beta_1) + \frac{W_2}{\alpha^3} V[\alpha(1-\beta_2)] \cdot S(\alpha\beta_2) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{W_1 W_2}{\alpha^6} V[\alpha(1-\beta_2)] \times V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot S(\alpha\beta_1) \right\} \right\}; \\ a_{22} &= \alpha^3 U(\alpha) + W_1 \cdot S[\alpha(1-\beta_1)] \cdot T(\alpha\beta_1) + W_2 \cdot S[\alpha(1-\beta_2)] \times \\ &\times \left\{ T(\alpha\beta_2) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot T(\alpha\beta_1) \right\} + n\alpha^4 \times \\ &\times \left\{ \left\{ T(\alpha\beta_2) + \frac{W_1}{\alpha^3} V[\alpha(1-\beta_1)] \cdot T(\alpha\beta_1) + \frac{W_2}{\alpha^3} V[\alpha(1-\beta_2)] \cdot T(\alpha\beta_2) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{W_1 W_2}{\alpha^6} V[\alpha(1-\beta_2)] \times V[\alpha(\beta_2 - \beta_1)] \cdot T(\alpha\beta_1) \right\} \right\}. \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь введены следующие безразмерные параметры РС:

$W_j = c_j l^3 / EJ$ – безразмерная радиальная жесткость подшипниковых опор; $\beta_j = l_j / l$ – безразмерная координата опоры; j – номер опоры ($j = 1, 2$); $n = M / ml$ – безразмерная масса; $\alpha = kl$ – безразмерный частотный коэффициент, определяющий соответственно частоты изгибных колебаний РС.

Из условия нетривиальности решения системы уравнений (8) получим трансцендентное частотное уравнение

$$a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}a_{21} = 0, \quad (9)$$

корни которого α_k определяют собственные частоты изгибных колебаний ω_k и соответственно критические скорости n_k ротора

$$\omega_k = \frac{\alpha_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \text{ (с}^{-1}\text{); } n_k = \frac{30\omega_k}{\pi} \text{ (мин}^{-1}\text{)}, (k=1, 2, \dots). \quad (10)$$

Наибольший интерес представляет критическая скорость $n_{кр} = n_1$, соответствующая первой собственной частоте ω_1 , так как на ней достигается максимальный прогиб РС. Для устойчивой работы системы [3] рабочая частота вращения n должна удовлетворять условию $n < n_{кр}$.

Решение трансцендентного частного уравнения (9) осуществляется любым численным методом (например, методом хорд или половинного деления с заданной точностью). Численный анализ решений показывает, что частотные коэффициенты α_1 , а следовательно и критическая частота вращения существенно зависят от основных безразмерных параметров роторной системы: β_j, W_j, n . Это позволяет конструктивными методами существенно повысить критическую скорость и расширять диапазон рабочих частот РС рассматриваемой конструкции.

В качестве примера рассмотрена РС пневмопрядильной машины со следующими параметрами: $D = 54$ мм, $d = 10$ мм, $l_1 = 45$ мм, $l_2 = 85$ мм, $l = 112$ мм, $M = 58$ г, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $c_1 = c_2 = 6 \cdot 10^3$ Н/мм; $m = 0,63$ г/мм.

На основании численного расчета получено значение критической скорости РС $n_{кр} = 69310$ мин⁻¹. Для исключения резонансных явлений роторной системы и обеспечения ее устойчивости работы рабочая частота вращения ротора должна удовлетворять условию $n \leq 0,6 n_{кр}$, т.е. $n \leq 41580$ мин⁻¹.

Для полного динамического анализа роторной системы необходимо рассчитать амплитуды вынужденных колебаний вала в рабочем диапазоне частот РС, исследовать величину износа в подшипниковых опорах и конструкторско-технологические способы его уменьшения.

Список литературы

1. Бабков И. М. Теория колебаний. М. : Наука, 1965. 560 с.
2. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. М. : Машиностроение, 1970. 736 с.
3. Коритынский Я. И. Динамика упругих систем текстильных машин. М. : Легкая промышленность, 1982. 272 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Литвинов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теоретическая
и прикладная механика и графика»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: pnzgu.tpmg@mail.ru

Alexander N. Litvinov
Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of theoretical and
applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.9:658.12

АНАЛИЗ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Татьяна Михайловна Севостьянова¹,
Анна Александровна Черепенникова²,
Николай Алексеевич Миронычев³,
Павел Александрович Гурин⁴**

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассмотрены варианты представления сборочных размерных цепей сложных конструкций на примере шпинделей металлорежущего оборудования и промышленной запорной арматуры. Определены методы достижения точности конструкций. Приводятся рекомендации для повышения точности изделия на этапах проектирования, изготовления и сборки.

Ключевые слова: размерная цепь, шпиндель, герметичность, запорный элемент

ANALYSIS OF DIMENSIONAL CIRCUITS OF TECHNOLOGY EQUIPMENT

**Tatyana M. Sevostyanova¹, Anna A. Cherepennikova²,
Nikolay A. Mironychev³, Pavel A. Gurin⁴**

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. Options for presentation of assembly dimensional chains of complex structures on the example of spindles of metal cutting equipment and industrial shut-off valves are considered. Methods of achieving accuracy of structures are defined. Recommendations are given to improve the accuracy of the product during the design, manufacture and assembly stages.

Keywords: dimensional chain, spindle, tightness, locking element

Выполнению заданных технических характеристик любых изделий от простых до сложных должно предшествовать проведение размерного анализа конструкторских и технологических размерных цепей. В машиностроении при изготовлении металлорежущих станков, шарикоподшипников, трубопроводной арматуры, датчиков к ним предъявляются специфические требования по точности, уровню шума, герметичности и надежности.

Правильное решение многозвенных размерных цепей таких изделий требует особого подхода, поскольку это пространственные цепи, и однозначного значения заданных допусков быть не может.

Известные методики предлагают в качестве решений при сборке сложных и точных изделий метод групповой взаимозаменяемости, регулирования, либо пригонки. т.к. от этого зависят функциональные характеристики: точность и шум металлорежущих станков, герметичность и надежность запорной арматуры, безопасность рабочей зоны тепло- и АЭС.

В подшипниковой промышленности применяется групповая взаимозаменяемость, что характерно для массового производства.

Для сложных пространственных размерных цепей предусмотрено выполнение 3D моделей, аксонометрического эскиза и схем с однозначным определением всех составляющих звеньев. После чего составляют и решают уравнения.

Известные конструкторские наработки предлагают регулировку на стадии выполнения сборочных операций для МРС (рис. 1 и 2).

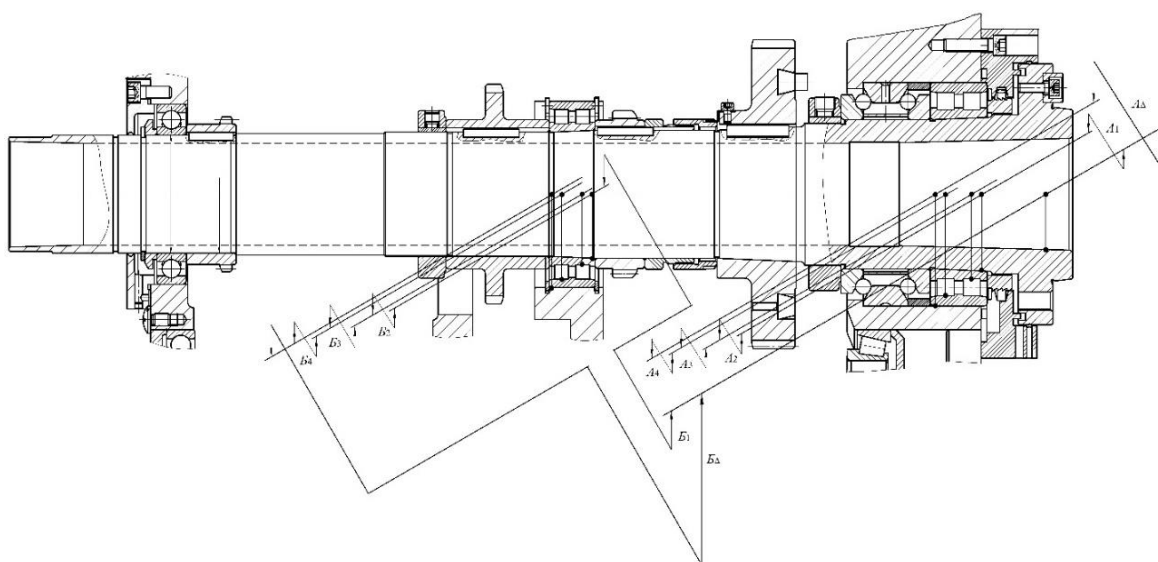


Рис. 1. Размерные цепи шпиндельного узла токарно-винторезного станка СТ1625

Для прецизионных станков точность геометрических размеров шеек шпинделя рекомендуется повысить до 5 квалитета, с отклонениями формы до степени С ($25 \% T_d$), точность подшипников – по ISO P2, а сборку выполнять с предварительным повышенным нагружением (*High Preload*).

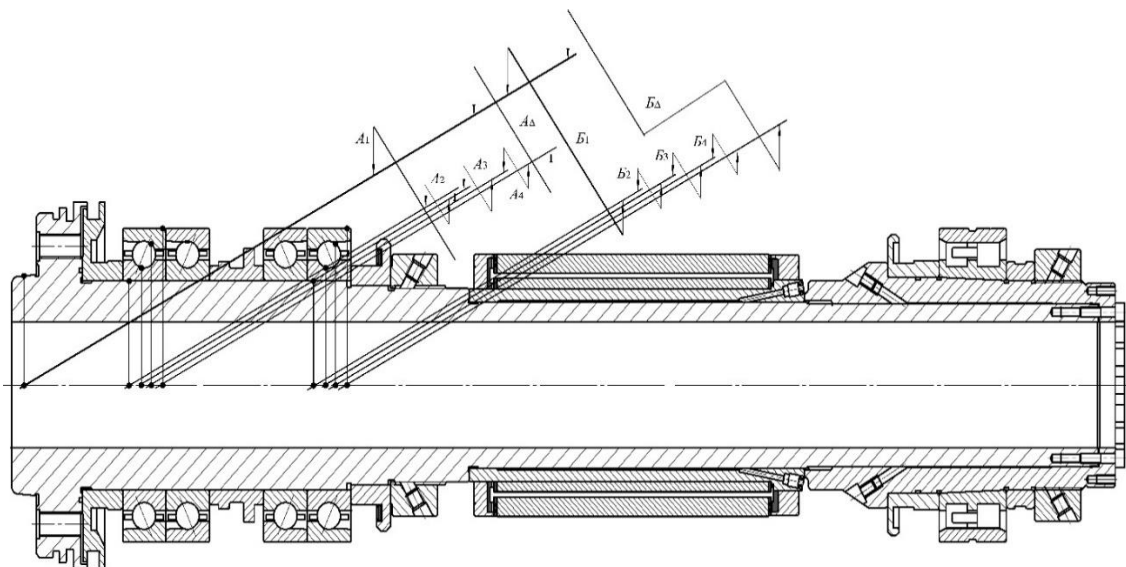


Рис. 2. Размерные цепи шпиндель-мотора

Применяется в станкостроении также методика оценки характеристик траекторий выбранных фиксированных опорных точек шпинделя для оценки точности сборки. Для трубопроводной арматуры, в частности клиновых задвижек, вследствие незначительного объема производства и широкой номенклатуры, применяется притирка, как метод, обеспечивающий наивысшую точность и высокий класс герметичности.

Однако для некоторых конструкций запорной арматуры, например, в шаровых кранах предусмотрена регулировка зазора и обеспечение герметичности в процессе эксплуатации между пробкой, седлом и вкладышем седла за счет пружин, расположенных в корпусе крана (рис. 3).

Ремонтопригодность, как важный показатель технологичности дорогостоящей и сложной техники, зависит от условий эксплуатации и трудоемкости ремонтных работ. В станкостроении для восстановления точности применяются операции шлифования, шабрения и замены комплектующих (подшипников, муфт, винтов, гек, зубчатых колес и т.д.).

Общая оценка технологичности запорной арматуры показала правомочность исполнений всех разновидностей клина: жесткого, упругого (рис. 4), двухдискового.

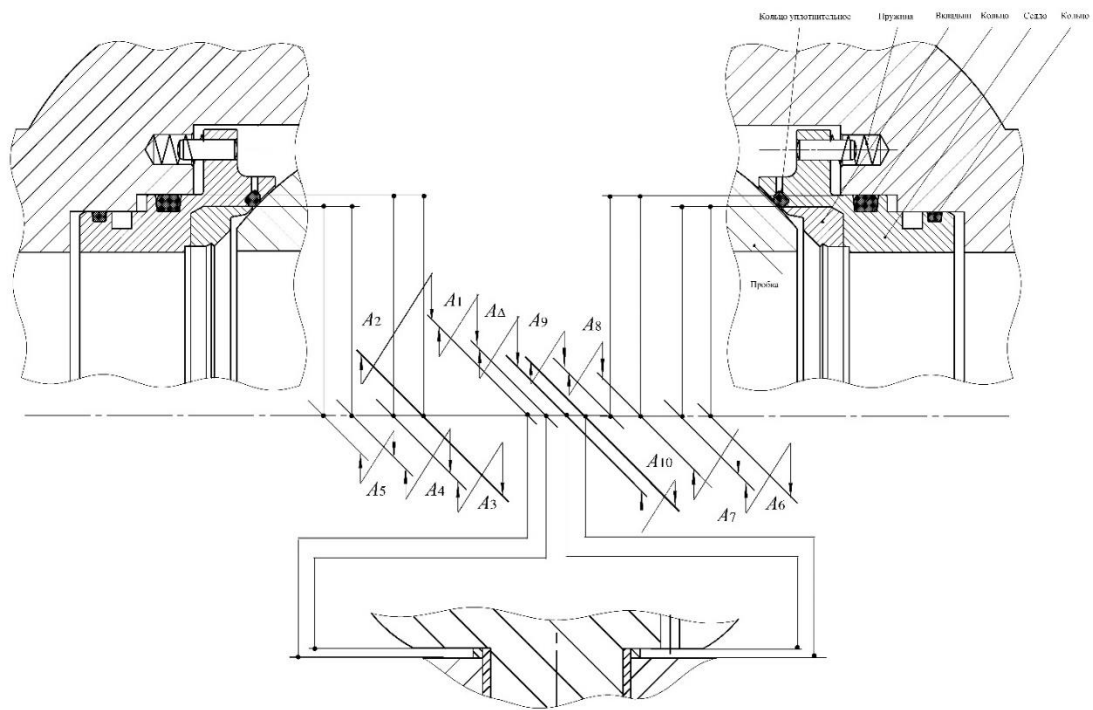


Рис. 3. Размерные цепи шарового крана

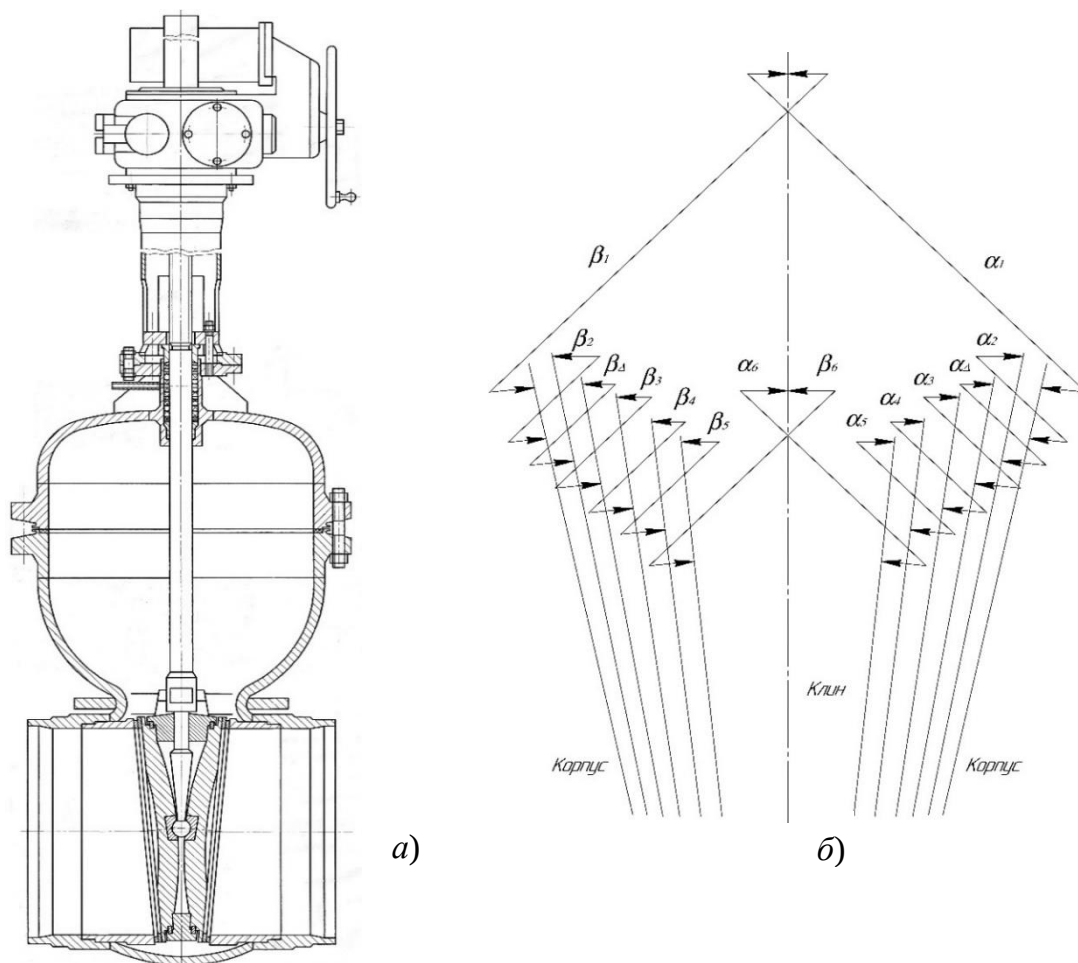


Рис. 4. Клиновая задвижка: а – вид общий; б – размерные цепи

В арматуростроении изношенные металлические датали, однозначно, подвергаются восстановлению наплавкой с последующими операциями механической обработки резанием и доводкой (притиркой) сопрягаемых рабочих поверхностей. Пластмассовые и резиновые уплотнители – заменяются.

В конструкции волноводного уровнемера метод регулировки в сборочной размерной цепи обеспечивает необходимую точность замыкающего звена за счет упругого четырехлопастного компенсатора, который монтируется с постоянным упругим контактом (с одноразовым созданием упругой деформации) на измерительной внутренней штанге, концентричной наружной трубе (рис. 5).

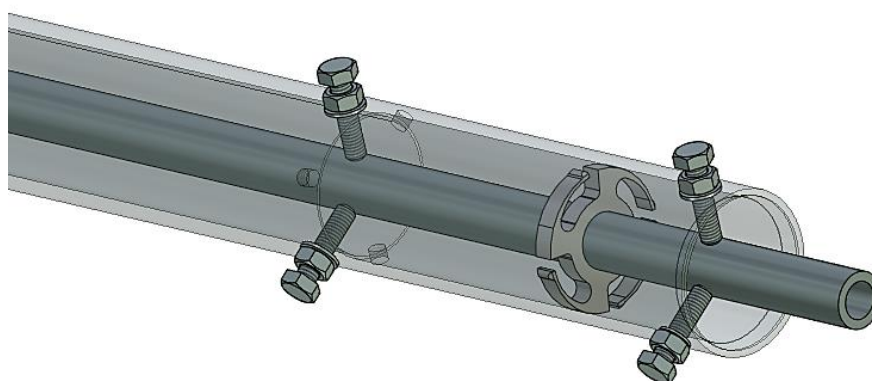


Рис. 5. Вид общий волноводного уровнемера реактора с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ)

Выводы:

1. Качество и точность сложных технологических систем обеспечиваются, как минимум, соблюдением заданных технических требований на изготовление и сборку. Однако современная практика предполагает при изготовлении увеличение точности как деталей, так и комплектующих на одну ступень (квалитет, степень, класс).
2. Конструкции вариантов исполнения шпинделей станков, элементов запорной арматуры, датчиков существенно различаются, поскольку предназначены для работы в разных условиях, поэтому необходим индивидуальный подход в принятии окончательного решения для создания конструктивного исполнения и обеспечения функционального назначения конструкции.
3. Жесткие временные и опасные для персонала условия технического обслуживания датчиков уровнемеров тепло- и АЭС требуют совершенствования их конструкций для повышения надежности.

Список литературы

1. Abele E., Altintas Y., Brecher C. Machine Tool Spindle Units // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2010. Vol. 59, iss. 2. P. 781–802.
2. Book of Spindles. Part I: Spindle Facts. 2011.
3. Weck M. Machine Tools: Construction and Mathematical Analysis. Wiley : Chichester, 1984. Vol. 2.
4. Бондаренко С. Г. Размерные расчеты механосборочного производства. Киев : ИСДО, 1993. 544 с.
5. Гошко А. И. Арматура трубопроводная целевого назначения : в 3 кн. Кн. 2: Производство. Испытания. Монтаж. М. : Машиностроение, 2003. 336 с.
6. Миронычев Н. А., Гурин П. А., Авдеева Д. В. Влияние волнистости беговых дорожек подшипника на шум и вибрации // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 1–3 июня 2023 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. А. Е. Зверовщикова; к.т.н., доц. С. А. Нестерова; к.т.н., доц. Д. В. Кочеткова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 421–426.
7. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность. М. : Машиностроение, 1992. 288 с.
8. Бондаренко С. Г., Чередников О. Н., Губий В. П. [и др.]. Размерный анализ конструкций. Киев : Техника, 1989. 148 с.
9. Сейнов С. В. Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт. М. : Машиностроение, 2002. 392 с.
10. Черепенникова А. А. Совершенствование конструкции измерителя уровня теплоносителя в атомных реакторах свинцового типа // Машиностроительные технологические системы : доклад на Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 95-летию Донского государственного технического университета и кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» (10–12 апреля 2025 г.). Ростов н/Д., 2025.

Информация об авторах / Information about the authors

**Татьяна Михайловна
Севостьянова**
магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tansevastan@yandex.ru

Tatyana M. Sevostyanova
Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

**Анна Александровна
Черепенникова**
магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tmspgu@mail.ru

Anna A. Cherepennikova
Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Николай Алексеевич Миронычев
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: minial@bk.ru

Nikolay A. Mironychev
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department
technologies and equipment
of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Павел Александрович Гурин
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: sbgurin_havel@list.ru

Pavel A. Gurin
Candidate of technical sciences,
associate professor of the department
technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 62-294.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕСС-ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯ ТИПА «БЛОК НАТЯЖЕНИЯ НИТИ» ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТА «МИНИТПА-100»

**Диана Сергеевна Гуляева¹,
Данила Александрович Верхушин²,
Дмитрий Сергеевич Курдюмов³,
Юлия Станиславовна Кудрявцева⁴**

^{1,2,3,4}Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассматриваются технологические особенности проектирования пресс-формы на примере изделия типа «Блок натяжения нити» для термопластавтомата «МиниТПА-100».

Ключевые слова: пресс-форма, деталь, изделие, литьевая полость

DESIGNING A TYPE MOLD PRODUCT «THREAD TENSION UNIT» FOR THE «MINI IMM-100» INJECTION MOLDING MACHINE

**Diana S. Gulyaeva¹, Danila A. Verkhushin²,
Dmitry S. Kurdyumov³, Julia S. Kudryavtseva⁴**

^{1,2,3,4}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. This article discusses the technological features of mold design using the example of a «Thread tension unit» type product for the «Mini IMM-100» injection molding machine.

Keywords: mold, part, product, injection cavity

Введение

Изделие типа «Блок натяжения нити» применяется в модульном учебном комплексе МУК-М2 «Механика 2» [1] и состоит из подшипника и двух одинаковых пластиковых колесообразных частей (рис. 1). Сборка производится по средствам клеевого соединения.

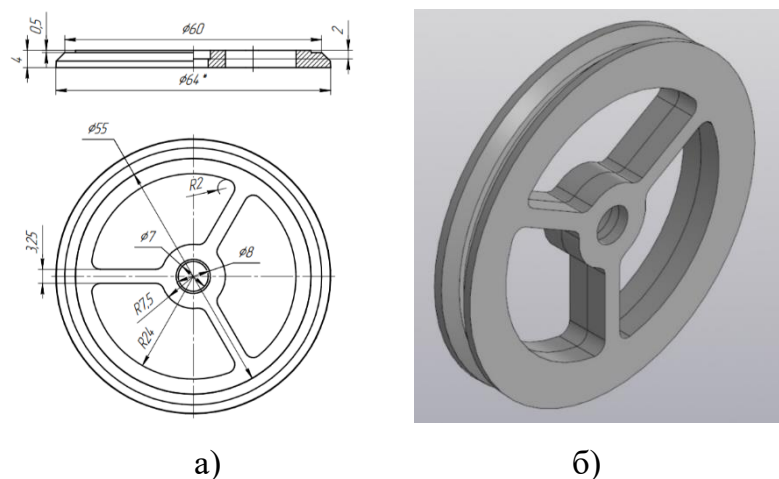


Рис. 1. Изделие «Блок натяжения нити»:
а) чертеж детали; б) модель изделия в сборке

В настоящее время пластиковые заготовки изготавливаются на 3D-принтере, после чего в каждой детали на фрезерном станке фрезеруется центральное отверстие под подшипник и крепление. Отдельная операция для отверстий нужна для того, чтобы обеспечить одинаковый посадочный размер для подшипника, поскольку 3D-печать дает непредсказуемую усадку по всей площади материала. Однако при фрезеровании возникает проблема центрирования отверстия, в том числе из-за деформирования габаритных размеров, получаемых вследствие усадки материала при печати. Это приводит к тому, что часть уже напечатанных деталей уходит в брак из-за смещенного отверстия.

Целью данной статьи является проектирование конструкции пресс-формы для литья под давлением изделия типа «Блок натяжения нити» на термопластавтомате «МиниТПА-100» с целью замены существующей технологии (3D-печать с последующей механической обработкой), что позволит снизить процент брака и время на изготовление, а также повысить повторяемость деталей.

Проектирование конструкции пресс-формы

Первым этапом проектирования является геометрическое моделирование (CAD-моделирование). Его целью является обеспечение точного соответствия конструкции изделия технологическим требо-

ваниям и возможностям производства. В данном случае моделирование осуществляется в «КОМПАС 3D». Перед началом проектирования необходимо учесть ряд технологических особенностей.

1. Выбор материала пресс-формы

Наиболее распространенными материалами для изготовления пресс-форм являются различные марки стали и алюминия. Ключевую роль в выборе материала играет тип производства. Стальные пресс-формы способны выдерживать до 1.000.000 отливок, в то время как алюминиевые рассчитаны на партии менее 50.000 отливок. За счет более низкой твердости алюминий легче поддается обработке, что позволяет сэкономить время и средства на производство формы [6]. Дополнительными преимуществами алюминия является меньший вес и антикоррозионная устойчивость.

Поскольку «Блок натяжения нити» отливается в условиях мелкосерийного производства (примерно 120 отливок в год), целесообразно в качестве материала пресс-формы использовать алюминий.

Температура плавления алюминия 660 °С, в то время как максимальная температура, на которую станок может нагреть материал – 400 °С.

2. Компонировка пресс-формы

Процесс компоновки пресс-формы заключается в изучении геометрии отливаемых деталей для определения линии и плоскости разреза и грамотного определения размеров, и расположения литевых полостей. Места пересечения формообразующих полостей с плоскостью разреза должны быть острыми. Не допускаются завалы кромок, при тупления и выкрошенные места [7].

В станке предусмотрено два размера для крепления направляющих: 120 и 200 мм. Предварительно для определения посадочных размеров, габаритов пресс-формы, расположения литевой полости и отверстий под толкатели был смоделирован узел смыкания, включающий в себя направляющие, универсальные плиты для крепления полу-форм и плиту двигателя. В данном случае используются направляющие диаметром 20 мм, расположенные на расстоянии 200 мм друг от друга. Длина узла смыкания составляет 330 мм. Расстояние раскрытия формы может изменяться от 0 до 100 мм. Все посадочные размеры взяты с официального сайта производителя оборудования [2].

Расчетное усилие смыкания формы 5 т. Для избежания прогиба плит литевой формы из-за их недостаточной толщины, габаритные размеры полу-форм составляют 100 200x20 мм без учета выступов системы центрирования.

Центры отверстий под крепление полу-форм к плитам расположены по краям прямоугольника размерами 60x180 мм. Диаметр отверстий рассчитан под резьбу болта М8. Также в форме предусмотрены углубления под шляпку болта, чтобы обеспечить полное смыкание формы.

Неуказанные поля допусков размеров деталей пресс-форм должны соответствовать: Н14 – для отверстий, h14 – для валов по ГОСТ 25347, среднему классу точности по ГОСТ 30893.1 – для углов, радиусов, закруглений, фасок и элементов, не относящихся к отверстиям и валам [7].

3. Требования к обработке поверхностей пресс-формы

На поверхности деталей не должно быть следов коррозии, трещин и других механических повреждений, ухудшающих прочность, эксплуатационные качества и внешний вид.

Шероховатость поверхностей деталей пресс-форм должна соответствовать Ra 3,2 мкм для резьб, Ra 0,80 мкм – опорных плоскостей разъема, 0,20 мкм – формообразующих полостей. В технически обоснованных случаях допускается выполнять формообразующие поверхности с шероховатостью Ra 0,40 мкм [7].

4. Выбор материала отливаемого изделия

Перед проектированием пресс-формы необходимо понимать под какой материал рассчитывать размеры формообразующей полости, поскольку разный материал дает разную усадку.

«Блок *нерастяжимой нити*» должен обладать устойчивостью к силовым нагрузкам и истиранию. Немаловажным является требование к непрозрачности материала, так как во время сборки необходимо скрыть следы клея.

Исходя из требований, предъявляемых к изделию, был выбран АВС – доступный, прочный и жёсткий пластик с глянцевой поверхностью и стойкостью к выцветанию. Плотность материала составляет 1,06–1,19 г/см³, линейная усадка в зависимости от марок – 0,3–0,8 %, что говорит о относительно высокой точности размеров отливаемых изделий [3, 5].

В нашем случае важно сохранить точность размеров внутреннего отверстия под подшипник, поэтому проектируем их чуть больше с учетом усадки материала.

5. Углы уклона при раскрытии пресс-формы

Для избежания повреждений отливки и пресс-формы в процессе выталкивания изделия следует рассчитать технологические уклоны. Угол уклона при раскрытии пресс-формы изделия напрямую связан со степенью его усадки: при раскрытии формы внутренние участки

плотнее охватывают формообразующие элементы, тогда как внешние, напротив, отходят от стенок, облегчая извлечение детали. Для изделий из АБС-пластика угол уклона следует учитывать следующим образом: для центральной части он должен составлять 31° в направлении извлечения из формы, а для полый части он должен составлять от 4° до $1^\circ 20'$ в направлении извлечения из формы [5].

6. Выталкиватели

Чтобы минимизировать риск повреждения отливки при демонтаже, следует использовать выталкиватели с расширенной контактной поверхностью, которые обеспечивают равномерное распределение усилий при извлечении готовой детали. В данном случае задействовано 7 толкателей (по 3 на каждую деталь в наиболее прочных местах и 1 в середине литниковой системы). Для упрощения процесса изготовления толкателей за основу берутся винты DIN 912 с последующей механической обработкой. Механизм срабатывает во время раскрытия формы за счет сжатия пружины о неподвижно закрепленную пластину.

Торцы выталкивателей должны быть в одной плоскости с формообразующей поверхностью матрицы. При отсутствии других указаний допускается выступание или утопление выталкивателей над поверхностью до 0,2 мм, если сторона изделия, на которую действуют выталкиватели, не является лицевой и в зависимости от требований, предъявляемых к изделию [7].

7. Литниковая система

Конфигурация изделия должна обеспечить наиболее короткий путь потока массы. Для более быстрого заполнения всех частей полости формы расплавом АБС диаметр полостей должен составлять не менее 5 мм. Толщина участка, входящего в полость формы должна быть не менее 30 % от толщины изделия, длина примерно 1 мм [5]. Литниковые каналы должны иметь плавные переходы [7].

8. Вывод излишков материала и выделений расплава

Для избежания распираания пресс-формы в процессе литья и образования облоя, в ходе подбора дозы впрыска, в конечной точке заполнения предусматриваются специальные углубления под излишки материала. Для предотвращения возгорания расплавленного пластика и образования выступающих линий швов необходимо создать вентиляционные отверстия или щели глубиной не более 0,04 мм для облегчения выхода выделений [5].

9. Система охлаждения

Для упрощения технологического процесса изготовления пресс-формы вдоль наименьшей длины стенки просверливаются сквозные отверстия под резьбу М8. В них с помощью нити для герметизации вкручиваются фитинги, в которые вставляется силиконовый шланг для подачи воды [2].

10. Система центрирования

Смещение контуров формообразующих поверхностей относительно друг друга по плоскости разъема не должно быть более 0,05 мм. В нашем случае неподвижная полу-форма не имеет формообразующих полостей, однако проблема центрирования может вывести станок из строя. Поэтому для обеспечения соосности пресс-формы при смыкании в одной половине предусматриваются выступающие части, в другой – отверстия с учетом технологических уклонов.

Заключение

Результатом проектирования пресс-формы изделия типа «Блок натяжения нити» для термопластавтомата «МиниТПА-100» стала геометрическая 3D-модель, изображенная на рис. 2–3.

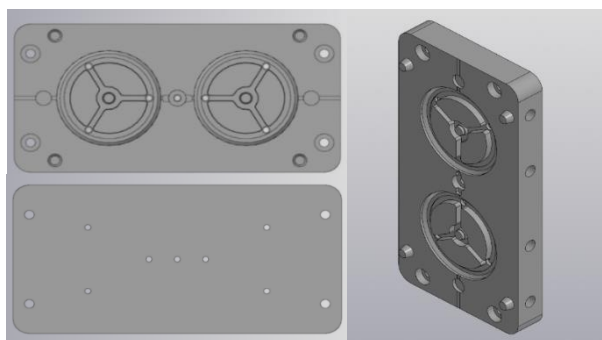


Рис. 2. Подвижная полу-форма:
а) вид спереди; б) вид сзади; в) изометрия

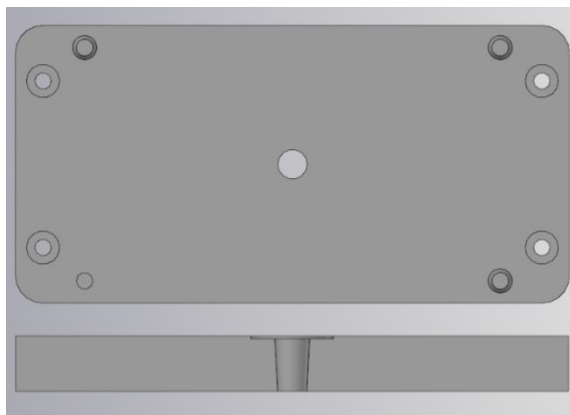
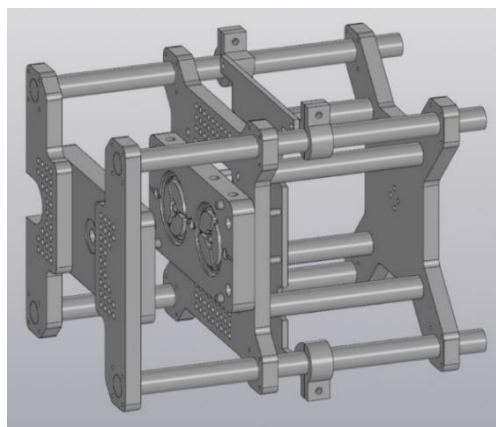
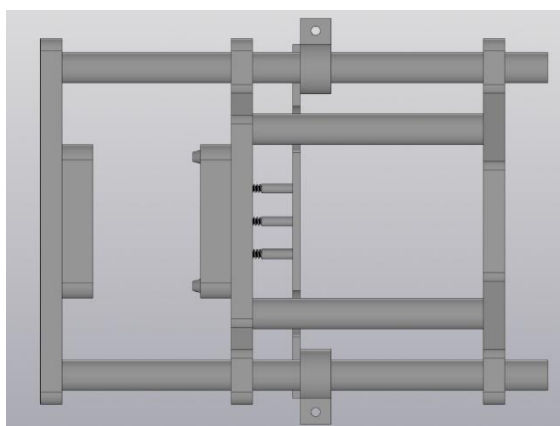


Рис. 3. Неподвижная полу-форма:
а) вид спереди; б) вид в разрезе



а)



б)

Рис. 4. Узел смыкания:
а) диметрия; б) вид сбоку

Список литературы

1. Модульный учебный комплекс МУК-М2 «Механика 2». URL: <https://opprib.ru/main/labor/html/complex/muk-m2.php>
2. МиниТПА-100 – МиниТПА. Настольный малогабаритный станок для литья пластмасс. URL: <https://минитпа.рф/>
3. Маннесманн Демаг Пластсервис. Литье под давлением – коротко и ясно : информационная брошюра. Н. Новгород : Симплекс, 2000. 142 с.
4. Фетисова Т. С. Проектирование литьевых форм для изготовления пластмассовых изделий : учеб. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. 102 с.
5. Некоторые рекомендации по обработке АБС-пластика. URL: <https://juyuans.com/ru/некоторые-рекомендации-по-обработке/>
6. Пресс-формы для литья пластмасс. URL: <https://nagrev-24.ru/blog/press-formy-dlya-litya-plastmass/>
7. ГОСТ 27358–87. Пресс-формы для изготовления изделий из пластмасс. Общие технические условия.

Информация об авторах / Information about the authors

Диана Сергеевна Гуляева
магистрант, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: Dianych14@mail.ru

Diana S. Gulyaeva
Master degree student,
Novosibirsk State Technical
University (20 K. Marx avenue,
Novosibirsk, Russia)

Данила Александрович Верхушин
магистрант, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: danila.verhushin@yandex.ru

Danila A. Verkhushin
Master degree student,
Novosibirsk State Technical
University (20 K. Marx avenue,
Novosibirsk, Russia)

Дмитрий Сергеевич Курдюмов
ассистент кафедры «Общая физика»,
Новосибирский государственный
технический университет (Россия,
г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: kurdymov@corp.nstu.ru

Dmitry S. Kurdyumov
Assistant of the department of general
physics, Novosibirsk State Technical
University (20 K. Marx avenue,
Novosibirsk, Russia)

Юлия Станиславовна Кудрявцева
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология машиностроения»,
Новосибирский государственный
технический университет (Россия,
г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: yu.semenova@corp.nstu.ru

Julia S. Kudryavtseva
Candidate of technical sciences,
associate professor of the department
of mechanical engineering technology,
Novosibirsk State Technical
University (20 K. Marx avenue,
Novosibirsk, Russia)

УДК 67.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛА СМЫКАНИЯ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТА ПРИ ЛИТЬЕ ДЕТАЛЕЙ С РАЗНОЙ МАССОЙ И ПРОЕКЦИОННОЙ ПЛОЩАДЬЮ НА ПРИМЕРЕ «МИНИТПА-100»

**Данила Александрович Верхушин¹,
Диана Сергеевна Гуляева²,
Дмитрий Сергеевич Курдюмов³,
Евгений Дмитриевич Головин⁴**

^{1,2,3,4}Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

Аннотация. Представлены результаты конечно-элементного анализа узла смыкания минитермопластавтомата «МиниТПА-100». Исследование направлено на

установление зависимости между проекционной площадью отливаемой детали и риском раскрытия пресс-формы с последующим образованием облоя.

Ключевые слова: термопластавтомат (ТПА), узел смыкания, пресс-форма, давление, усилие

MODELING OF THE OPERABILITY OF THE INJECTION MOLDING MACHINE CLOSURE UNIT WHEN CASTING PARTS WITH DIFFERENT WEIGHTS AND PROJECTION AREAS USING THE EXAMPLE OF "MINI IMM-100"

**Danila A. Verkhushin¹,
Diana S. Gulyaeva²,
Dmitry S. Kurdyumov³,
Evgeny D. Golovin⁴**

^{1,2,3,4}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents the results of the finite element analysis of the closure node of the mini injection molding machine "Mini IMM-100". The study is aimed at establishing the relationship between the projection area of the cast part and the risk of mold opening, followed by the formation of debris.

Keywords: injection molding machine (IMM), closure unit, press mold, pressure, force

Введение

В условиях роста спроса на мелкосерийное производство и прототипирование возрастает роль малогабаритного литейного оборудования [1]. Однако их эксплуатация выявляет специфические технологические ограничения, ключевым из которых является ограниченное усилие смыкания.

Цель настоящей работы: разработать 3D-модели узла смыкания и пресс-форм для «МиниТПА-100», провести конечно-элементный анализ в программном пакете ANSYS напряженно-деформированного состояния сборки «узел смыкания – пресс-форма» под действием давления расплава, сформулировать практические рекомендации по проектированию прессформ для данного класса оборудования.

Узел смыкания МиниТПА-100

Чтобы смоделировать узел смыкания, обратимся к сайту производителя за чертежами [2]. Упростим модель двигателя. Также уберем латунные втулки, так как они могут создать лишнее усложнение модели. Узел смыкания представлен на рис. 1.

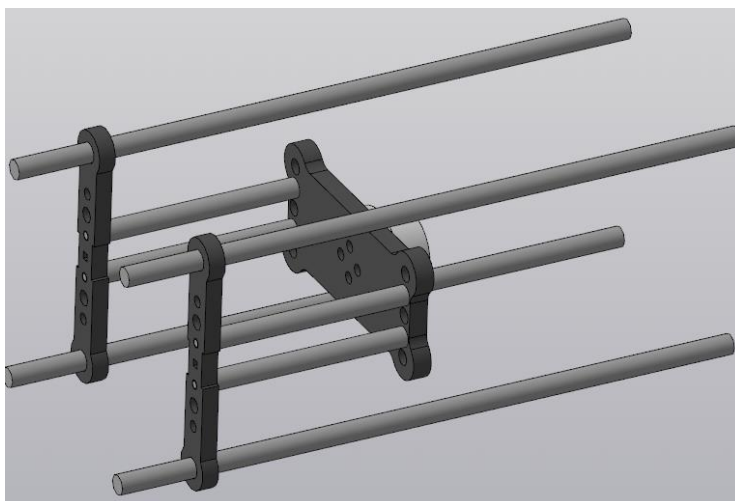


Рис. 1. Узел смыкания

Моделирование пресс-форм

Рассмотрим 2 случая: отливка весом 20 грамм и отливка весом 100 грамм.

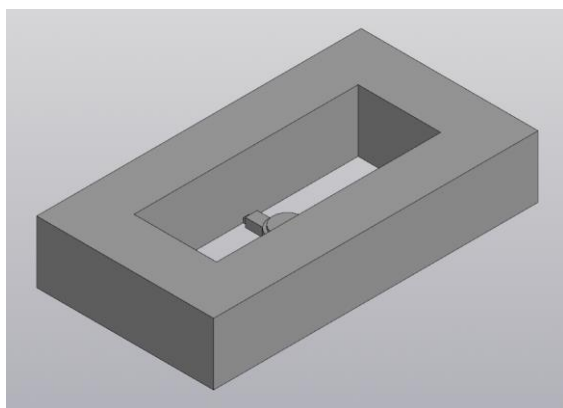
Материал пластика: ABS.

Плотность ABS: 1,02–1,06 г/см³ [3].

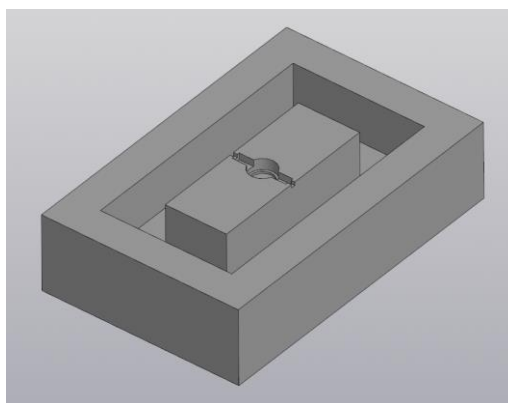
Деталь первая (рис. 2).

Размеры первой детали:

- высота: 21 мм;
- размеры внутреннего прямоугольника: 28×76 мм;
- размеры внешнего прямоугольника: 60×110 мм;
- площадь задней стенки: 4472 мм².



а)



б)

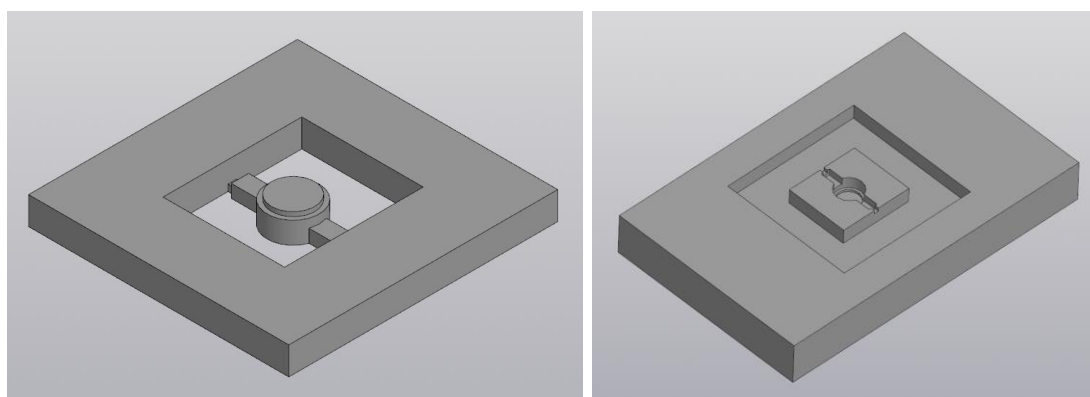
Рис. 2. Деталь первая: Деталь (а); её матрица (б)

Деталь вторая (рис. 3).

Размеры второй детали:

- высота: 6,5 мм;

- размеры внутреннего прямоугольника: 32×30 мм;
- размеры внешнего прямоугольника: 62×60 мм;
- площадь задней стенки: 2824 мм².



а)

б)

Рис. 3. Деталь вторая: Деталь (а); её матрица (б)

Данные для расчета

Свойства материалов для расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов [4–5]

Свойство	Сталь 45	Алюминиевый сплав Д16
Плотность, ρ (кг/м ³)	7856	2800
Модуль Юнга, E (ГПа)	210	72
Коэффициент Пуассона, μ	0.3	0.33
Предел прочности, σ_b (МПа)	600	450
Предел текучести, $\sigma_{0.2}$ (МПа)	450	320

Принципы, по которым устанавливаются усилия:

Согласно данным официального производителя, станок развивает давление впрыска до 50 Мпа [2]. Это максимальное давление в материальном цилиндре, которое является отправной точкой для наших расчетов.

Давление падает по пути движения расплава: по мере прохождения расплава через сопло, литниковые каналы и полость формы давление снижается из-за гидравлических потерь на трение о стенки и местные сопротивления (сужения, повороты) [6].

Давление в полости формы неоднородно: В момент заполнения самое высокое давление у входа в полость (питателя), а у фронта течения расплава давление близко к нулю. После заполнения, на этапе

подпитки, давление в полости выравнивается и поддерживается для компенсации усадки [7].

Ориентировочные уровни давления представлены в табл. 2.

Таблица 2

Ориентировочные уровни давления

Элемент системы	Давление (Мпа)	Комментарий
Сопло/Вход в литник	~50	Паспортное давление впрыска для МиниТПА-100. Исходная точка для расчетов
Задняя стенка полости формы	~25–35	Наиболее удаленная точка от впуска. Давление здесь достигает максимума только после полного заполнения полости
Вертикальные стенки полости	~25–35	Давление действует в стороны, стремясь растянуть форму

Для прессформы с малой деталью усилия назначены следующие (рис 4).

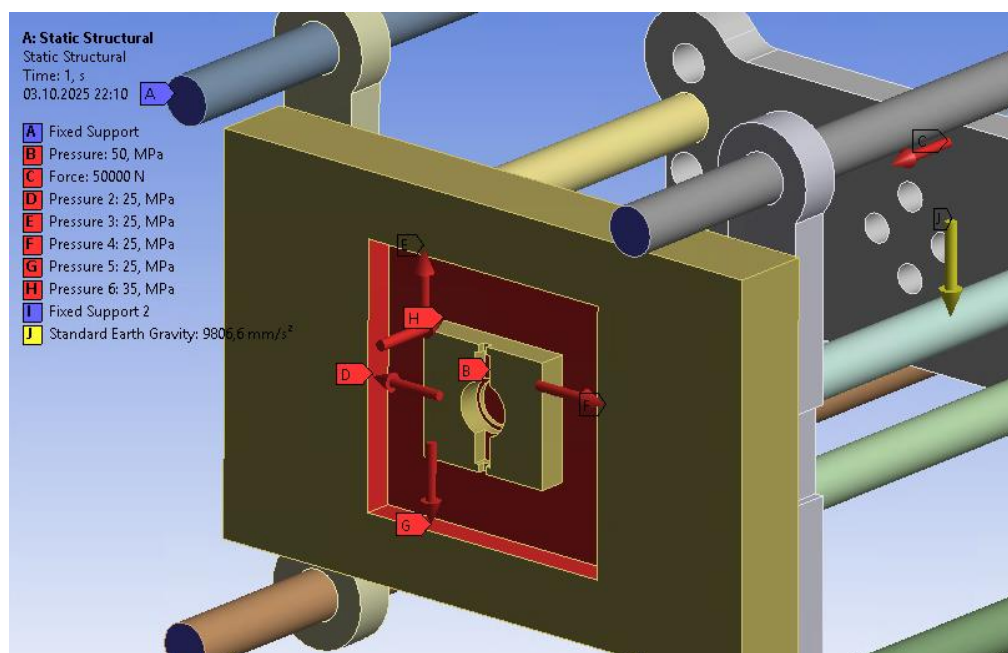


Рис. 4. Распределение усилий

Результаты расчётов

На рис. 5 видно, что усилия смыкания недостаточно и форму раскрывает.

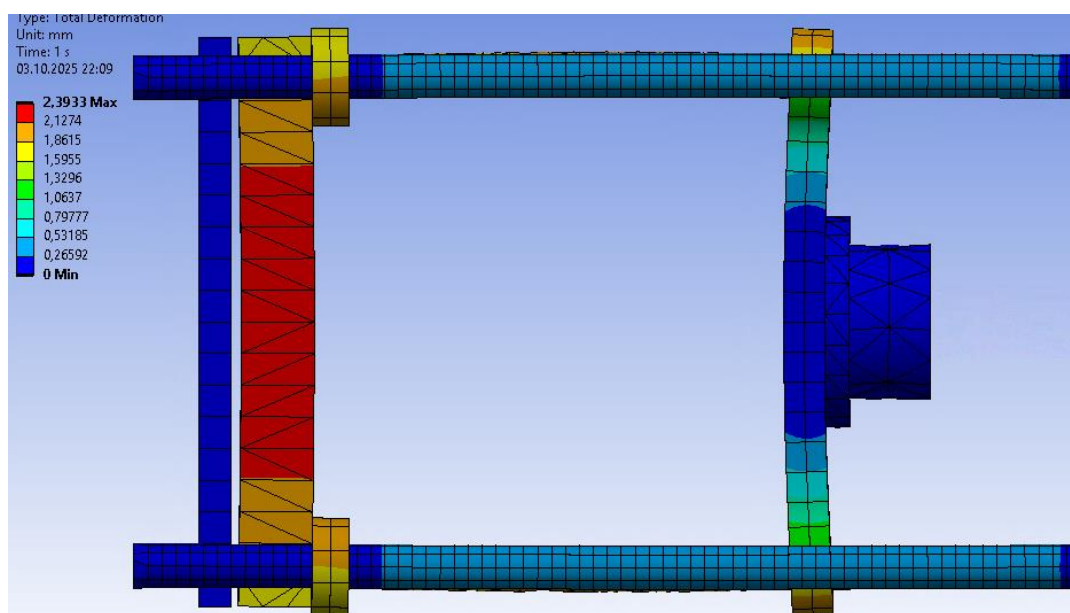


Рис. 5. Распределение деформаций

Далее, на рисунке 6 показано распределение коэффициента запаса прочности. Минимальное значение = 0,25, что недопустимо.

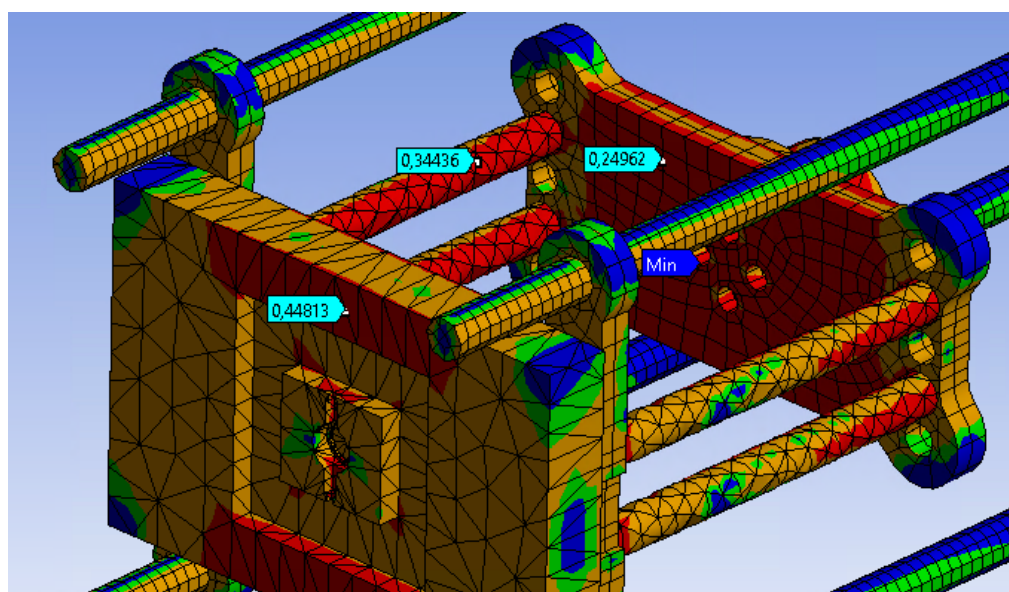


Рис. 6. Распределение коэффициента запаса прочности

Для прессформы с большой деталью усилия заданы по тому же принципу (см. рис 4).

Результат расчета представлен на рис. 7. Видно, что форму не раскрывает.

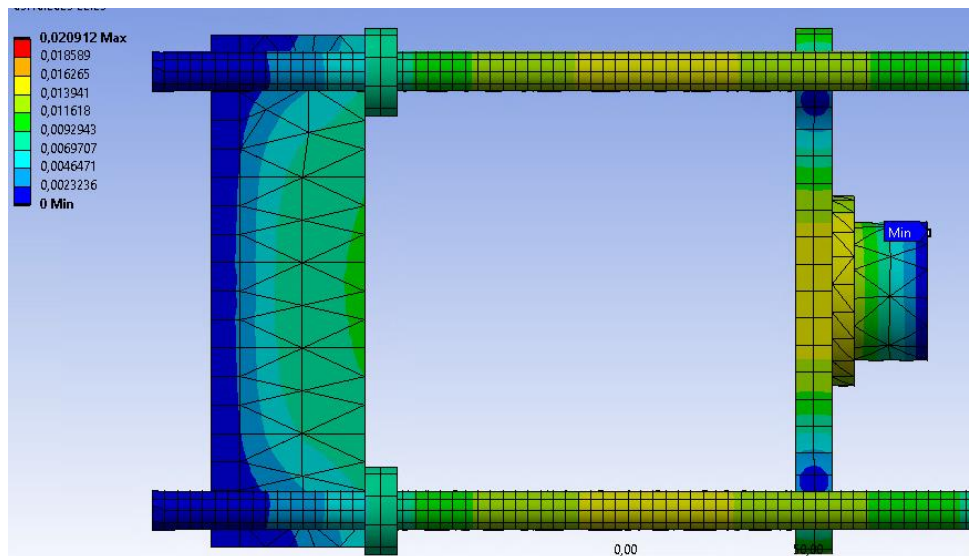


Рис. 7. Распределение деформаций

Коэффициент запаса прочности принимает минимальное значение 2, что соответствует удовлетворительному результату (рис. 8):

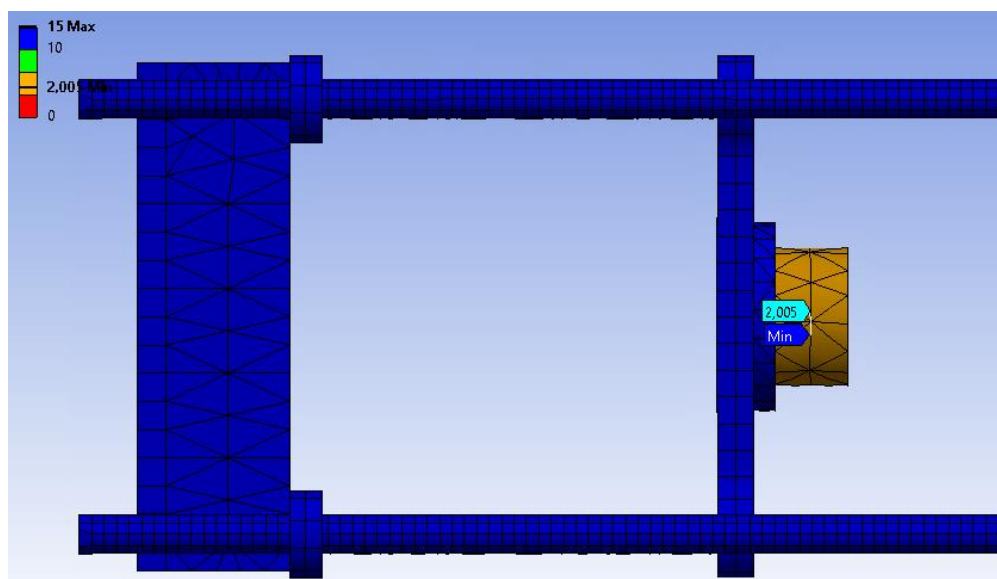


Рис. 8. Распределение коэффициента запаса прочности

Вывод

Было просчитано 2 процесса литья на ТПА «МиниТПА-100». Отличие заключалось в массе литого изделия (20 и 100 грамм). Были проанализированы возможные изменения давления в полости прессформы для более реалистичного расчета (давление изменяется от максимального 50 Мпа к минимальному 25 Мпа).

Результаты расчетов показали, что определяющим фактором для возникновения облоя и раскрытия пресс-формы является не масса отливаемой детали, а её проекционная площадь на плоскость разъема.

Список литературы

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 1. 8-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2001. 920 с.
2. Техническая документация на термопластавтомат МиниТПА-100. Каталог производителя оборудования. URL: <https://минитпа.рф> (дата обращения: 03.10.2025).
3. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М. : Стандартиформ, 2017. 12 с.
4. ГОСТ 1050–2013. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. М. : Стандартиформ, 2014. 54 с.
5. ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М. : Стандартиформ, 2019. 32 с.
6. Тростянский Э. Б. Гидродинамика и теплопередача при переработке полимеров. М. : Химия, 2007. 264 с.
7. Басов Н. И. Литье пластмасс под давлением: теория и практика. СПб. : Профессия, 2017. 512 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Данила Александрович Верхушин
магистрант, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: danila.verhushin@yandex.ru

Danila A. Verkhushin
Master degree student, Novosibirsk
State Technical University
(20 K. Marx avenue, Novosibirsk,
Russia)

Диана Сергеевна Гуляева
магистрант, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия,
г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: Dianych14@mail.ru

Diana S. Gulyaeva
Master degree student, Novosibirsk
State Technical University
(20 K. Marx avenue, Novosibirsk,
Russia)

Дмитрий Сергеевич Курдюмов
ассистент кафедры «Общая физика»,
Новосибирский государственный
технический университет (Россия,
г. Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: kurdyumov@corp.nstu.ru

Dmitry S. Kurdyumov
Assistant of the department of
general physics, Novosibirsk State
Technical University
(20 K. Marx avenue, Novosibirsk,
Russia)

Евгений Дмитриевич Головин
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технология
машиностроения», Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр-кт К. Маркса, 20)
e-mail: golovin@corp.nstu.ru

Evgeny D. Golovin
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department
of Mechanical Engineering Technology,
Novosibirsk State Technical
University (20 K. Marx avenue,
Novosibirsk, Russia)

УДК 331.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЦИРКУЛЯРНЫХ ЛЕСОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ

**Мария Васильевна Бедоидзе¹,
Марина Алексеевна Кругликова²,
Артем Сергеевич Степаницын³,
Александр Николаевич Чукарин⁴**

^{1,2,3,4}Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования и теоретический анализ параметров шумового поля в зоне работы лесопильного оборудования. Разработка представляет собой совокупность математических моделей, инициализированных по данным технического эксперимента. Проведенные исследования расширяют возможности совершенствования шумотехнических характеристик лесопильного оборудования на основе экспресс-анализа шумовой обстановки на реальных производствах.

Ключевые слова: шумовое поле, математическая модель, параметрическая идентификация

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF NOISE CONDITIONS IN THE WORKING ZONE OF CIRCULAR SAWMILLS

**Maria V. Bedoidze¹, Marina A. Kruglikova²,
Artem S. Stepanitsyn³, Alexandr N. Chukarin⁴**

^{1,2,3,4}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Experimental studies and a theoretical analysis of noise field parameters in the operating zone of sawmill equipment were conducted. The development consists of a set

of mathematical models initialized using technical experiment data. The conducted research expands the possibilities for improving the noise performance of sawmill equipment based on rapid analysis of noise conditions in real-world production environments.

Keywords: acoustic field, mathematical model, parametric identification

Шумовые параметры деревообрабатывающего оборудования, в частности циркулярных пил, являются важным фактором качества продукции и одновременно производственной безопасности [1, 2]. Поэтому обеспечение приемлемых уровней шума такого оборудования является актуальной научно-технической задачей [3, 4].

Ее решение возможно требует рационально сочетать экспериментальные и теоретические методы анализа с непосредственной имплементацией результатов в конструкцию нового оборудования и технические решения по модернизации действующих станков.

Выполненные авторами экспериментальные исследования шумового поля в рабочей зоне лесопильного оборудования в сопоставлении с данными [5] приведены на рис. 1. Как видно из этих данных, максимум излучаемой звуковой мощности приходится на диапазон 2–4 кГц, значительно превышая предельно допустимый уровень (ПДУ), регламентируемый [5].

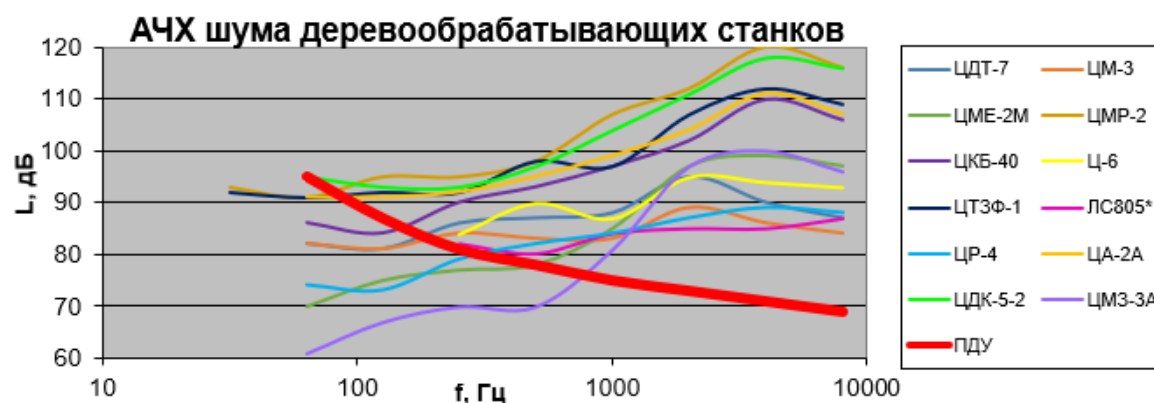


Рис. 1. Экспериментальные спектры шума деревообрабатывающих станков в сравнении с ПДУ по [5]

Качественное сходство спектров, подтверждаемое их корреляционно-группировочной матрицей в табл. 1, побуждает провести математический анализ приведенных данных технического эксперимента.

**Результаты группировки деревообрабатывающих станков
по схожести шумовых характеристик**

Станок	ЦДТ-7	ЦМ-3	ЦМР-2	ЦМЕ-2М	ЦКБ-40	ЦР-4	ЦА-2А	ЦДК-5-2	ЦМЗ-3А	ЦТЗФ-1	Ц-6	ЛС805*
ЦДТ-7	1,00	0,94	0,72	0,79	0,75	0,84	0,71	0,69	0,80	0,73	0,69	0,36
ЦМ-3	0,94	1,00	0,67	0,77	0,70	0,74	0,68	0,66	0,78	0,72	0,67	0,41
ЦМР-2	0,72	0,67	1,00	0,98	0,98	0,93	0,99	0,98	0,98	0,97	0,80	0,86
ЦМЕ-2М	0,79	0,77	0,98	1,00	0,96	0,93	0,97	0,96	1,00	0,97	0,86	0,88
ЦКБ-40	0,75	0,70	0,98	0,96	1,00	0,97	0,99	0,97	0,96	0,97	0,83	0,81
ЦР-4	0,84	0,74	0,93	0,93	0,97	1,00	0,93	0,91	0,93	0,92	0,89	0,81
ЦА-2А	0,71	0,68	0,99	0,97	0,99	0,93	1,00	0,99	0,97	0,98	0,84	0,81
ЦДК-5-2	0,69	0,66	0,98	0,96	0,97	0,91	0,99	1,00	0,96	0,97	0,84	0,86
ЦМЗ-3А	0,80	0,78	0,98	1,00	0,96	0,93	0,97	0,96	1,00	0,96	0,85	0,88
ЦТЗФ-1	0,73	0,72	0,97	0,97	0,97	0,92	0,98	0,97	0,96	1,00	0,93	0,74
Ц-6	0,69	0,67	0,80	0,86	0,83	0,89	0,84	0,84	0,85	0,93	1,00	0,57
ЛС805*	0,36	0,41	0,86	0,88	0,81	0,81	0,81	0,86	0,88	0,74	0,57	1,00

В основу теоретического анализа шумового спектра положим модель генерации звуковых колебаний пильным диском:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} + k \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{k^2}{4} F + \frac{D}{\rho h} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right]^2 F = \Phi(R, t), \quad (1)$$

где $F \equiv F(r, \phi, t)$ $F(r, \phi, t)$ – мгновенное смещение пластины; k – коэффициент диссипации колебательной энергии; r – расстояние от центра диска ($0 \leq r \leq R$); ϕ – угол, отсчитываемый от положения равновесия диска ($0 \leq \phi \leq 2\pi$); $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала диска; t – время; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость диска; где $E = 200 \text{ ГПа}$ – модуль Юнга; $h = 3 \text{ мм}$ – толщина диска; $\mu \approx 0.25 \div 0.3$ – коэффициент Пуассона, $\Phi(R, t)$ – возбуждающая колебания сила.

Значительное влияние на спектр излучаемого звука оказывает величина k , результаты экспериментального измерения которой показаны на рис. 2.

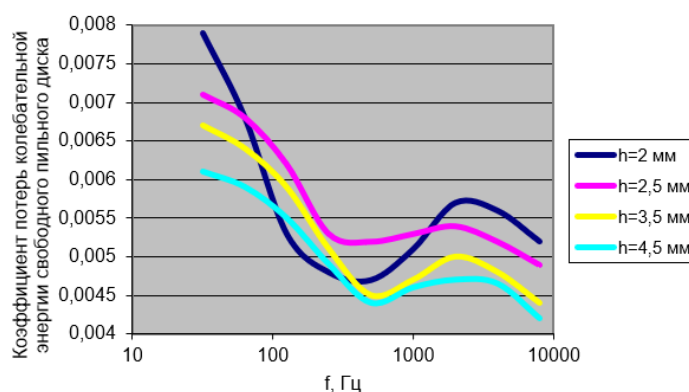


Рис. 2. Диссипативные свойства диска циркулярной пилы
большого диаметра (эксперимент)

Для численного расчета звукового спектра ее удобно аппроксимировать формулой

$$k(f, h, z) = [(-7.78 \cdot 10^{-4} \cdot (\lg f)^3 + 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot (\lg f)^2 - 2.56 \cdot 10^{-2} \cdot \lg f + 3.23 \cdot 10^{-2}) \cdot (1 - 1.2 \cdot 10^{-1} \cdot h) - 1.06 \cdot 10^{-4} \cdot (\lg f)^2 \cdot h + 4.82 \cdot 10^{-4} \cdot \lg f \cdot h] \cdot H(-z) + \\ + \{2.5 \cdot [(-7.78 \cdot 10^{-4} \cdot (\lg f)^3 + 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot (\lg f)^2 - 2.56 \cdot 10^{-2} \cdot \lg f + 3.23 \cdot 10^{-2}) \cdot (1 - 1.2 \cdot 10^{-1} \cdot h) - 1.06 \cdot 10^{-4} \cdot (\lg f)^2 \cdot h + 4.82 \cdot 10^{-4} \cdot \lg f \cdot h] + 0.0012\} \cdot H(z), \quad (2)$$

где $H(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases}$ – обобщенная функция Хэвисайда, $z = 0$ – свободный и $z = 1$ – закрепленный пыльный диск.

Для типичных параметров пыльного диска расчетный спектр шума приведен на рис. 3. Там же для сравнения приведены экспериментальные данные в высоком частотном разрешении.

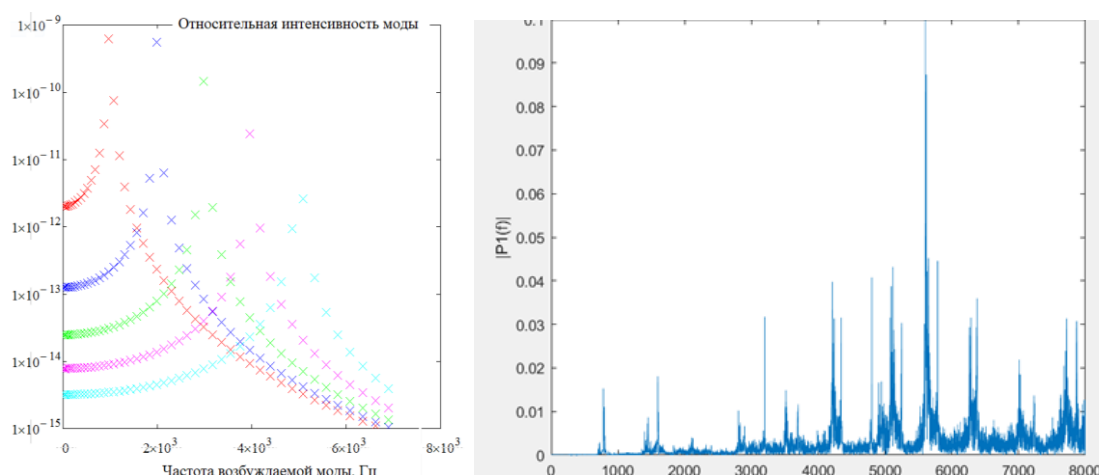


Рис. 3. Синтетический согласно (1)–(2) (слева) и экспериментальный (справа) спектры шума циркулярной пилы

Основные результаты проведенных НИР следующие: 1) экспериментально изучены шумовые характеристики лесопильных станков и частотная зависимость коэффициента потерь колебательной энергии пыльными дисками большого диаметра; 2) предложена и инициализирована математическая модель звукогенерации при работе циркулярных пил; 3) сконструирована и успешно протестирована нейросеть – идентификатор источника шума при механической обработке древесины и параметров резания.

Разработка позволяет совершенствовать лесопильное оборудование в части акустических характеристик.

Список литературы

1. Atmaca E., Peker I., Altin A. Industrial Noise and Its Effects on Humans // Polish Journal of Environmental Studies. 2005. Vol. 14, № 6. P. 721–726.
2. Красовский В. О., Максимов Г. Г., Овсянникова Л. Б. Гигиена труда при воздействии производственного шума. Уфа : Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2014. 143 с.
3. Handbook for industrial noise control / NASA SP-5108. 1981. 148 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19820003985/downloads/19820003985.pdf>
4. Международный стандарт ISO 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. 2015. 69 с. URL: <https://iso-management.com/wp-content/uploads/2018/09/ISO-9000-2015.pdf>
5. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Васильевна Бедойдзе
старший преподаватель кафедры «Высшая математика», аспирант, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: mbedoidze@donstu.ru

Maria V. Bedoidze,
Senior lecturer of the department of higher mathematics, postgraduate student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Марина Алексеевна Кругликова
студент, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: spu-46@donstu.ru

Marina A. Kruglikova
Student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Артем Сергеевич Степаницын
студент, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: bakyhan27@gmail.com

Artem S. Stepanitsyn
Student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Александр Николаевич Чукарин
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления научных исследований, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: spu-46@donstu.ru

Alexander N. Chukarin
Doctor of technical sciences, professor, chief researcher at the research department, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ
КОМПЛЕКТУЮЩИХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ
НА БАЗЕ МОДЕЛИ М/М/1**

**Дарья Вадимовна Богомоленко¹,
Ярослав Андреевич Батищенко²,
Светлана Николаевна Холодова³**

^{1,2,3}Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Создан программный комплекс, предназначенный для анализа и оптимизации работы производственного цеха, состоящего из нескольких независимых станков. Алгоритмическую основу составляют аналитические методы теории массового обслуживания на основе модели М/М/1. Цель – разработать программный комплекс для анализа и оптимизации работы производственного цеха, моделируемого как система независимых одноканальных станков. Эффективность разработки подтверждается внедрением в машиностроительное производство.

Ключевые слова: промышленное производство, оптимизация производственных процессов, системы массового обслуживания, теория очередей, модель М/М/1

**DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM
FOR DYNAMIC REAL-TIME MANAGEMENT
OF COMPONENT FLOW BASED ON THE M/M/1 MODEL**

**Darya V. Bogomolenko¹, Yaroslav A. Batishchenko²,
Svetlana N. Kholodova³**

^{1,2,3}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. A software package designed for the analysis and optimization of a production shop, consisting of several independent machines, has been developed. The complex combines an algorithmic foundation based on analytical methods of queuing theory using the M/M/1 model. The objective is to develop a software package for analyzing and optimizing the operation of a production shop modeled as a system of independent single-channel machines. The effectiveness of the development is confirmed by its implementation in machine-building production.

Keywords: industrial manufacturing, optimization of production processes, queuing systems, queuing theory, M/M/1 model

Промышленное производство является технологически сложным процессом, который требует эффективного управления ресурсами и оптимизации работы цехов. Экономически важным и технологическим аспектом является оптимизация потоков материалов и распределение операций между производством. В данной работе теория очередей (ТО) используется как математический инструмент для анализа и моделирования системы массового обслуживания (СМО) в оценки загруженности оборудования, времени обработки и других ключевых параметров.

Классически ТО применяется для анализа сервисных систем, предлагается адаптировать этот подход к производственной среде [1, 2], где производственные цеха интерпретируются как клиенты, операторы станков – как обслуживаемые единицы аппараты, а поток материалов – как входящие требования. Подобная аналогия позволяет формализовать и дать количественную оценку эффективности промышленных линий, используя хорошо разработанный математический аппарат ТО. Алгоритмизация программного комплексного основан на классической модели М/М/1 [3] со следующими параметрами: 1) λ – интенсивность потока запроса на изделия; 2) μ – интенсивность обслуживания.

Основные метрики производительности для каждого станка, рассчитываемые программным комплексом на основе модели М/М/1, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели М/М/1

Коэффициент загрузки	Среднее число изделий в системе	Вероятность простоя	Среднее время пребывания изделия в системе
$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{\rho}{1 - \rho}$	$P_0 = 1 - \rho$	$\bar{W} = \frac{1}{\mu - \lambda}$

На основе теоретической модели М/М/1 разработан специализированный программный комплекс на языке Python (код длиной свыше 500 строк), который инкапсулирует всю логику анализа производственных линий на основе теории массового обслуживания.

Функционирование программного комплекса инициируется процедурой считывания входных параметров работы технологических цехов. Указанный алгоритм инициализации отображен на блок-схеме (рис. 1).

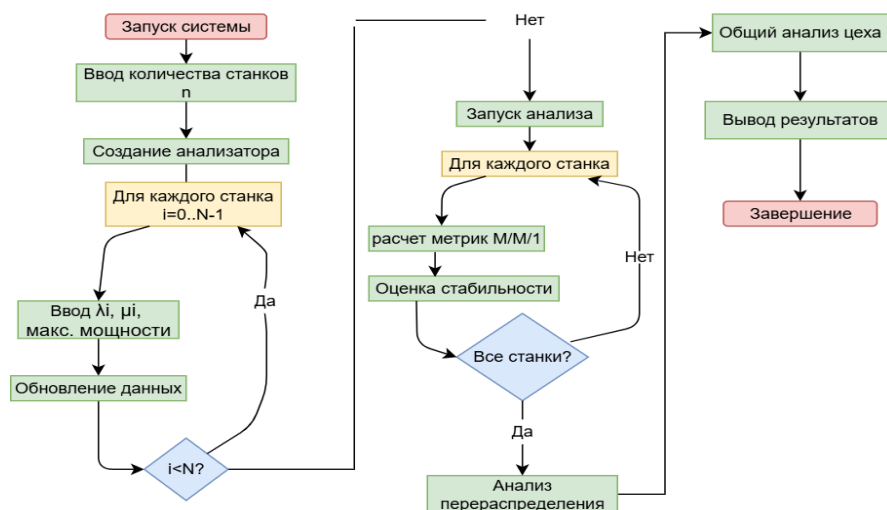


Рис. 1. Блок схема программного комплекса оптимизации производственных линий

На следующем этапе на основе заданных исходных данных выполняется анализ стабильности исследуемой системы. Процедура анализа реализована с использованием фундаментальных метрик классической модели массового обслуживания М/М/1. Результаты вычислений, включающие такие показатели, как коэффициент загрузки, среднее время ожидания в очереди и в системе, среднее число заявок, выводятся в результирующую таблицу (рис. 2).

Станок ID	λ (шт/час)	μ (шт/час)	Макс. мощность	Использованная мощность	ρ (загрузка)	Статус	Вероятность стабильности	Ср. число изделий (L)	Ср. время (W, мин)	Вероятность простоя (P0)
0	10	12	15	80.0%	0.833	Стабильная	90.2%	5.00	30.00	16.7%
1	50	20	20	100.0%	2.500	Перегружена	0.0%	∞	∞	0.0%
2	8	50	12	416.7%	0.160	Низкая загрузка	100.0%	0.19	1.43	84.0%
3	12	32	18	177.8%	0.375	Низкая загрузка	100.0%	0.60	3.00	62.5%
4	20	22	25	88.0%	0.909	Высокая загрузка	73.5%	10.00	30.00	9.1%

Рис. 2. Форма вывода результата анализа исходных данных в Excel

Заключительной фазой работы программного комплекса является вывод итоговых результатов, полученных в ходе оптимизационного анализа стабильности функционирования системы. Интерфейс представления финальных рекомендации приведен на рис. 3.

ID	Рекомендация	Приоритет
0	Общая загрузка цеха: 73.5%. Мощность используется на 151.1%.	НИЗКИЙ
1	Станок 0: Загрузка в норме (83.3%). Мощность используется на 80.0%.	НИЗКИЙ
2	Станок 1: КРИТИЧЕСКАЯ ПЕРЕГРУЗКА! Станок работает на пределе мощности (100.0%). Даже на максимуме (20.00) будет перегрузка. ТРЕБУЕТСЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ИЛИ НОВЫЙ	ВЫСОКИЙ
3	Станок 2: Низкая загрузка (16.0%). Простой 84.0% времени. Используется только 416.7% мощности. Может принять дополнительную нагрузку.	НИЗКИЙ
4	Станок 3: Низкая загрузка (37.5%). Простой 62.5% времени. Используется только 177.8% мощности. Может принять дополнительную нагрузку.	НИЗКИЙ
5	Станок 4: Высокая загрузка (90.9%). Можно увеличить производительность на 3.00 шт/час.	СРЕДНИЙ

Рис. 3. Рекомендации по оптимизации производственного цеха, формулируемые программным комплексом

Система обеспечивает автоматический расчет ключевых метрик производительности (загрузка станков, время обработки, вероятность простоя), анализ стабильности работы оборудования в реальном времени, генерацию персонализированных рекомендаций по оптимизации и интеграцию с Excel для удобного импорта/экспорта данных.

Практическая значимость: созданное авторами информационная аналитическая система позволяет повысить эффективность использования оборудования, снизить простои и оптимизировать производственные потоки, адаптируя методы теории массового обслуживания к промышленной среде и предоставляя предприятиям доступное решение для оперативного управления производственными процессами. Она успешно внедрена в деятельность ООО "Берег".

Список литературы

1. Антонова Г. М., Цвиркун А. Д. Оптимизационно-имитационное моделирование для решения проблем оптимизации современных сложных производственных систем // Проблемы управления. 2005. № 5. С. 19–27.
2. Додонов В. В. Использование элементов теории массового обслуживания для анализа производительности и надежности автоматизированных станочных систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. С. 70–76.
3. Королев А. В. Экономико-математические методы и моделирование. М. : Юрайт, 2016. 281 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Дарья Вадимовна Богомоленко

магистрант, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: bogomolenko04@mail.ru

Daria V. Bogomolenko

Master degree student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Ярослав Андреевич Братищенко

студент, Донской государственный технический университет (Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: yaroslav20007nol@mail.ru

Yaroslav A. Batishchenko

Student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Светлана Николаевна Холодова
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Безопасность
жизнедеятельности и защита
окружающей среды», Донской
государственный технический
университет (Россия,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: holls9@mail.ru

Svetlana N. Kholodova
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department life safety
and environmental protection,
Don State Technical University
(1 Gagarin square, Rostov-on-Don,
Russia)

УДК 621.941.24

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

**Александр Федорович Денисенко¹,
Роман Владимирович Ладягин²**

^{1,2}Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия

Аннотация. Представлено последовательное обоснование разработки специализированного программного обеспечения для нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов металлорежущих станков. Приведены этапы исследований, включавшие получение экспериментальных данных, выбор и оптимизацию архитектур нейросетей, сравнение с математическими подходами, а также интеграцию конструктивных параметров шпиндельных узлов. Показано, что комплекс проведенных работ позволил создать конечный продукт – программу для ЭВМ «Neural SpU», предназначенную для расчетов шпиндельных узлов.

Ключевые слова: шпиндельный узел, эксплуатационные характеристики, нейронная сеть, моделирование, программа для ЭВМ

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR NEURAL NETWORK PREDICTION OF SPINDLE UNIT PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Alexander F. Denisenko¹, Roman V. Ladyagin²

^{1,2}Samara State Technical University, Samara, Russia

Abstract. This paper presents a coherent rationale for the development of specialized software for neural network modeling of the operational characteristics of machine tool spindle assemblies. The research stages included obtaining experimental data, selecting and optimizing neural network architectures, comparing them with mathematical approaches, and integrating the design parameters of the spindle assemblies. It is demonstrated that the combined efforts resulted in the final product—the "Neural SpU" computer program for spindle assemblies.

Keywords: spindle unit, performance characteristics, neural network, modeling, computer program

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к точности и надежности металлорежущего оборудования, ключевым компонентом которого является шпиндельный узел (ШУ). Проектирование и оценка его рабочих характеристик традиционно связаны с трудоемкими натурными экспериментами и сложным математическим и компьютерным моделированием. Развитие методов искусственного интеллекта открывает новые возможности для создания эффективных инструментов для прогнозирования характеристик ШУ.

Целью данной работы является обобщение результатов цикла научных исследований, направленных на разработку и обоснование программного комплекса для нейросетевого моделирования ШУ.

Поставленная цель достигается путем решения нескольких задач.

Первоочередной задачей являлось получение достоверных и репрезентативных экспериментальных данных, необходимых для обучения нейронных сетей (НС). В ходе экспериментальных исследований [1, 2] была разработана и апробирована методика сбора информации.

В дальнейшем был проведен сравнительный анализ подтвердивший преимущество нейросетевых моделей над математическими. На экспериментальных данных НС на основе многослойного персептрона (архитектуры от MLP 3-7-3 до MLP 11-22-3) была показана стабильная ошибка 1,8–10,8 %. Линейные модели были неточны, а нелинейные конкурировали с НС только при малом числе факторов. Эта стабильность и точность нейросетей в многофакторных задачах стала ключевым основанием для их выбора в качестве вычислительного инструмента.

В работе [3] предложена стандартизированная методика механической регулировки и точного измерения РЗ с использованием индикаторных головок и САД-системы КОМПАС. Это позволило выработать общий подход к экспериментальному определению входного параметра РЗ.

Проведенные исследования подтвердили способность нейросети к экстраполяции [4]. Было показано, что нейросетевая модель может предсказывать поведение ШУ за пределами экспериментальных данных, что крайне ценно для проектирования.

На завершающем этапе требовалось учесть геометрические особенности ШУ. При помощи метода конечных элементов (ANSYS Workbench) выявлены наиболее значимые факторы, влияние которых отражено в качестве дополнительных входных параметров НС (толщина стенки, высота центров, диаметр основной расточки).

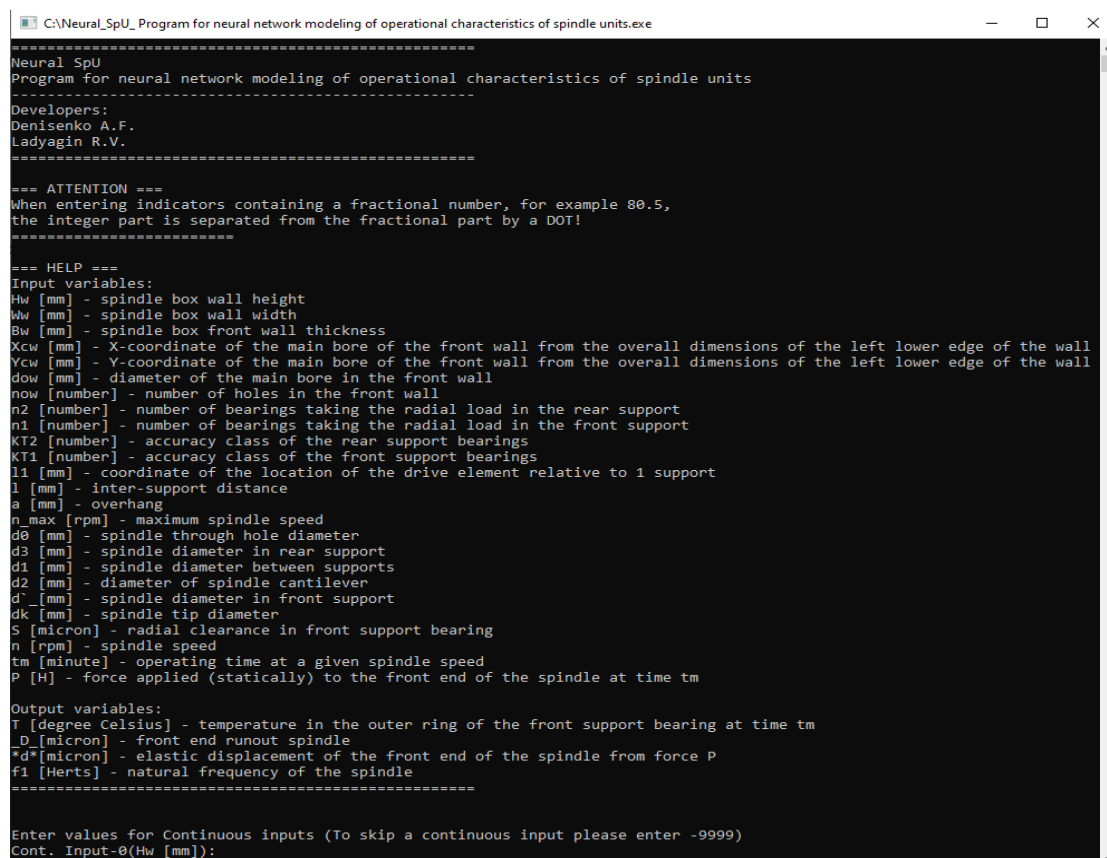
Аналитическими методами были получены данные для:

– упругих смещений переднего конца шпинделя по формулам для схемы «разгруженного» (от сил привода) шпинделя;

- динамических характеристик (изгибные частоты) с учетом эквивалентной жесткости опор, шпинделя и его массы;
- теплового состояния ШУ, которое определялось по основным источникам тепловыделения – подшипникам качения по ГОСТ 32305–2013.

Проведенные исследования – от первоначального сбора экспериментальных данных и выбора архитектуры нейросети до интеграции параметров, полученных аналитическими и численными методами, внесли вклад в создание инструмента проектировщика – программы нейросетевого моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов «Neural SpU» [5].

На рис. 1 показан вид программы. В первых строчках содержится информация о программе и справка с легендой входных и выходных переменных (HELP).



```

C:\Neural_SpU_Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Neural SpU
Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units
-----
Developers:
Denisenko A.F.
Ladyagin R.V.
-----

=== ATTENTION ===
When entering indicators containing a fractional number, for example 80.5,
the integer part is separated from the fractional part by a DOT!
=====

=== HELP ===
Input variables:
Hw [mm] - spindle box wall height
Ww [mm] - spindle box wall width
Bw [mm] - spindle box front wall thickness
Xcw [mm] - X-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
Ycw [mm] - Y-coordinate of the main bore of the front wall from the overall dimensions of the left lower edge of the wall
dow [mm] - diameter of the main bore in the front wall
now [number] - number of holes in the front wall
n2 [number] - number of bearings taking the radial load in the rear support
n1 [number] - number of bearings taking the radial load in the front support
KT2 [number] - accuracy class of the rear support bearings
KT1 [number] - accuracy class of the front support bearings
l1 [mm] - coordinate of the location of the drive element relative to 1 support
l [mm] - inter-support distance
a [mm] - overhang
n_max [rpm] - maximum spindle speed
d0 [mm] - spindle through hole diameter
d3 [mm] - spindle diameter in rear support
d1 [mm] - spindle diameter between supports
d2 [mm] - diameter of spindle cantilever
d_ [mm] - spindle diameter in front support
dk [mm] - spindle tip diameter
S [micron] - radial clearance in front support bearing
n [rpm] - spindle speed
tm [minute] - operating time at a given spindle speed
P [H] - force applied (statically) to the front end of the spindle at time tm

Output variables:
T [degree Celsius] - temperature in the outer ring of the front support bearing at time tm
D [micron] - front end runout spindle
*d [micron] - elastic displacement of the front end of the spindle from force P
f1 [Hertz] - natural frequency of the spindle
=====

Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]):

```

Рис. 1. Вид начальной части программы

На рис. 2 показан пример работы программы (прогноз) для ШУ с диаметром в передней опоре 80 мм, радиальными коническими подшипниками 4 класса точности (передняя и задняя опоры), статически приложенной нагрузкой в 3000Н после времени работы 60 минут на частоте 2000 об/мин (остальные входные значения см. рис. 2).

```
C:\Neural_SpU_Program for neural network modeling of operational characteristics of spindle units.exe
Enter values for Continuous inputs (To skip a continuous input please enter -9999)
Cont. Input-0(Hw [mm]): 330
Cont. Input-1(Hw [mm]): 377
Cont. Input-2(Bw [mm]): 61
Cont. Input-3(Xcw [mm]): 247
Cont. Input-4(Ycw [mm]): 199
Cont. Input-5(dow [mm]): 140
Cont. Input-6(now [number]): 4
Cont. Input-7(n2 [number]): 1
Cont. Input-8(n1 [number]): 1
Cont. Input-9(KT2 [number]): 4
Cont. Input-10(KT1 [number]): 4
Cont. Input-11(l1 [mm]): 455
Cont. Input-12(l [mm]): 320
Cont. Input-13(a [mm]): 126
Cont. Input-14(n_max [rpm]): 2500
Cont. Input-15(d0 [mm]): 45
Cont. Input-16(d3 [mm]): 70
Cont. Input-17(d1 [mm]): 75
Cont. Input-18(d2 [mm]): 100
Cont. Input-19(d [mm]): 80
Cont. Input-20(dk [mm]): 170
Cont. Input-21(S [micron]): 1
Cont. Input-22(n [rpm]): 2000
Cont. Input-23(tm [minute]): 60
Cont. Input-24(P [H]): 3000

Predicted Output of T [degree Celsius] = 5.38223266488366e+001
Predicted Output of D [micron] = 1.81098233137329e+000
Predicted Output of *d* [micron] = 7.00542633324360e+000
Predicted Output of f1 [Hertz] = 4.82894764442195e+002
```

Рис. 2. Строчки ввода входных данных (Input) и вывод прогнозных значений (Output)

Из рис. 2 видно, что программа спрогнозировала значения эксплуатационных характеристик: 53,8 °С – температура в зоне наружного кольца подшипника передней опоры; 1,8 мкм – биение и 7 мкм – упругое смещение переднего конца шпинделя; 483 Гц – собственная частота шпинделя. Запись выходных значений программы представлена в виде экспоненциальной нотации.

Разработанная программа «Neural SpU» сочетает в себе точность нейросетевого моделирования, способного учитывать скрытые нелинейные зависимости, с гибкостью, позволяющей использовать разнообразные данные.

Программа снижает трудоемкость и расширяет возможности проектирования оптимальных конструкций шпиндельных узлов на этапе их разработки.

Список литературы

1. Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В. Якимов М. В. Получение экспериментальных данных для нейросетевой оценки эксплуатационных характеристик шпиндельного узла // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : сб. ст. VI Междунар. форум / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. СПб. : ГУАП, 2024. С. 425.
2. Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В. Настройки процесса построения и обучения нейросетей при решении задач по прогнозированию эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. 2025. № 6. С. 116–129.

3. Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В. Методика определения радиального зазора подшипника передней опоры шпиндельного узла для формирования входного слоя нейросети // Инновационные технологии в машиностроении : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. заоч. конф. Ульяновск, 2024. С. 231–236.

4. Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В. Нейросетевое прогнозирование эксплуатационных свойств шпиндельных узлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2024. № 2. С. 37–44.

5. А.с. 2025684072. Neural SpU Программа нейросетевого прогнозирования для расчета эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Федорович Денисенко

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения, станки
и инструменты», Самарский
государственный технический
университет (Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 144
e-mail: sammortor@yandex.ru

Alexander F. Denisenko

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
mechanical engineering, machine tools,
and instruments, Samara State
Technical University
(144 Molodogvardeyskaya street,
Samara, Russia)

Роман Владимирович Ладягин

аспирант, Самарский
государственный технический
университет (Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 144)
e-mail: ladoshman@yandex.ru

Roman V. Ladyagin

Postgraduate student, Samara State
Technical University
(144 Molodogvardeyskaya street,
Samara, Russia)

УДК 621.9.047/048

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ИЛИ КАЛИБРОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Владислав Витальевич Крылов¹,
Николай Валерьевич Бекренёв²**

^{1,2}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Аннотация. Рассматриваются результаты исследований влияния величины и отклонения частоты выходного напряжения ультразвукового генератора от резонанса с собственной частотой ультразвукового преобразователя на амплитуду колебаний присоединенного к нему инструмента-концентратора. На примере двух стандартных частот (22 и 44 кГц) определены диапазоны напряжений и отклонения частот,

при которых изменение амплитуды минимально. Показано, что прецизионные индуктивные датчики являются перспективным средством для измерения амплитуды и осуществления обратной связи преобразователя с генератором, что позволит создавать эффективное автоматизированное оборудование.

Ключевые слова: ультразвуковое станочное оборудование, ультразвуковая обработка материалов, измерение в реальном времени, индуктивный датчик микроперемещений

RATIONALE FOR USING INDUCTIVE MICRO-DISPLACEMENT SENSORS FOR SETTING UP OR CALIBRATING ULTRASONIC MACHINING EQUIPMENT

Vladislav V. Krylov¹, Nikolay V. Bekrenev²

^{1,2}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract. The paper examines the results of a study on the effect of the magnitude and deviation of the output voltage frequency of an ultrasonic generator from resonance with the natural frequency of the ultrasonic transducer on the oscillation amplitude of the attached concentrator tool. Using two standard frequencies (22 and 44 kHz) as examples, the ranges of voltages and frequency deviations where the amplitude change is minimal are determined. It is shown that precision inductive sensors are a promising tool for measuring the amplitude and providing feedback from the transducer to the generator, which will enable the creation of effective automated equipment.

Keywords: ultrasonic machining equipment, ultrasonic processing of materials, real-time measurement, inductive micro-displacement sensor

Введение

Ультразвуковое оборудование представляет собой современное технологическое решение, в котором высокочастотные колебания используются либо в качестве основного (обработка хрупких материалов, сварка, очистка и др.), либо вспомогательного (комбинированное резание) воздействия на обрабатываемый материал [1, 2].

Ключевым параметром, определяющим эффективность и стабильность работы ультразвуковой системы, является стабильность величины требуемой амплитуды колебаний рабочего инструмента. Максимальная амплитуда на торце инструмента достигается только при соблюдении условия резонанса, когда частота выходного напряжения генератора совпадает с собственной частотой ультразвуковой системы (УЗС) [3].

Для поддержания стабильной амплитуды в современных ультразвуковых генераторах применяются системы автоподстройки частоты (АПЧ) и амплитуды (АПА), поддерживающие резонансный режим по электрическим параметрам, снимаемым с пьезоэлектрического преобразователя. Однако данный метод контроля является косвенным и не учитывает изменение механического импеданса нагрузки на инструмент.

Целью данной работы является обоснование использования индуктивных датчиков микроперемещений для настройки ультразвукового оборудования, в том числе, в режиме реального времени в процессе обработки, а также их калибровки.

Методика и средства исследования

Для проведения исследований использовалось экспериментальное рабочее место в составе компьютера с программным обеспечением (ПО) LabView (ИП «Майоров», г. Орел), индукционного датчика микроперемещений Pepperl&Fuchs 3RG4012-3KB00-PF Artikel 123301, соединённого с компьютером при помощи аналогово-цифрового преобразователя, штатива для крепления датчика с регулировкой высоты, генератора высокочастотных электрических сигналов с программируемой опорной частотой (от 20 до 60 кГц) выходного напряжения, а также подключенного к нему пьезокерамического электромеханического преобразователя. Величина выходного напряжения генератора регулируется лабораторным автотрансформатором в диапазоне от 0 до 220 В, что обеспечивает изменение мощности выходного сигнала в диапазоне от 0 до 400 Вт. При помощи датчика и специализированного программного обеспечения LabView отслеживалось перемещение (амплитуда колебаний) торца инструмента-концентратора при заданном параметре частоты колебаний и напряжении.

На автотрансформаторе устанавливается значение выходного напряжения – 100 В. С ноутбука задается начальная частота напряжения генератора 21 кГц, после чего фиксируются показания датчика в виде графика зависимости амплитуды колебаний инструмента от времени. Затем частота последовательно повышается с шагом 10 Гц и на каждом шаге производится повторная запись графика. Процесс продолжается до достижения верхней границы диапазона 23 кГц. Аналогичная процедура повторяется для второго частотного диапазона – от 43 до 45 кГц.

Результаты исследований

Критериями отбора рациональной частоты УЗ колебаний по полученным графикам приняты: равномерность и стабильность синусоиды УЗ колебаний; отсутствие большого количества помех, сопровождающих основную синусоиду; максимальную высоту арки синусоиды графика, что соответствует максимальной амплитуде колебаний.

В ходе экспериментов в диапазоне частот от 21 до 23 кГц в УЗС были идентифицированы две резонансные частоты: 22120 Гц и 22180 Гц. На данных частотах зафиксирована максимальная амплитуда колебаний торца инструмента, а его отклонения соответствовали четко выраженной синусоидальной зависимости. На рис. 1,а,б показаны графики зависимости максимальных отклонений инструмента от времени при указанных значениях частоты колебаний.

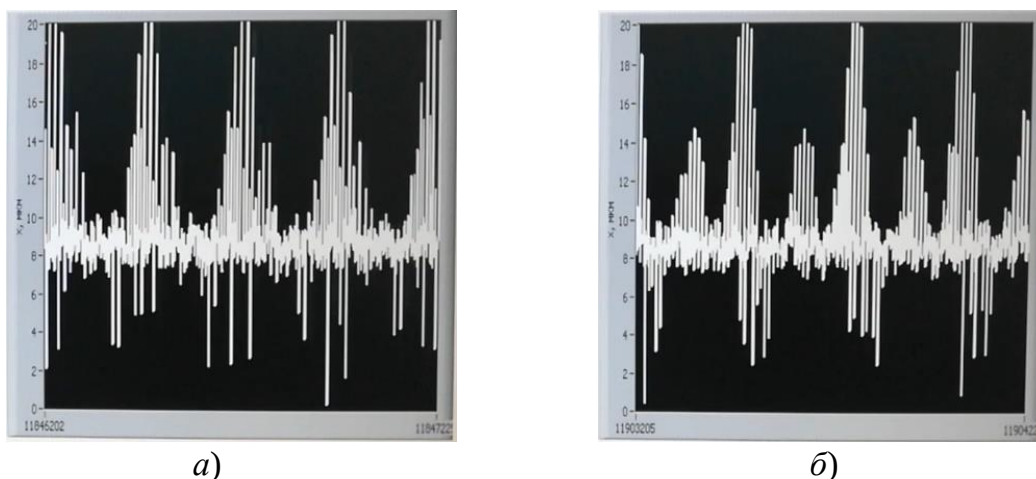


Рис. 1. График зависимости амплитуды колебаний инструмента от времени при частоте: а – 22120 Гц; б – 22180 Гц

Наблюдается устойчивое увеличение показаний датчика в диапазоне напряжений от 20 до 160 В. Изменение амплитуды смещения торца концентратора носит характер, близкий к синусоидальному закону, что соответствует теоретической картине напряжения, генерируемого задающим контуром генератора. Максимальное зафиксированное значение амплитуды составило 7–8 мкм.

В ходе экспериментов в диапазоне частот от 43 до 45 кГц в УЗ системе были выявлены две резонансные частоты: 44110 Гц и 44210 Гц. На рис. 2, а, б показаны графики зависимости амплитуды колебаний инструмента от времени при указанных значениях частоты колебаний.

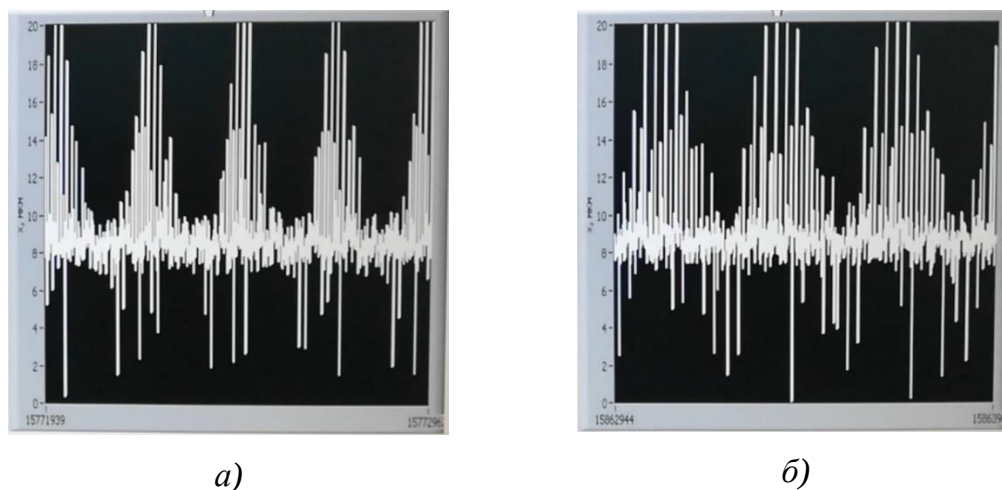


Рис. 2. График зависимости амплитуды колебаний инструмента от времени при частоте: а – 44110 Гц; б – 44210 Гц

Установлено, что в программном модуле LabView показания датчика отображаются с точностью до третьего знака после запятой в диалоговом окне. Такая точность достаточна для контроля и поддержания необходимой для большинства ультразвуковых технологических процессов

амплитуды колебаний инструмента в рабочей зоне. Следовательно, экспериментально подтверждена возможность применения бесконтактных индуктивных датчиков в комплексе со специализированным ПО для контроля амплитуды колебаний УЗ системы управления, что позволит их использовать в ультразвуковом технологическом оборудовании различной степени автоматизации. Ключевым преимуществом данного подхода является возможность использования простых и недорогих генераторов, не оснащенных системами автоматической подстройки частоты (АПЧ) и амплитуды (АПА). Управление такими генераторами может осуществляться по конечному параметру – амплитуде колебаний в рабочей зоне, что и обеспечивает требуемое качество обработки.

Заключение

Установлено, что применение индукционных датчиков в комплексе со специализированным ПО обеспечивает высокоточный контроль амплитуды колебаний инструмента в рабочей зоне и позволяет осуществлять мониторинг параметров технологического процесса непосредственно в рабочей зоне в режиме реального времени. Сигнал датчиков может быть использован для организации обратной связи с генератором, обеспечивая стабилизацию режима работы при случайном изменении условий в зоне обработки.

Продемонстрированную методику отслеживания амплитуды колебаний инструмента целесообразно применять в автоматизированном ультразвуковом оборудовании для размерной обработки и сварки.

Список литературы

1. Поляков З. И., Исаков В. М., Исаков Д. В., Шамин В. Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки : учеб. пособие для студентов-заочников. 2-е изд., перераб. и доп. Челябинск : ЮУрГУ, 2006. 89 с.
2. Захаров О. В., Бржозовский Б. М. Ультразвуковая обработка нежестко закрепленными инструментами : учеб. пособие по курсу «Процессы формообразования и инструменты» для студентов машиностр. специальностей. Саратов : СГТУ, 2002. 99.
3. Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Сливин А. Н. [и др.]. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в промышленности. Барнаул : АлтГТУ, 2010. 196 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Витальевич Крылов
аспирант, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)
e-mail: vlad.krylov2000@yandex.ru

Vladislav V. Krylov
Postgraduate student,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov
(77 Politechnicheskaya street,
Saratov, Russia)

Николай Валерьевич Бекренёв
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническая
механика и мехатроника»,
Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)
e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Nikolay V. Bekrenev
Doctor of technical sciences,
professor, professor of the department
of technical mechanics and
mechatronics, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov
(77 Politechnicheskaya street,
Saratov, Russia)

УДК 621.454.2

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

**Владимир Александрович Скрыбин¹,
Сергей Алексеевич Гусев²**

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы модернизации кинематической схемы притирочно-доводочного станка с ЧПУ с целью обеспечения заданного качества обработки уплотнительных деталей запорной арматуры. Показано, что совершенствование технологии обработки деталей возможно путем модернизации и кинематики станка.

Ключевые слова: модернизация станка, кинематическая схема, совершенствование технологии обработки

FEATURES OF THE KINEMATIC SCHEME OF ABRASIVE FINISHING OF THE SEAL SURFACES OF THE FLOW REGULATOR

Vladimir A. Scriabin¹, Sergey A. Gusev²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article discusses the issues of modernization of the kinematic scheme of the lapping and honing CNC machine in order to ensure the specified quality of processing

of sealing parts of the shut-off valves. It is shown that the improvement of the technology of processing parts is possible by modernizing the kinematics of the machine.

Keywords: machine upgrade, kinematic diagram, improvement of processing technology

Актуальность проблемы обусловлена жесткими требованиями к герметичности запорной арматуры (задвижек, клапанов), работающей в условиях высоких давлений и агрессивных сред. Ключевым фактором, определяющим герметичность затвора, является качество обработки его уплотнительных поверхностей. Низкое качество поверхности (высокая шероховатость, отклонение от плоскостности) приводит к неудовлетворительному прилеганию поверхностей, протечкам рабочей среды, снижению ресурса оборудования и риску аварийных ситуаций. Таким образом, разработка высокоэффективных методов финишной обработки, таких как абразивная доводка, является критически важной для обеспечения надежности и безопасности промышленных систем.

В статье рассмотрена возможность изменения имеющейся конструкции станка переносного для шлифования и притирки корпусов клиновых задвижек, в частности изменение конструкции инструментального блока (рис. 1).



Рис. 1. Модернизация конструкция инструментального блока притирочно- доводочного станка

Для того, чтобы связать скорость, устанавливаемую на приводе, со скоростью вращения инструментов (притиров) предлагается ввести косозубую планетарную зубчатую передачу. Солнечное колесо, закрепленное к механизму привода, неподвижно. Вращение передается

водителю, на котором закреплены шестерни, обкатывающие солнечное колесо. К шестерням, установленным на водиле, крепятся инструментальные головки (притиры). Скорость, задаваемая на приводе, передается через механизм привода водилу. Шестерни, обкатывая солнечное колесо, приводят во вращение инструментальные головки, и обеспечивают постоянство вращения инструментальных головок вокруг своей оси, что позволяет говорить о стабильности протекания процесса доводки уплотнительной поверхности. Величина скорости вращения инструментальных головок будет рассчитываться из скорости, задаваемой на приводе и передаточного отношения планетарной передачи [1–4].

Схема (рис. 2) представляет собой планетарный механизм с неподвижным центральным (солнечным) колесом. Водило, на котором установлены три сателлитные шестерни (сателлиты) 1 с закрепленным на них инструментом (притиром), вращается вокруг оси солнечного колеса 2. Сателлиты обкатываются по неподвижному солнечному колесу, сообщая инструменту сложное движение: переносное (вращение вместе с водилом) и относительное (вращение вокруг собственной оси).

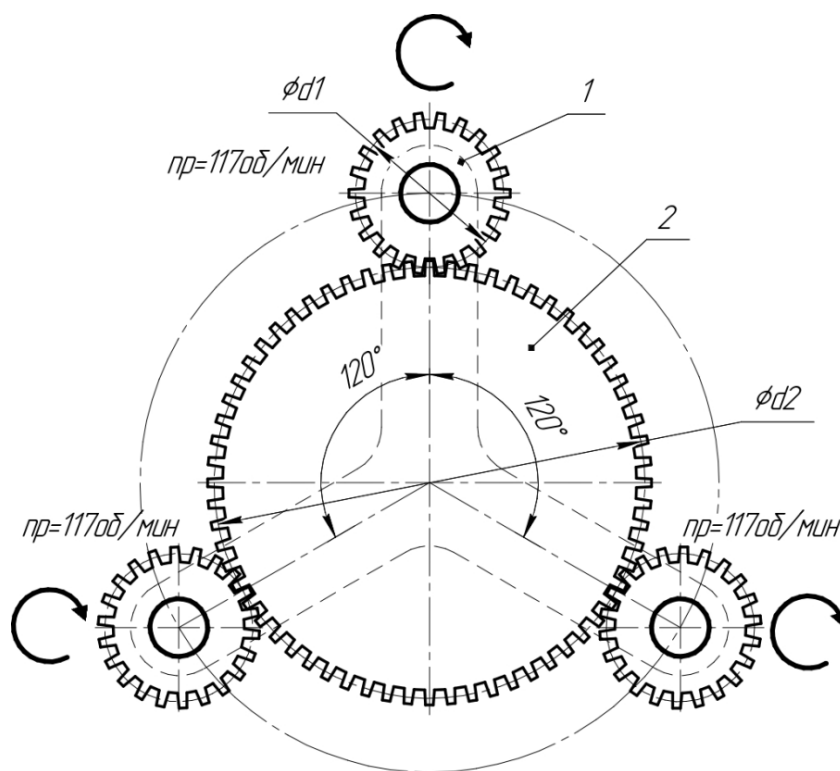


Рис. 2. Кинематическая схема притирочно-доводочного станка

Схема представляет собой планетарный механизм с неподвижным центральным (солнечным) колесом 2. Водило, на котором установлены три сателлитные шестерни (сателлиты) 1 с закрепленным на

них инструментом (притиром), вращается вокруг оси солнечного колеса. Сателлиты обкатываются по неподвижному солнечному колесу, сообщая инструменту сложное движение: переносное (вращение вместе с водилом) и относительное (вращение вокруг собственной оси).

Используем метод Виллиса для планетарных механизмов. Формула Виллиса связывает угловые скорости звеньев по соотношению:

$$(n_p - n_h) / (n_s - n_h) = -Z_s / Z_p, \quad (1)$$

где: n_p – частота вращения сателлита (инструмента) [об/мин]; n_s – частота вращения солнечного колеса [об/мин]; n_h – частота вращения водила [об/мин]; Z_s – число зубьев солнечного колеса; Z_p – число зубьев сателлита (инструмента).

В конструкции станка солнечное колесо неподвижно ($n_s = 0$). Преобразуем формулу (1):

$$(n_p - n_h) / (0 - n_h) = -Z_s / Z_p;$$

$$(n_p - n_h) / (-n_h) = -Z_s / Z_p;$$

После дальнейших преобразований получаем основную расчетную формулу:

$$n_p / n_h = 1 + Z_s / Z_p. \quad (2)$$

Передаточное отношение от водила к сателлиту (инструменту) определяется зависимостью следующего вида:

$$u\{h-p\} = n_p / n_h = 1 + Z_s / Z_p. \quad (3)$$

Подставляя заданные числа зубьев, определяем частоту вращения инструментов.

Список литературы

1. ГОСТ 8–82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность.
2. Скрыбин В. А., Павлова Ж. В. Модернизация переносного станка для шлифования и притирки уплотнительных поверхностей затворов задвижек трубопроводной арматуры. Ремонт, восстановление, модернизация // Наука и технологии. 2015. № 2. С. 8–13.
3. Схиртладзе А. Г., Скрыбин В. А., Борискин В. П. [и др.]. Технологическое оборудование машиностроительных производств. Старый Оскол : ТНТ, 2013. 548 с.
4. Схиртладзе А. Г., Скрыбин В. А., Борискин В. П. Ремонт технологических машин и оборудования. Старый Оскол : ТНТ, 2011. 432 с.

Информация об авторах / Information about the authors

**Владимир Александрович
Скрябин**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: vs_51@list.ru

Vladimir A. Scriabin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Алексеевич Гусев

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40).
e-mail: sergeygusev020701@gmail.com

Sergey A. Gusev

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК621.9.06-112.6

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР КОМПОНОВКИ АГРЕГАТНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКЕ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

**Александр Сергеевич Далечин¹,
Александр Николаевич Феофанов²**

^{1,2}Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается вопрос формализации процесса создания компоновок агрегатных станков на ранних стадиях проектирования. Выполнен анализ существующих решений к подготовке компоновок металлообрабатывающего технологического оборудования. С помощью интеллект-карт подготовлено описание характеристических параметров обрабатываемой заготовки, технологического процесса изготовления детали и их связь с размерами узлов агрегатного станка. Указана роль данной работы в дальнейшей разработке автоматизированной системы создания компоновок агрегатных станков.

Ключевые слова: автоматизированная система, агрегатный станок, интеллект-карта, автоматизация, эскизный проект

AN APPROACH TO THE AUTOMATED SELECTION OF A TRANSFER MACHINE TOOL LAYOUT BASED ON WORKPIECE DATA AT THE PRELIMINARY DESIGN STAGE

Alexander Sergeevich Dalechin¹,
Alexander Nikolaevich Feofanov²

^{1,2}Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Россия

Abstract. This paper addresses the issue of formalizing the process of creating layouts for transfer machine tools in the draft stages of design. An analysis of existing solutions for preparing layouts of metalworking technological equipment is carried out. Using mind maps, a description of the characteristic parameters of the workpiece, the technological process of part manufacturing, and their relationship with the dimensions of the transfer machine tool units has been prepared. The role of this work in the further development of an automated system for creating transfer machine tool layouts is indicated.

Keywords: automated system, transfer machine tool, mind map, automation, sketch design

Конкурентоспособность отечественного машиностроения напрямую зависит от способности производителей металлорежущих станков повышать производительность, модернизировать структуру и расширять линейку выпускаемой ими продукции. Эти задачи не менее значимы и для агрегатных станков (АС) – специализированного оборудования для крупносерийного и массового производства, отличающегося модульной структурой. АС используются на предприятиях автомобильной промышленности, производствах трубопроводных изделий, скобяных изделий и т.д. по всему миру.

Связь модульной структуры агрегатного станка с параметрами технологического процесса изготовления детали в своих работах рассматривал ряд авторов [1–5]. Установление компоновки металлорежущего станка как самостоятельного объекта изучения, наиболее полно отражающего главные показатели проектируемого оборудования, является одним из ключевых вопросов в работе Ю. Д. Врагова [1]. Введением кода, состоящего из семи символов, для типизации и структуризации компоновок металлорежущих станков занимался М. Ю. Лехмус в диссертации [2]. Исследованию взаимосвязи множества структур АС с технологическим процессом изготовления детали для целесообразного выбора компоновки АС при минимальных издержках посвящена работа [4] Л. В. Перегудова. Разработка критериев поиска и выбор рациональных компоновок АС при автоматизированном процессе проектирования станка были рассмотрены в работе [5] Я. М. Гельштейна.

В диссертации [6] выполнено исследование по изучению использования модульного принципа проектирования станков с ЧПУ в мелкосерийном типе производства.

Однако подходы по автоматизированному выбору компоновок АС по параметрам обрабатываемой заготовки изучены не в полной мере, в данной работе предлагается расширить существующие решения автоматизированного проектирования АС для снижения трудоемкости конструкторских работ.

На рис. 1 представлена интеллект-карта (ментальная карта) взаимосвязей характеристических параметров обрабатываемой заготовки и компоновки АС.

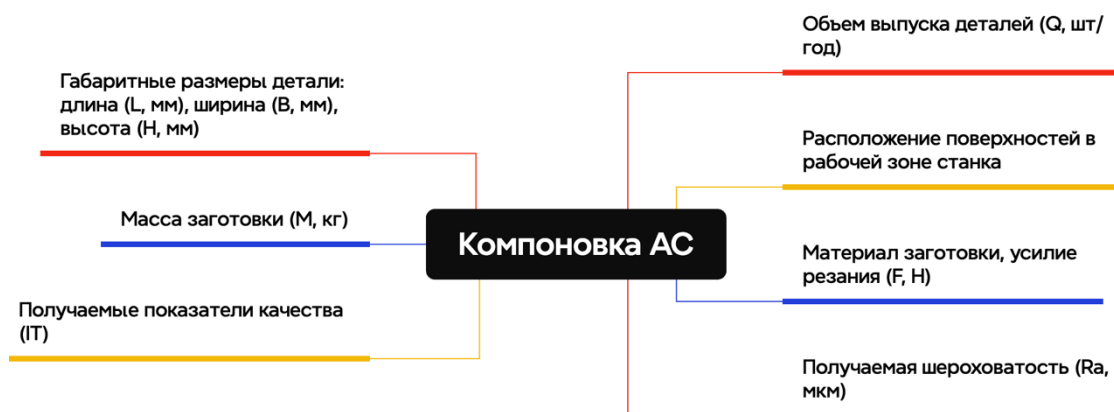


Рис. 1. Взаимосвязь характеристических параметров заготовки и компоновки АС

Компоновка АС создается, исходя из требований к серийности производства, так как для разных типов производства используются разные подходы к построению технологических процессов. Материал заготовки определяет требуемое усилие резания, которое устанавливает перечень узлов резания АС. Габаритные размеры детали устанавливают требования к основным несущим узлам АС (средней станине, поворотному столу и боковым станинам). Масса устанавливаемых заготовок влияет на выбор средней станины и поворотного делительного стола для соблюдения требований по грузоподъемности узлов. Унифицированные узлы АС существуют только в классах точности «Н» и «П», что не позволяет обрабатывать на готовых станках особо точные детали, поэтому требования к качеству и точности не определяют компоновку АС.

Для пояснения процедуры установления связей между характеристиками обрабатываемой заготовки и размерами узлов АС при

автоматизированном создании компоновок, представлена интеллект-карта, рис. 2.

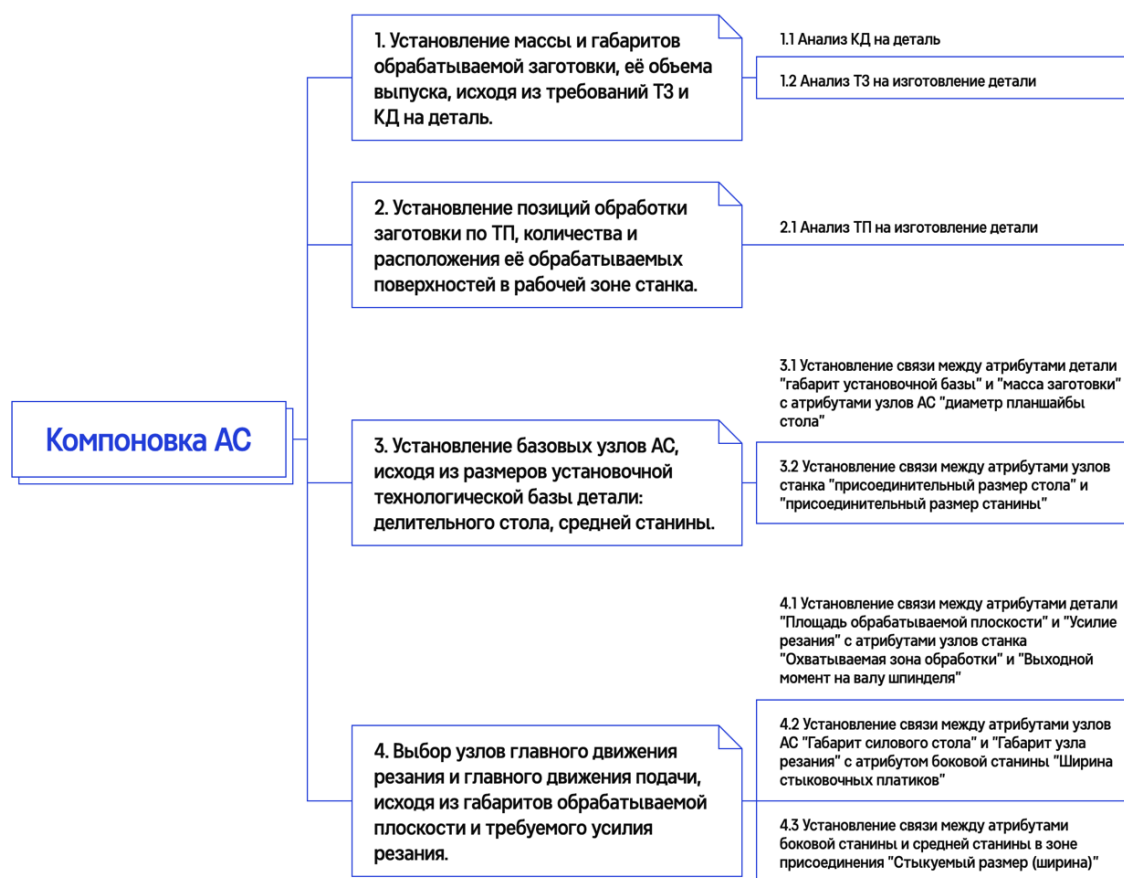


Рис. 2. Интеллект-карта, поясняющая процедуру установления связей между параметрами заготовки и размерами узлов АС

По предложенной карте, прежде всего, выполняется установление массо-габаритных параметров заготовки, объема выпуска, на основе требований технического задания (ТЗ) и конструкторской документации (КД). Затем осуществляется проработка технологического процесса изготовления изделия, определяются обрабатываемые поверхности, их количество и расположение в рабочей зоне станка. Далее выбираются центральные узлы АС – поворотный делительный стол и средняя станина. Выполняется наложение зависимостей между габаритом установочной технологической базой детали, её массой и размером планшайбы делительного стола. Между присоединительным размером стола и средней станины также накладываются зависимости. На последней стадии происходит выбор узлов резания, силовых столов и базовых элементов АС. Устанавливаются связи и накладываются зависимости между размерами обрабатываемой плоскости, усилием резания и размерами узла резания. Настраиваются зависимости на

присоединительные размеры узла резания, силового стола и боковой станины.

Выбор компоновок АС по параметрам обрабатываемой заготовки, рассмотренных в настоящей статье, призван снизить трудоемкость конструкторских работ на стадии технического предложения и эскизного проекта. Предложенные связи и зависимости между характеристиками детали и размерами узлов АС являются основой для дальнейшей разработки автоматизированной системы.

Список литературы

1. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков (Основы компонетики). М. : Машиностроение, 1978. 208 с.
2. Лехмус М. Ю. Автоматизированный синтез компоновок металлорежущих станков : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. М., 1992. 120 с.
3. Перегудов Л. В. Основы теории синтеза структурных компоновок агрегатных станков : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01. Ташкент, 1989. 409 с.
4. Гельштейн Я. М. Повышение эффективности проектирования компоновок агрегатированных многооперационных станков : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. М., 1984. 368 с.
5. Крылова А. А. Исследование и разработка модульного технологического оборудования для единичного и мелкосерийного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14. СПб., 2021. 309 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Далечин
аспирант, Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3А)
e-mail: dalechin.as.99@gmail.com

Alexander S. Dalechin
Postgraduate student, Moscow State
Technological University "Stankin"
(3A Vadkovsky lane, Moscow,
Russia)

Александр Николаевич Феофанов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерная
графика», Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3А)
e-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Alexander N. Feofanov
Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of engineering graphics,
Moscow State Technological
University "Stankin" (3A Vadkovsky
lane, Moscow, Russia)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ 3D-ПРИНТЕРА

**Виктор Евгеньевич Овсянников¹,
Арсений Сергеевич Губенко²,
Дмитрий Евгеньевич Писарев³**

^{1,2,3}Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы использования метода конечных элементов для моделирования колебаний, которые возникают в печатающей системе под воздействием усилия экструзии. Рассматриваемая технология печати основана на подаче расплавленной проволоки через сопло (FFF-печать). В качестве инструментального средства использован пакет Ansys. Разработана трехмерная модель принтера, разработана схема закрепления и нагрузок. Определены параметры возмущающей силы, которые вызывают возникновение резонансных явлений в печатающей системе, которые вызывают ухудшение точности и качества поверхности получаемых изделий. Адекватность полученных результатов оценивается при помощи экспериментальных исследований, которые были проведены с использованием датчика виброускорений. В результате подтверждено качественное совпадение данных, что в свою очередь показывает применимость предложенной модели на практике.

Ключевые слова: печать, колебания, метод конечных элементов, резонанс

APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD FOR INVESTIGATION OF OSCILLATIONS OF PRINTER 3D ELEMENTS

**Victor E. Ovsyannikov¹, Arseniy S. Gubenko²,
Dmitry E. Pisarev³**

^{1,2,3}Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Abstract. This article discusses the use of the finite element method to simulate vibrations that occur in the printing system under the influence of extrusion force. The printing technology in question is based on feeding molten wire through a nozzle (FFF printing). The Ansys package was used as a tool. A three-dimensional model of the printer has been developed, a scheme of fastening and loads has been developed. Parameters of disturbing force are determined, which cause resonance phenomena in printing system, which cause deterioration of accuracy and quality of surface of produced products. The adequacy of the obtained results is evaluated using experimental studies that were carried out using

a vibration acceleration sensor. As a result, a qualitative coincidence of the data was confirmed, which in turn shows the applicability of the proposed model in practice.

Keywords: printing, vibrations, finite element method, resonance

Изготовление изделий с использованием аддитивных технологий на сегодняшний день получает все большее распространение в промышленной практике. Однако на сегодняшний день имеется ряд обстоятельств, которые препятствуют более широкому распространению в промышленности указанной выше технологии. Одним из них является недостаточная изученность влияния технологических режимов печати на технологическую систему, в частности на характер колебательных процессов и возникающие при этом резонансные явления.

Для традиционного технологического оборудования данные вопросы были исследованы достаточно подробно, в частности в работах [1–5] и др. В данной статье рассматривается вопрос моделирования и анализа колебаний печатающей головки принтера при изготовлении изделий с использованием расплавленной полимерной нити. При расчетах можно рассматривать технологическую систему (принтер) как содержащую два комплекта опор:

- траверсу, на которой располагается печатающая головка;
- вертикальные направляющие, по которым траверса передвигается вместе с печатающей головкой.

Расчетную схему можно представить в виде, который приведен на рис. 1.

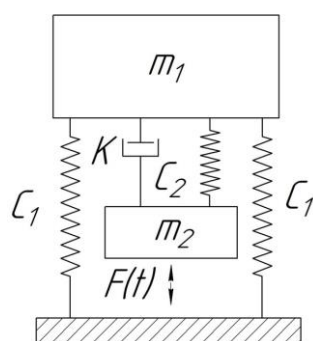


Рис. 1. Расчетная схема модели колебательных процессов

Для того, чтобы получить реализацию искомого колебательного процесса печатающей головки (m_2) можно составить систему дифференциальных уравнений, затем решить ее с несколькими значениями частоты действия возмущающей силы ($F(t)$) и выявить резонансные явления. Однако данный подход имеет определенные недостатки, основным из которых является необходимость определения для каждой конструкции принтера параметров жесткости и упругости элементов.

Для того, чтобы преодолеть данное негативное обстоятельство, можно использовать метод конечных элементов, который позволяет непосредственно в процессе проектирования (разработки конструкторской документации) на принтер определять параметры жесткости системы на основе применения трехмерной модели [6]. Если использовать развитую систему моделирования, например, программный пакет Ansys, можно также и предварительно оценить картину возникающих колебаний.

На рис. 2 приведена расчетная схема в среде Ansys.

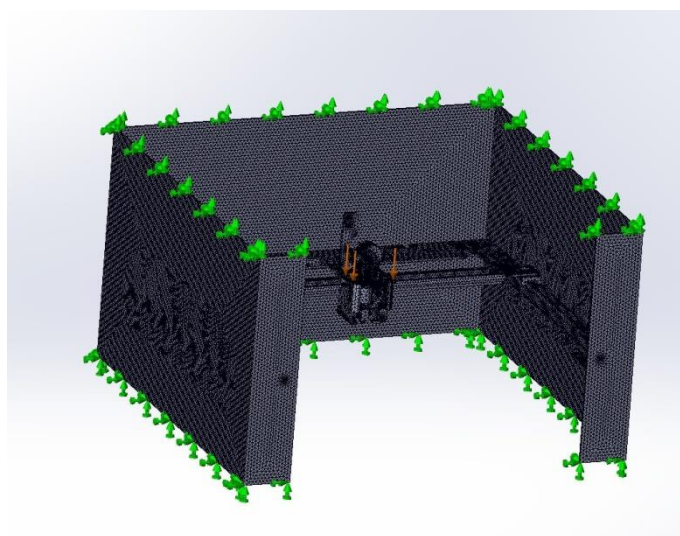


Рис. 2. Расчетная схема в программной среде Ansys

К расчетной схеме были приложены возмущающие нагрузки и расчеты проводились с различной частотой действия силы возмущения, пример результата расчета представлен на рис. 3.

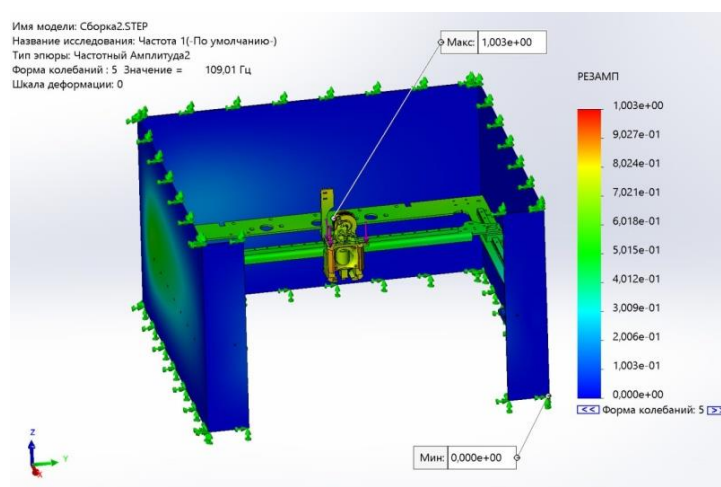


Рис. 3. Пример результата расчета в программной среде Ansys

В результате выполненных расчетов с использованием метода конечных элементов, было установлено, что наибольшая величина амплитуды при резонансе возникает тогда, когда частота возмущающей силы находится в пределах от 105 до 115 Гц.

Обоснованность полученных результатов подтверждается тем, что они имеют качественное соответствие результатам экспериментальных исследований, которые были проведены авторами в работах [7, 8]. В данном случае исследования колебаний выполнялись с использованием датчиков и последующем частотном анализе сигналов. Пример результатов исследований приведен на рис. 4.

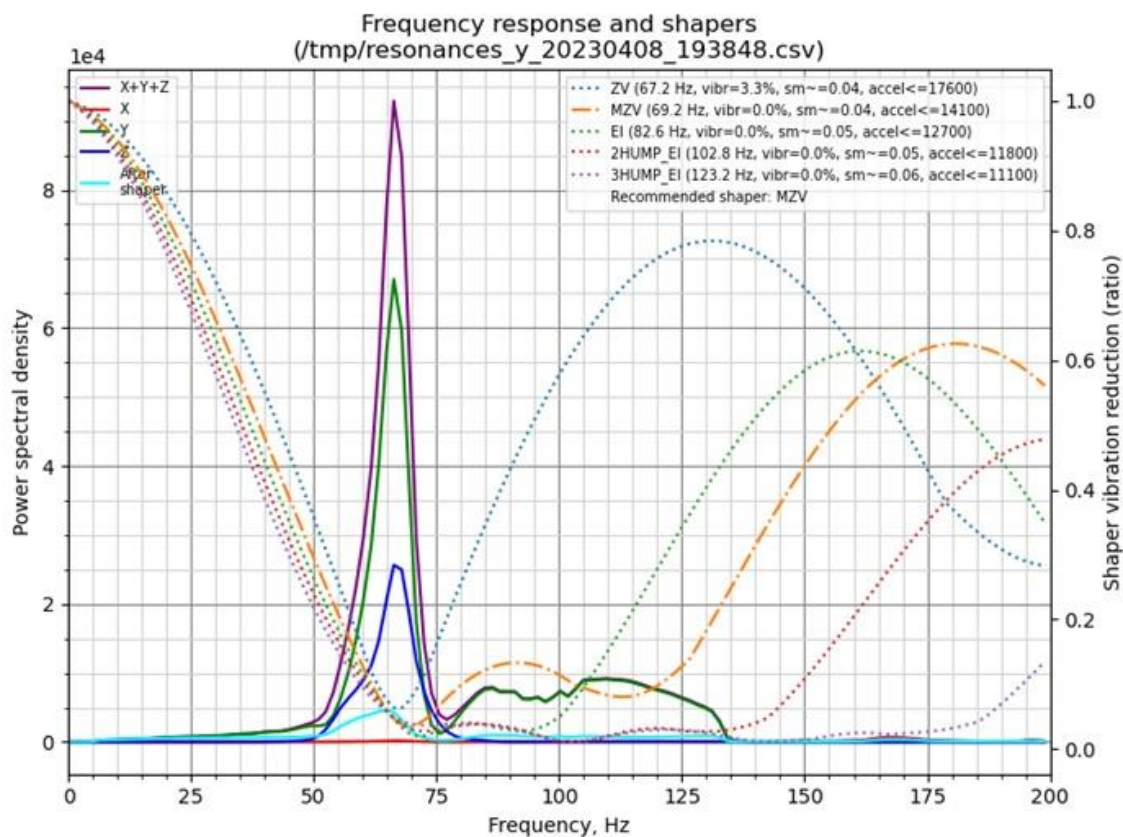


Рис. 4. Результаты экспериментов

Вывод. В результате проведенных исследований было установлено, что использование метода конечных элементов позволяет получать модели колебательных процессов при изготовлении изделий методами аддитивных технологий. Данные модели могут использоваться на стадии проектирования оборудования с целью формирования рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

Список литературы

1. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Бржовский Б. М. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков. Саратов, 1994. Ч. 2. 154 с.
3. Давыдов В. М., Кабалдин Ю. Г. Концептуальное проектирование мехатронных модулей механообработки. Владивосток : Дальнаука, 2003.
4. Заковоротный В. Л., Флек М. Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов н/Д. : Терра, 2006. 880 с. EDN: QNBIPL
5. Тугенгольд А. К., Лукьянов Е. А. Интеллектуальное управление мехатронными технологическими системами. Ростов н/Д. : Изд. центр ДГТУ, 2004. 116 с. EDN: QNAYOR
6. Решение контактных задач в ANSYS 6.1. Представительство CADFEM. М., 2003.
7. Стариков А. И., Губенко А. С., Пермяков М. А. [и др.] Некоторые аспекты повышения качества изделий, получаемых методом аддитивных технологий // Архитектура, строительство, транспорт. 2024. № 3 (109). С. 111–119. doi: 10.31660/2782-232X-2024-3-111-119 EDN: KKZFVQ
8. Губенко А. С., Мамадалиев Р. А. Методы определения вибрационного профиля 3d-принтера с целью повышения качества поверхностного слоя // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. имени Д. И. Менделеева, посвящ. 60-летию ТИУ : в 3 т. (г. Тюмень, 21–23 ноября 2024 г.). Тюмень : Тюменский индустриальный ун-т, 2025. С. 214–217. EDN: YWEJNE

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Евгеньевич Овсянников

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология
машиностроения», Тюменский
индустриальный университет (Россия,
г. Тюмень, ул. Володарского, 38)
e-mail: vik9800@mail.ru

Victor E. Ovsyannikov

Doctor of technical sciences, associate
professor, professor of the department
of mechanical engineering, Tyumen
Industrial University (38 Volodarsky
street, Tyumen, Russia)

Арсений Сергеевич Губенко

аспирант, Тюменский
индустриальный университет (Россия,
г. Тюмень, ул. Володарского, 38)
e-mail: gubenkoas@tyuiu.ru

Arseniy S. Gubenko

Postgraduate student, Tyumen
Industrial University (38 Volodarsky
street, Tyumen, Russia)

Дмитрий Евгеньевич Писарев

аспирант, Тюменский
индустриальный университет (Россия,
г. Тюмень, ул. Володарского, 38)
e-mail: pisarevde@tyuiu.ru

Dmitry E. Pisarev

Postgraduate student, Tyumen
Industrial University (38 Volodarsky
street, Tyumen, Russia)

СТЕНД ДЛЯ ОБКАТКИ И ДИАГНОСТИКИ МОДУЛЬНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

**Александр Владимирович Хандожко¹,
Виктор Александрович Хандожко²,
Андрей Николаевич Щербаков³,
Владимир Васильевич Капустин⁴**

^{1,2,3,4}Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия

Аннотация. Изложены материалы по выполнению обкатки и диагностики модульных шпиндельных узлов. Приведены результаты разработки и использования компьютеризированного стенда, обеспечивающего контроль температурных и вибрационных характеристик шпинделей после ремонта и замены подшипников качения. **Ключевые слова:** модульные шпиндели металлорежущих станков, контроль и диагностика температур и вибраций, испытание шпиндельных узлов

STAND FOR RUNNING-IN AND DIAGNOSTICS OF MODULAR SPINDLE UNITS

**Alexander V. Khandozhko¹, Viktor A. Khandozhko²,
Andrey N. Shcherbakov³, Vladimir V. Kapustin⁴**

^{1,2,3,4}Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract. The article presents materials on the run-in and diagnostics of modular spindle units. It also presents the results of the development and use of a computerized stand that provides control of the temperature and vibration characteristics of spindles after repair and replacement of rolling bearings.

Keywords: modular spindles of metal-cutting machines, control and diagnostics of temperatures and vibrations, testing of spindle units

Эксплуатационные свойства металлорежущих станков в значительной мере определяются характеристиками шпиндельных узлов. Существующая тенденция по повышению скоростей резания усложняет обеспечение и сохранение этих характеристик. В частности, для фрезерных станков (в первую очередь для станков с ЧПУ) характерен рост частот вращения шпинделя (ЧВШ) до 20000 мин⁻¹. Шпиндели таких станков имеют опоры качения. При таких значениях ЧВШ и диаметрах подшипники работают в очень жестких условиях. Несмотря на

использование весьма совершенных и дорогостоящих подшипников (керамические шарики, специальные стали для колец, повышенная точность) ресурс шпиндельных узлов таких станков существенно меньше, чем у традиционных конструктивных решений.

Частично этот недостаток устраняется модульным подходом к созданию станка. Шпиндельный узел выполняется в виде модуля (рис. 1), который, при поломке, может быть заменен на аналогичный.



Рис. 1. Внешний вид комплектного шпиндельного узла (модуля)

Ремонт при таком подходе может выполняться без простоя станка. Статистика показывает, что в стране эксплуатируется несколько десятков тысяч станков с такими шпиндельными узлами и это число постоянно растет. При этом через 2–4 года двухсменной эксплуатации вероятность выхода из строя шпиндельного узла (модуля) резко возрастает. В связи с этим вопросы организации ремонта и обслуживания шпиндельных узлов становятся еще более актуальными. Техническое и методическое обеспечение технологии ремонта являются актуальной научно-технической задачей.

Следует отметить, что конструктивные решения подшипниковых опор, используемые для модульных шпинделей фрезерных станков с ЧПУ, аналогичны, применяемым ранее в нашей стране для шпинделей внутришлифовальных станков

Методики ремонта и регулировки таких шпинделей хорошо отработаны для шпинделей внутришлифовальных станков. Однако шпиндели фрезерных станков работают при существенно более высоких силах резания. Кроме того особенности конструкции, в частности наличие механизма зажима инструментов, усложняют обеспечение сбалансированности вращающихся частей. Достаточно сложные условия работы, высокие частоты вращения налагают еще более высокие

требования на подшипниковые узлы. Несоответствие заявленным характеристикам подшипников, ошибки монтажа, подбора преднатяга, типа смазки и др. могут стать причиной преждевременного выхода шпиндельного модуля из строя. Поэтому вопросы контроля и диагностики требуют полноценного метрологического обеспечения.

Большинство контрольных операций для отдельных деталей шпиндельного узла и комплектующих выполняются с использованием серийного оснащения для контроля линейно-угловых размеров и взаимного расположения поверхностей. Для проведения динамической балансировки также имеет гамма оборудования, в том числе и отечественного производства. В меньшей мере такое оснащение имеется для обязательной операции обкатки шпинделя с мониторингом температур в подшипниковых опорах и виброхарактеристик.

В рамках решения этой задачи был спроектирован и изготовлен стенд для мониторинга тепловых и вибрационных характеристик шпинделя после замены подшипников (рис. 2).



Рис. 2. Конструкция испытательного стенда

Вращение шпинделю передается от асинхронного электродвигателя типа АИР, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, плоским ремнем. Частотное управление двигателя в сочетании со сменными шкивами позволяет обеспечивать практически весь требуемый диапазон регулирования (до 15000 мин^{-1}) ЧВШ.

Для контроля температуры создана специальная компьютеризированная система. В качестве датчиков использованы термосопротивления типа 100П ($W_{100} = 1,391$). Датчики с помощью магнитного держателя устанавливаются на корпус шпинделя. Для передачи информации на компьютер используется согласующее устройство ОВЕН 2ТРМ0 и преобразователь интерфейса USB to RS-485.

Ведущим устройством сети является компьютер, он опрашивает ведомые устройства 2ТРМ0 и 485 to analog signal (2-way). Кроме мониторинга температуры опор система имеет возможность управлять циклом обкатки. Например, производить обкатку согласно рекомендациям [1]: первая фаза на ЧВШ 50 % от максимальной 7 часов, вторая – на ЧВШ 70 % 7 часов и третья – на максимальной ЧВШ, 14 часов. В общем случае возможно задание произвольного количества фаз и длительностей циклов обкатки. Управление частотным преобразователем реализовано с помощью модуля аналогового вывода 485 to analog signal (2-way) с сигналом 4–20 мА. Данные с датчиков передаются по промышленной сети RS-485 по протоколу Modbus RTU.

Результаты измерения отображаются в режиме реального времени на дисплее (рис. 3), после завершения измерения могут быть сохранены в формате Excel.

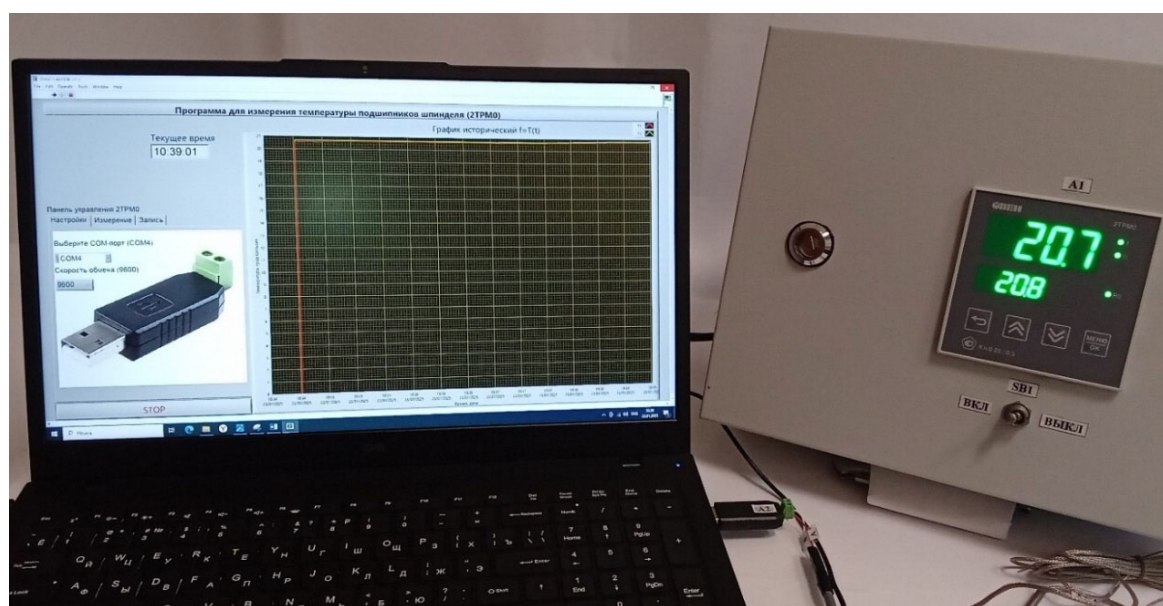


Рис. 3. Система измерения температуры шпиндельных опор

Измерения вибрационных характеристик производится с помощью вибрметра Диана-2М и прилагаемого к нему программного обеспечения (рис. 4). Эти характеристики позволяют судить о возможных дефектах подшипников, ошибках монтажа и др. [2].

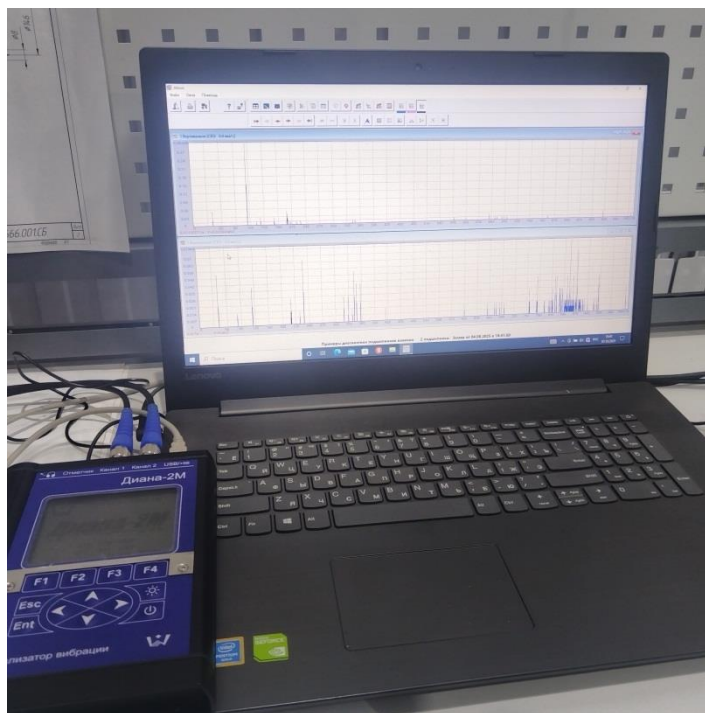


Рис. 4. Система контроля вибрационных характеристик шпиндельного модуля

Пьезоэлектрические датчики на магнитных держателях устанавливаются максимально близко к шпиндельным опорам (рис. 2).

Температура шпиндельных опор измеряется непрерывно через заданные интервалы времени. Вибрационные характеристики оцениваются периодически через определенные интервалы времени. Программное обеспечение (модуль «Атлант») позволяет получать эти характеристики в различной форме, в том числе в виде АХЧ.

Установочные элементы станда монтируются на базовой плите, имеющей систему т-образных пазов, что повышает универсальность конструкции и расширяет номенклатуру шпиндельных модулей, которые можно обкатывать и диагностировать.

Эксплуатация станда показала, что созданное оборудование позволяет фиксировать различные ошибки монтажа и дефекты деталей. Совместный анализ кривой изменения температуры, АХЧ и динамики её изменения, в частности, позволяет диагностировать чрезмерный преднатяг подшипников, их дефекты, определить момент завершения обкатки.

Список литературы

1. РТМ 23.4.57-74. Ремонт шпиндельных головок алмазно-расточных и внутришлифовальных станков. Волгоград : ГПКТБ, 1974. 76 с.

2. Фигатнер А. М., Фискин Е. А., Бондарь С. Е. Конструкция, расчет и методы проверки шпиндельных узлов с опорами качения : метод. указания. М. : ЭНИМС, 1970. 82 с.

Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Владимирович
Хандожко**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры
«Металлорежущие станки
и инструменты», Брянский
государственный технический
университет (Россия, г. Брянск,
бульвар 50-лет Октября, 7)
e-mail: chandosh@yandex.ru

Alexander V. Khandozhko

Doctor of technical sciences, associate
professor, professor of the department
of metal-cutting machines and tools,
Bryansk State Technical University
(7 50-Let Oktyabrya boulevard,
Bryansk, Russia)

Виктор Александрович Хандожко

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Автоматизированные технологические
системы», Брянский государственный
технический университет (Россия,
г. Брянск, бульвар 50-лет Октября, 7)
e-mail: vichandozhko@gmail.com

Viktor A. Khandozhko

Candidate of technical sciences,
associate professor, head
of the department of automated
technological systems, Bryansk State
Technical University (7 50-Let
Oktyabrya boulevard, Bryansk,
Russia)

Андрей Николаевич Щербаков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Металлорежущие станки
и инструменты», Брянский
государственный технический
университет (Россия, г. Брянск,
бульвар 50-лет Октября, 7)
e-mail: taiga78@list.ru

Andrey N. Shcherbakov

Candidate of technical sciences,
associate professor, head
of the department of metal-cutting
machines and tools, Bryansk State
Technical University (7 50-Let
Oktyabrya boulevard, Bryansk,
Russia)

Владимир Васильевич Капустин

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Машиностроение
и материаловедение», Брянский
государственный технический
университет (Россия, г. Брянск,
бульвар 50-лет Октября, 7)
e-mail: Vovakapustin1990@mail.ru

Vladimir V. Kapustin

Candidate of technical sciences,
associate professor of the department
of mechanical engineering and
materials science, Bryansk State
Technical University (7 50-Let
Oktyabrya boulevard, Bryansk,
Russia)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

**Андрей Романович Янюшкин¹,
Дмитрий Владимирович Лобанов²**

^{1,2}Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова,
Чебоксары, Россия

Аннотация. Представлена информация по разработке, проектированию и модернизации действующего оборудования на машиностроительных предприятиях. Модернизация проводится с целью внедрения новых технологий шлифования деталей из высокопрочных материалов комбинированными электрофизическими методами, гарантирующими требуемое качество обработанной поверхности изделий, а также затачивания различных режущих инструментов из твердосплавных, минералокерамических и сверхтвердых материалов. Предложенные варианты модернизации способствуют поддержанию высоких режущих свойств алмазных кругов на протяжении всей операции шлифования в режиме самозатачивания абразивного круга. Для этого спроектирована специальная оснастка для оснащения станков дополнительными устройствами катодом непрерывной правки круга, токосъемником и источником технологического тока. Следует отметить, что реализованный принцип модернизации совместим с различными типами универсальных станков шлифовально-заточной группы, а отдельные элементы модернизации могут взаимозаменяться на различном оборудовании. Предлагаемые решения расширяют функциональные возможности и повышают надежность и эффективность работы оборудования.

Ключевые слова: проектирование, модернизация, шлифование, затачивание, инструмент, комбинированные электрофизические методы, труднообрабатываемые материалы

DESIGN OF EQUIPMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGIES FOR PROCESSING HIGH-STRENGTH MATERIALS BY COMBINED ELECTROPHYSICAL METHODS

Andrey R. Yanyushkin¹, Dmitry V. Lobanov²

^{1,2}Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Abstract. The article provides information on the development, design and modernization of existing equipment at machine-building enterprises. The modernization is carried out in order to introduce new technologies for grinding parts made of high-strength materials using combined electrophysical methods that guarantee the required quality of the

treated surface of products, as well as sharpening various cutting tools made of carbide, mineraloceric and superhard materials. The proposed modernization options contribute to maintaining high cutting properties of diamond wheels throughout the entire grinding operation in the self-sharpening mode of the abrasive wheel. For this purpose, special equipment has been designed to equip the machines with additional devices: a continuous circle straightening cathode, a current collector and a process current source. It should be noted that the implemented modernization principle is compatible with various types of universal grinding and sharpening machines, and individual modernization elements can be interchanged on different equipment. The proposed solutions expand the functionality and increase the reliability and efficiency of the equipment.

Keywords: design, modernization, grinding, sharpening, tools, combined electrophysical methods, difficult-to-process materials

Разрабатываемые в настоящее время новые композиционные материалы обладают рядом уникальных физико-механических свойств, в том числе прочностными и имеют высокую твердость. В структуре этих сплавов находятся оксиды и карбиды, трудно поддающиеся процессам механической обработки. При резании таких сплавов неизбежно на обработанной поверхности остаются дефекты механического происхождения в виде сколов, микро, макро трещин, напряжений, снижающих эксплуатационные характеристики изделий. Достичь требуемых качественных характеристик деталей с гарантированными характеристиками возможно при шлифовании электрофизическими методами.

На кафедре «Технология машиностроения» совершенствуются электрофизические методы, в том числе комбинированная электроалмазная обработка (КЭАО). КЭАО позволяет шлифовать широкий спектр высокопрочных материалов с высокой точностью и качеством. В опубликованных работах, например [1, 2], установлены общие закономерности и предложены различные варианты модернизации современного оборудования, а также сформулированы предложения для проектирования нового оборудования при изготовлении изделий из высокопрочных композиционных и труднообрабатываемых материалов. Разработка нового оборудования предполагает дополнительную установку специальных узлов токосъемника, непрерывной правки, источника технологического тока, системы подачи технологических сред в зону резания и предотвращения их разбрызгивания.

В настоящее время имеется многолетний опыт и документация по модернизации станков шлифовально-заточной группы, в том числе 3В642, 3Д642Е, 3Е711, 3Б667, 3Е624Е и других станков, внедренных в производство.

Для обеспечения высокой производительности предусмотрена управляемая система непрерывной правки, позволяющая реализовать

режим самозатачивания шлифовального круга, а также системы управления этим процессом, что значительно снижает удельный расход круга, улучшает режущую способность и качество обработанной поверхности [3].

Нами реализовано несколько вариантов запатентованных конструкций токосъёмника, катода и электрических схем, разработанных на кафедре [4,5]. В качестве примера на рис. 1, показан специальный токосъёмник, который следует устанавливать со стороны задней конструкции шпинделя, причём по центру оси. Такое расположение обеспечивает надёжный контакт, малый износ и большую долговечность. На рис. 2 показана конструкция специального катода для непрерывной правки шлифовального круга. Катод может быть выполнен из любого токопроводящего материала. Состоит из вставки 1, встроенной в корпус 2 с механизмом 3 микрометрического регулирования зазора.

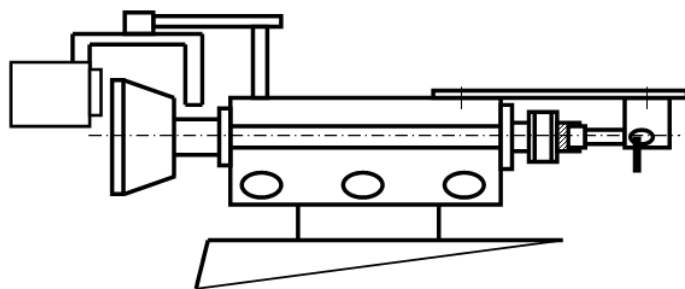


Рис. 1. Схема установки токосъёмника на универсально-заточном станке модели 3Д642Е

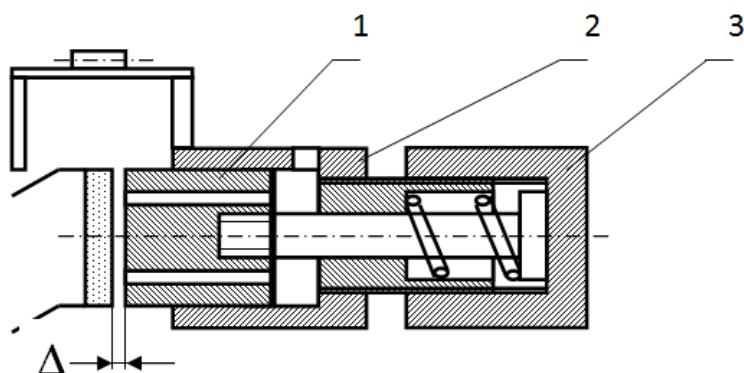


Рис. 2. Конструкция специального катода для непрерывной правки шлифовального круга

В катоде предусмотрены отверстия, через которые, при шлифовании, под давлением подаётся электролит. Разность давлений электролита между катодом и шлифовальным кругом удерживает предвари-

тельно настроенный зазор Δ в процессе работы постоянным. Экспериментами установлено, что оптимальный зазор Δ , между шлифовальным кругом и катодом, должен составлять 0,05...0,1 мм. Подобную модернизацию можно осуществить на любых металлорежущих станках [6–8].

Таким образом, предлагаемые решения, способствуют дальнейшей реализации процессов комбинированной электроалмазной обработки широкого спектра труднообрабатываемых и высокопрочных композиционных материалов.

Список литературы

1. Янюшкин А. С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы их реализации : монография. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2013. 336 с.
2. Янюшкин А. С., Попов В. Ю., Васильев Е. В., Попов А. Ю. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей. Братск, 2009. 228 с.
3. Патент 2268119 Российская Федерация, МПК В23Н3/00, В23Н5/06, В23Н7/00. Способ автоматического управления режущей способностью абразивного круга на токопроводящей связке / Янюшкин А. С., Сурьев А. А. ; заявлено 26.04.2004 ; опубл. 20.01.2006, Бюл. 2.
4. Патент 2446039 С2 Российская Федерация, МПК В24В 53/02. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке / Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Рычков Д. А. [и др.]. № 2010111574/02 ; заявл. 25.03.2010 ; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 27.
5. Патент 126275 U1 Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В24В 53/00. Устройство электроабразивной обработки с непрерывной правкой круга / Янюшкин А. С., Ереско С. П., Ереско Т. Т. [и др.]. № 2012142881/02 ; заявл. 08.10.2012 ; опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9.
6. Борисов М. А., Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Скиба В. Ю. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22, № 1. С. 6–15. doi: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15
7. Лобанов Д. В., Секлетина Л. С., Янюшкин А. Р. Комбинированная электроалмазная обработка алмазными кругами на металлической связке // Актуальные проблемы в машиностроении. 2019. Т. 6, № 1-4. С. 110–116.
8. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов : монография / под ред. А.В. Киричека. М. : Спектр, 2014. 255 с. EDN: SODVIF

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Романович Янюшкин

аспирант, ассистент кафедры
«Технология машиностроения»,
Чувашский государственный
университет имени И. Н. Ульянова
(Россия, г. Чебоксары,
пр-кт Московский, 15)
e-mail: yanyushkinas@mail.ru

Andrey R. Yanyushkin

Postgraduate student, assistant of the
department of mechanical engineering
technology, Chuvash State
University (15 Moskovsky avenue,
Cheboksary, Russia)

Дмитрий Владимирович Лобанов

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения», Чувашский
государственный университет
имени И. Н. Ульянова (Россия,
г. Чебоксары, пр-кт Московский, 15)
e-mail: lobanovdv@list.ru

Dmitry V. Lobanov

Doctor of technical sciences, associate
professor, head of the department of
mechanical engineering technology,
Chuvash State University
(15 Moskovsky avenue, Cheboksary,
Russia)

УДК 621.91.01/02

МОДЕРНИЗАЦИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ СКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

**Николай Николаевич Попок¹,
Руслан Сергеевич Хмельницкий²,
Виталий Сергеевич Анисимов³,
Дмитрий Анатольевич Башлачев⁴**

^{1,2,3,4}Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Целью работы является повышение производительности и качества резания путем модернизации шлифовальных станков и использования их для лезвийной обработки материалов.

Ключевые слова: скоростная лезвийная обработка, шаровый палец, заточной станок, охватывающий инструмент, шероховатость поверхности

UPGRADING GRINDING MACHINES FOR HIGH-SPEED BLADED MATERIAL PROCESSING

Nikolay N. Popok¹, Ruslan S. Khmel'nitsky²,
Vitaly S. Anisimov³, Dmitry A. Bashlachev⁴

^{1,2,3,4}Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. The purpose of the work is to increase the productivity and quality of cutting by modernizing grinding machines and using them for blade processing of materials.

Keywords: high-speed blade machining, ball finger, grinding machine, enveloping tool, surface roughness

В настоящее время все более широкое применение находит скоростная лезвийная обработка заготовок, осуществляемая в диапазонах скоростей резания выше традиционных [1]. Зачастую эта обработка используется вместо шлифования, когда реализуется так называемые «твердое» и «сухое» резание [2]. По сравнению со шлифованием скоростная лезвийная обработка материалов обеспечивает более высокую производительность и исключает шаржирование обработанной поверхности детали абразивными материалами.

В данной статье рассмотрена модернизация шлифовального оборудования на примере обработки неполной сферической и конической поверхностей детали «Шаровый палец» на заточном станке модели 3М642 с применением охватывающего фрезерования концевой фрезой.

Схема обработки неполной сферической поверхности детали включает вращение фрезы и заготовки и относительное их поступательное перемещение (рис. 1,а). При этом реализуется трехэлементная кинематическая схема резания (рис. 1,б), в которой вращательное движение фрезы является главным и осуществляется с наибольшей скоростью, а вращательное и поступательные движения заготовки или фрезы являются движениями подачи. Причем направления вращения фрезы и заготовки могут быть как встречными, так и попутными, а поступательное движение подачи осуществляется под углом η осей фрезы и заготовки, значения которого определяются геометрическими параметрами сфер $D_{сф}$ и H .

Для реализации рассмотренных схем скоростной обработки конических и сферических поверхностей деталей разработаны конструкции составной концевой фрезы и сборных охватывающих фрез (рис. 2 и 3).

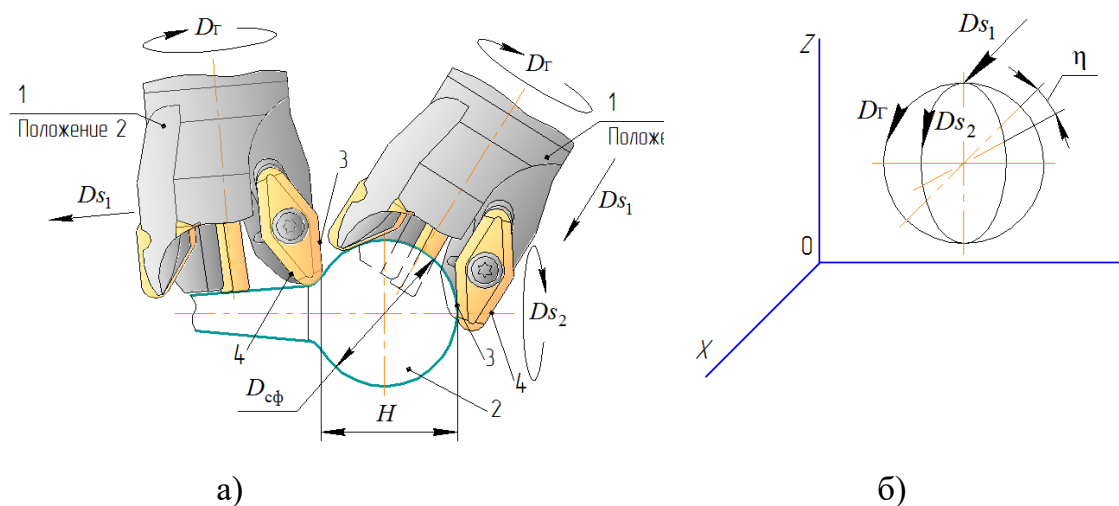


Рис. 1. Схема обработки поверхностей детали «Шаровый палец»
концевой фрезой (а) и кинематическая схема резания (б):
положение 1 – обработка неполной сферической поверхности;
положение 2 – обработка конической поверхности: 1 – фреза; 2 – деталь;
3 – главная режущая кромка; 4 – вспомогательная режущая кромка

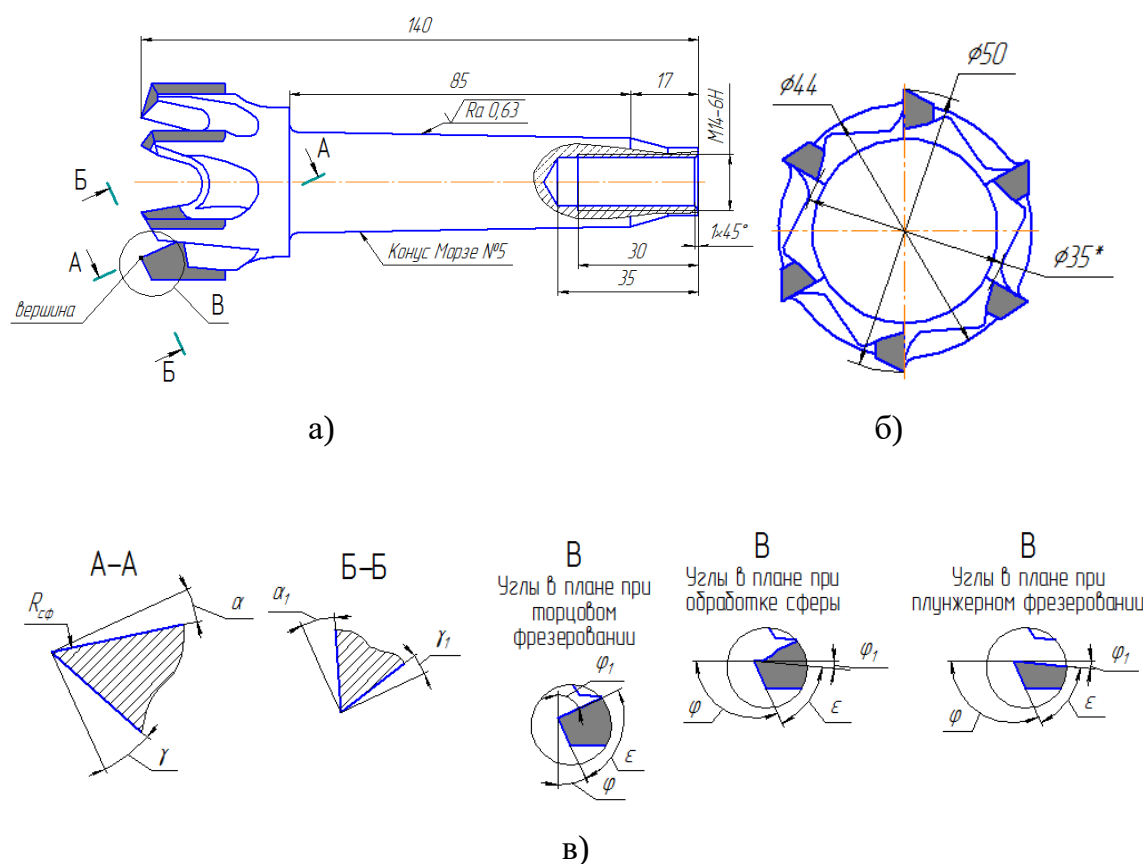


Рис. 2. Составная концевая фреза: а – главный вид; б – вид слева;
в – сечения и виды с угловыми параметрами

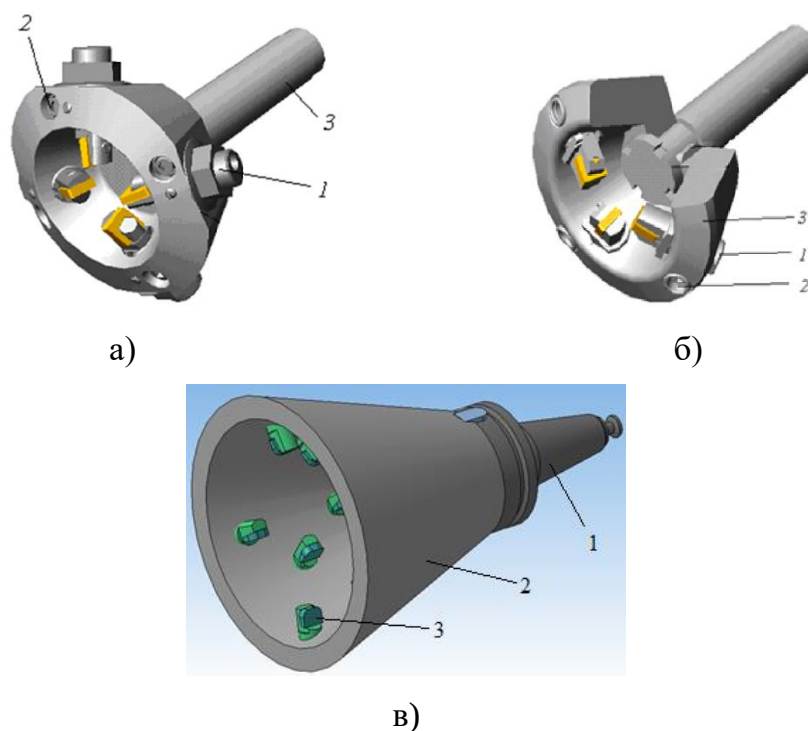


Рис. 3. Эскизы сборной с регулировкой (а) и без регулировки (б) лезвий фрезы для обработки сфер и сборной охватывающей фрезы (в) для обработки конических, цилиндрических и сферических поверхностей: 1 – блок резцовый; 2 – зажим; 3-корпусной модуль

Используется составная концевая фреза, у которой вспомогательная режущая кромка формируется под углом, соответствующей углу установки оси фрезы относительно детали, а. участок этой режущей кромки от вершины лезвия затачивается по радиусу сферы $R_{сф}$ с небольшим вспомогательным углом в плане. Такая заточка лезвия обеспечивает минимальные значения шероховатости обработанной поверхности детали и возможность компенсации износа вершины лезвия.

Разработанные конструкции сборных режущих инструментов с оригинальным резцовым блоком без регулировки и с широким диапазоном регулирования блоков резцовых (рис. 3) обеспечивают установку рациональных значений углов режущих лезвий, их радиального и торцового биений и обработки поверхностей деталей различных диаметральных размеров [3].

При осуществлении комбинированной обработки заготовку и сборную охватывающую фрезу устанавливают соосно с зазором между собой. Причем больший диаметр сборной охватывающей фрезы направлен в сторону заготовки и вращение охватывающего режущего инструмента осуществляют в одну сторону с линейной скоростью вращения некратной количеству режущих лезвий. Процесс резания

производят прямолинейным поступательным движением сборной охватывающей фрезы вдоль её оси с последовательным съемом слоя материала заготовки с образованием сферической или конической поверхностей до получения детали необходимого диаметра или длины.

Анализ конструкций шпиндельных узлов главного привода станка показал, что при модернизации могут использоваться как базовый шпиндельный узел станка, так и шпиндельный узел «Фортуна» круглошлифовального станка или высокоскоростной шпиндельный узел, предлагаемый фирмой IBAG [4].

Отличия конструкций шпиндельных узлов состоят в типах используемых опор (подшипников) и их расположения, которые должны учитывать силовой и тепловой ресурсы подшипников и шпинделя.

Для реализации рассмотренных схем обработки с использованием охватывающего инструмента предлагается расширить технологические возможности универсально-заточного станка модели 3М642 путем увеличения скорости вращения шпинделя с 6300 мин^{-1} до 12000 мин^{-1} и включения в электрические цепи датчиков обратной связи по скорости, программируемого логического контроллера, коммутационных устройств, датчиков скорости и панели оператора. Для получения скорости шпинделя не менее 12000 мин^{-1} необходимо увеличить частоту напряжения питания с 50 Гц до частоты, определяемой из соотношения $F_{\text{пит}} = 12000/(6300/50) = 95,23 \text{ Гц}$, где 12000 мин^{-1} – необходимая скорость вращения шпинделя, 6300 мин^{-1} – номинальная скорость шпинделя при питании двигателя привода шпинделя напряжением промышленной частоты, 50 Гц – частота напряжения питающей сети.

Были выбраны частотные преобразователи фирмы Yaskawa серии V1000, так как у них имеется возможность ввода на аналоговый выход сигнала пропорционального потребляемому асинхронным двигателем, модель VZA21P58AA для управления двигателем шпинделя и модель VZA20P48AA для управления двигателем приспособления наружного круглого шлифования. Выбран программируемый логический контроллер Siemens SIMATIC S7-200 CPU24HP, который удовлетворяет предъявляемым требованиям: напряжение питания 24 В; 14 дискретных входов на 24 В; 10 дискретных выходов на 24 В/0,75 А; 2 аналоговых входа; 1 аналоговый выход; память программ 16 Кбайт; память данных 10 Кбайт; 2 PPI/ MPI/ свободно программируемых порта; подключение до 7 модулей расширения. В качестве устройства человеко-машинного интерфейса используется панель оператора OP27 фирмы Siemens.

На рис. 4 показан универсально-заточный станок модели 3М642 с экспериментальным стендом. Элементы схемы экспериментального стенда смонтированы на передней панели несущей конструкции, предназначенной для сборки устройств.

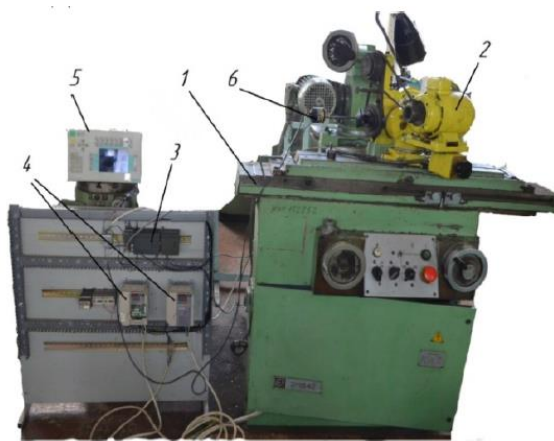


Рис. 4. Универсально-заточной станок модели 3М642 с экспериментальным стендом: 1 – станок модели 3М642; 2 – приспособление для наружного круглого шлифования 3М642Е.П17; 3 – промышленный контроллер; 4 – частотные преобразователи; 5 – операторская панель; 6 – энкодер

Экспериментальный стенд позволяет обработать заготовки комбинированным способом, который основан на реализации трех движений – двух вращательных и одного поступательного. Вращательное движение считается главным и сообщается инструменту, причем на разных этапах обработки возможно сочетание одновременно как трех, так и двух движений, что обеспечивает врезание инструмента в заготовку, выхаживание и выглаживание поверхности детали при изменениях частоты вращения инструмента от 3000 до 12000 мин⁻¹ и заготовки – от 20 до 200 мин⁻¹.

Измерения мощности станка показали, что при увеличении диаметра инструмента с 25 до 35 мм и частоты вращения с 3150 до 12000 мин⁻¹ мощность в процессе обработки возрастает в среднем на 20÷40 %. Это объясняется увеличением силы резания и крутящего момента на лезвии инструмента. Установлено также циклическое изменение мощности и силы резания на этапах врезания и выхаживания инструмента, соответствующее изменению частот вращения на рабочем ходу. С увеличением частоты вращения инструмента одного и того же размера и диаметра до 9000–12000 мин⁻¹ силы резания снижаются и не превышают 25÷50 Н, что свидетельствует о преимуществах скоростной обработки с точки зрения нагрузки на шпиндельные узлы станка и приспособления. Установлено, что при скоростной обработке температура нагрева поверхности детали не превышает 30÷120 °С (отвод теплоты в стружку составляет от 75 до 90 %), и это не приводит к структурным и фазовым изменениям в поверхностных слоях и не вызывает перегрев шпиндельного узла станка.

Список литературы

1. Шарин Ю. С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. М. : Машиностроение, 1986. 176 с.
2. Davim J. P. Machining of hard materials. Springer, 2011. doi: 10.1007/978-1-84996-450-0
3. Хмельницкий Р. С. Технология скоростной обработки неполных сферических поверхностей деталей машин вращающимся лезвийным инструментом : дис. ... канд. техн. наук. Минск : БНТУ, 2018. 27 с.
4. Шпиндельный узел «IBAG». URL: https://www.precise-rotation.ru/IBAG_Sw/ibag_shpindeli.pdf (дата обращения: 25.09.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Попок

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры «Технологии
и оборудование машиностроительного
производства», Полоцкий
государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
(Республика Беларусь, г. Новополоцк,
ул. Блохина, 29)
e-mail: n.popok@psu.by

Nikolay N. Popok

Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of mechanical engineering
technologies and equipment,
Euphrosyne Polotskaya State
University of Polotsk (29 Blokhin
street, Novopolotsk, Republic of
Belarus)

Руслан Сергеевич Хмельницкий

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии и оборудование
машиностроительного производства»,
Полоцкий государственный
университет имени Евфросинии
Полоцкой (Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)
e-mail: post@psu.by

Ruslan S. Khmel'nitsky

Candidate of technical sciences,
associate professor of the department
of technology and equipment for
mechanical engineering, Euphrosyne
Polotskaya State University of Polotsk
(29 Blokhin street, Novopolotsk,
Republic of Belarus)

Виталий Сергеевич Анисимов

заведующий лабораториями кафедры
«Технологии и оборудование
машиностроительного производства»,
Полоцкий государственный
университет имени Евфросинии
Полоцкой (Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)
e-mail: v.anisimov@psu.by

Vitaly S. Anisimov

Head of laboratories of the department
of technology and equipment for
mechanical engineering, Euphrosyne
Polotskaya State University of Polotsk
(29 Blokhin street, Novopolotsk,
Republic of Belarus)

Дмитрий Анатольевич Башлачев
соискатель, Полоцкий
государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
(Республика Беларусь, г. Новополоцк,
ул. Блохина, 29)
e-mail: post@psu.by

Dmitry A. Bashlachev
Applicant, Euphrosyne Polotskaya
State University
of Polotsk (29 Blokhin street,
Novopolotsk, Republic of Belarus)

УДК 621.924.07

СТАНОК ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

**Владимир Зиновьевич Зверовщиков¹,
Сергей Александрович Нестеров²,
Даниил Сергеевич Антонов³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Разработан центробежно-планетарный станок с горизонтальным расположением цилиндрических барабанов для объемной обработки поверхностей деталей гранулированными средами. Приведена принципиальная схема обработки. Представлена конструктивная схема станка с автономными приводами для независимого вращения водила и барабанов вокруг собственных осей. Предложены технологические и конструктивные приемы для устранения застойных зон в объеме барабанов и повышения стабильности обработки.

Ключевые слова: центробежно-планетарный станок, гранулированные среды, объемная обработка, контактное давление

MACHINE TOOL FOR CENTRIFUGAL GRINDING OF POWDER MATERIALS

**Vladimir Z. Zverovshchikov¹, Sergey A. Nesterov²,
Daniil S. Antonov³**

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The authors have developed a centrifugal-planetary machine with a horizontal arrangement of cylindrical drums for volumetric treatment of parts surfaces with granulated media. The basic processing scheme is given. The design scheme of the machine

with autonomous drives for independent rotation of the driver and drums around their own axes is presented. Technological and constructive methods are proposed to eliminate stagnant zones in the volume of drums and increase the stability of processing.

Keywords: centrifugal-planetary machine, granular media, bulk processing, contact pressure

Зачистную, отделочную и упрочняющую обработку поверхностей деталей широко применяют в различных отраслях промышленности, особенно широко в машиностроении. Такая обработка позволяет удалять заусенцы, притуплять или скруглять острые кромки, осуществлять размерную и декоративную отделку поверхностей, обеспечивать повышение физико-механических свойств поверхностных слоев деталей. Механизация и автоматизация отделочно-зачистных технологических операций значительно уступает основным операциям механической обработки деталей, что объясняется отсутствием серийного выпуска станков, кроме оборудования для вибрационной обработки [1]. Опыт промышленного использования виброустановок как отечественного, так и зарубежного производства свидетельствует об универсальности вибрационной технологии, которая позволяет обрабатывать детали различной формы и размеров, эффективно снижать шероховатость поверхности, упрочнять поверхностные слои металла и даже наносить некоторые виды покрытий [2]. Основным недостатком вибрационных станков является ограниченное контактное давление рабочих тел на обрабатываемые поверхности (в качестве обрабатывающих сред используют гранулированные наполнители в виде призм, цилиндров, конусов, пирамид, звездочек, шаров и др.) даже при интенсивных режимах осцилляций рабочей камеры (амплитуды и частоты колебаний). Для повышения контактного давления используют станки виброшпиндельные или центробежно-шпиндельные, которые позволяют в десятки раз повысить интенсивность съема металла при обработке тел вращения (зубчатые колеса и блоки колес, валы, муфты, втулки). При центробежно-шпиндельной обработке в качестве обрабатывающей среды используют шлифовальные материалы в виде зерен и порошков с различными характеристиками. Продолжительность обработки составляет 0,25...5 мин. Фирма Рото-финиш (Англия) производит центробежно-шпиндельные станки с различным числом шпинделей (1...16).

Для объемной (всесторонней) обработки мелких деталей используют центробежно-ротационные станки [3,4], в которых детали и обрабатывающую среду загружают на диск в форме тарелки, установленной на вертикальном валу в цилиндрическом или граненом (8...12 граней) контейнере, закрепленном на станине станка. При вращении диска обрабатываемые детали и гранулированная рабочая среда под действием

центробежных сил перемещаются вверх по стенке неподвижного контейнера по винтовой траектории и достигнув определенной высоты, падают на вращающееся дно, образуя тороидальный поток, движущийся с высокой скоростью. При этом обрабатываемые детали и гранулы рабочей среды движутся с различными скоростями. Давление гранул на поверхности деталей у стенок контейнера под действием центробежных сил в 7...10 раз превышает контактные давления, возникающие при вибрационной обработке. Поэтому пропорционально увеличивается производительность отделочно-зачистной обработки [5]. Отделку поверхностей производят при непрерывной циркуляции технологической жидкости, а для интенсификации съема металла и выравнивания контактных давлений на деталях в форме тел вращения применяют центробежно-шпиндельное полирование в тороидальном потоке гранулированной среды путем циклического погружения оправок с деталями в уплотненную массу шлифовального материала [6].

Более перспективной для отделочно-упрочняющей обработки мелких и средних деталей представляется технология полирования с использованием центробежно-планетарных станков, в которых планетарное движение сообщают барабанам с рабочей загрузкой или оправкам с деталями [7].

Для объемной отделочно-зачистной или отделочно-упрочняющей обработки детали и гранулированную рабочую среду в виде дискретных рабочих тел загружают в барабан, которому сообщают переносное вращение вокруг центральной оси с угловой скоростью ω_1 (рис. 1) и относительное движение вокруг собственной оси с угловой скоростью ω_2 .

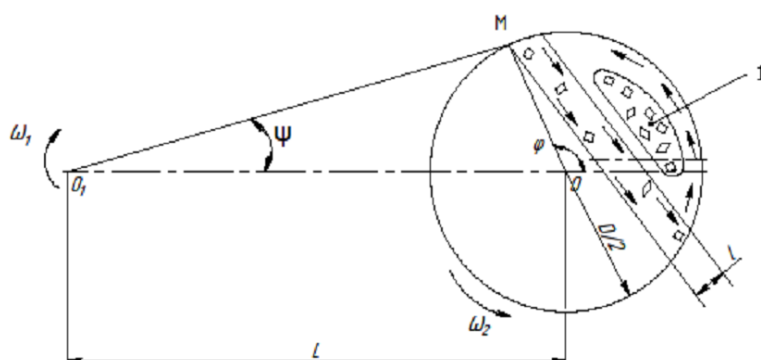


Рис. 1. Принципиальная схема обработки поверхностей деталей

Центробежные силы, возникающие при планетарном вращении барабана, приводят к уплотнению рабочей загрузки в виде сегмента (в поперечном сечении) на стенке цилиндрического барабана, а при

определенных соотношениях угловых скоростей вращения ω_1 и ω_2 происходит смещение уплотненной массы загрузки на угол φ в направлении относительного движения барабана со скоростью ω_2 . В этом положении начинается пересыпание в барабане уплотненной массы загрузки с образованием на ее поверхности скользящего слоя глубиной l , величина которой зависит от угловых скоростей водила ω_1 и барабана ω_2 , конструктивных параметров D и L станка, состава и размеров гранул, вязкости технологической жидкости. Скользящий слой, состоящий из обрабатываемых деталей и рабочих тел гранулированной среды, с высокой скоростью перемещается в направлении противоположном вращению барабана. Внутри скользящего слоя абразивные частицы гранул интенсивно взаимодействуют с поверхностями деталей, что приводит к обработке последних. Контактное давление абразивных частиц рабочей среды в 20...25 раз превышает величину контактных давлений при вибрационной обработке. Обрабатываемые среды и составы технологических жидкостей назначают аналогично вибрационной и центробежно-ротационной обработке.

Конструктивная схема центробежно-планетарного станка с горизонтальным расположением цилиндрических барабанов 1 приведена на рис. 2.

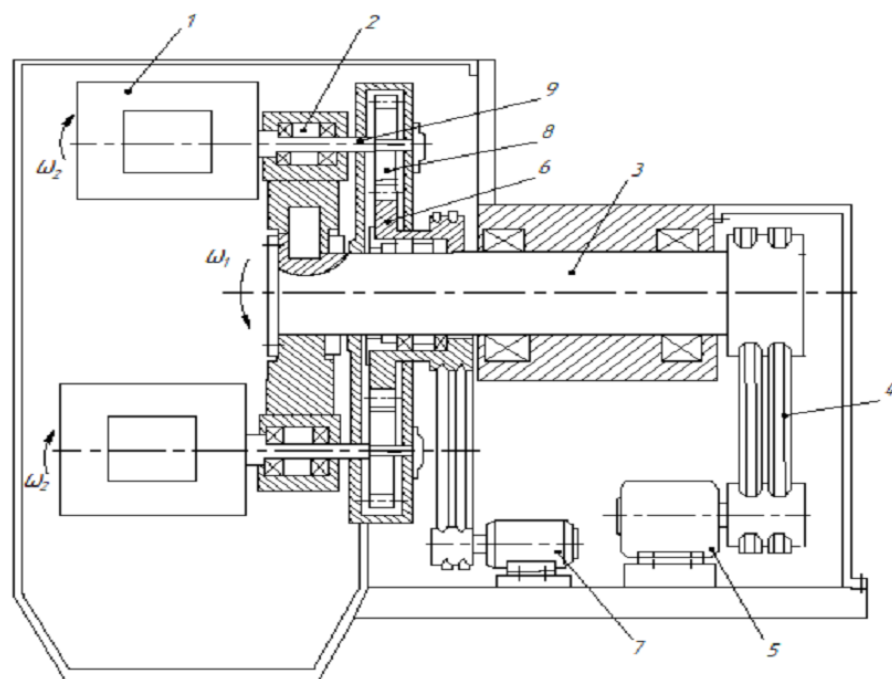


Рис. 2. Конструктивная схема станка для объемной обработки деталей

Обрабатываемые детали и рабочие тела (абразивные гранулы, фарфоровые или металлические шары) загружают в барабаны 1 через

люки, выполненные на цилиндрических стенках барабанов, заливают технологическую жидкость и герметично закрывают откидными крышками люки.

Переносное вращение с угловой скоростью ω_1 барабаны получают от водила 2, жестко установленного на валу 3, а на втором конце вала закреплен шкив, соединенный клиновыми ремнями 4 со шкивом приводного двигателя 5, смонтированного на раме станка. Вращение вокруг собственных осей барабанам сообщают от дифференциального механизма, размещенного в корпусе планшайбы станка и состоящего из центрального зубчатого колеса 6, установленного с возможностью вращения на валу 3 и кинематически связанного клиноременной передачей с приводным двигателем 7, также закрепленным на раме станка. Зубчатое колесо 6 находится в зацеплении с зубчатыми колесами 8, установленными на валах 9, на которых закреплены барабаны 1.

Водило 2, несущее барабаны с рабочей загрузкой, получает вращение с угловой скоростью ω_1 от двигателя 5 посредством клиноременной передачи, состоящей из шкивов, установленных на валу двигателя 5 и на валу 3, соединенных клиновыми ремнями 4. При этом происходит уплотнение рабочей загрузки на периферии барабанов (см. рис. 1). От приводного двигателя 7 барабаны получают вращение вокруг собственных осей с угловой скоростью ω_2 , через клиноременную передачу и дифференциальный механизм, состоящих из центрального зубчатого колеса 6 и зубчатых колес 8. При этом уплотненная загрузка выводится из равновесного состояния и смещается на угол φ , а на поверхности загрузки возникает скользящий слой, глубиной l , в котором происходит обработка деталей.

Установлено, что внутри уплотненной рабочей загрузки вблизи центра масс возникает так называемая застойная зона I (см. рис. 1), в которой относительное перемещение рабочих тел и поверхностей деталей практически отсутствует, а, следовательно, прекращается и обработка. Для выравнивания условий обработки уменьшают заполнение объема барабанов рабочей загрузкой до 50...60 % и применяют различные технологические приемы.

Стабильного устранения застойных зон в барабанах с планетарным вращением можно достигнуть путем сообщения контейнерам неравномерного вращения вокруг собственных осей [8]. Для этого в дифференциальном механизме привода вращения барабанов вокруг собственных осей предлагается зубчатые колеса 6 и 8 выполнять эллиптическими.

При циклическом изменении величины инерционных сил, действующих на рабочую загрузку, обусловленном вращением барабанов с переменной скоростью, происходит разрушение застойной зоны, и

создаются одинаковые условия обработки для всех деталей, загруженных в барабаны.

Список литературы

1. Зеленцов А. К., Самодумский Ю. М. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей. Ростов н/Д. : Изд-во Ростовского ун-та, 1981. 160 с.
2. Бабищев А. П. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д. : Изд. центр ДГТУ, 1999. 620 с.
3. Трилиссский В. О., Бурштейн И. Е., Алферов В. И. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей. М. : НИИМАШ, 1983. 52 с.
4. Трилиссский В. О., Вейнов В. П., Панчурин В. В. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей. М. : НИИМАШ, 1989. 40 с.
5. Тамаркин М. А., Виноградов Д. В., Тищенко Э. Э., Гаврилов Д. И. Технологические особенности процесса центробежно-ротационной обработки // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : сб. тр. науч.-техн. конф. «Шлифабразив–2001». Волжский : Волжск ИСИ, филиал ВолгГАСА, 2001. С. 162–165.
6. Патент 2755328 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/00. Способ и устройство для центробежно-шпиндельной обработки поверхностей деталей / Зверовщиков В. З., Липов А. В., Павловский П. Г., Нестеров С. А., Зверовщиков А. В. ; патентообладатель Пенз. гос. ун-т. № 2020143869 ; заявл. 30.12.2020 ; опубл. 15.09.2021, Бюл. № 26.
7. Зверовщиков В. З. Динамика центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. 200 с.
8. Патент 2401730 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/104. Способ центробежной абразивной обработки деталей / Зверовщиков В. З., Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Зотов Е. В., Юртаева Е. В. ; патентообладатель Пенз. гос. ун-т. № 2009109496 ; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Зиновьевич

Зверовщиков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: wzzwer@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of technologies
and equipment of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Нестеров
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nesterovs@list.ru

Даниил Сергеевич Антонов
студент, Пензенский
государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: daniil.antonov@ptpa.ru

Sergey A. Nesterov
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of technologies and
equipment of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Daniil S. Antonov
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ СТАНКОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.91.01/02

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТАНКАХ И ИНСТРУМЕНТАХ

Николай Николаевич Попок¹,
Елена Михайловна Тихон²,
Дмитрий Александрович Шелепень³

^{1,2,3}Полоцкий государственный университет имени Евфросинии
Полоцкой, Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Приведены результаты моделирования напряжений в микрометрических резьбовых соединениях при различных площадях контакта. Даны измерения площади контакта при приведении резьбового соединения в рабочее положение. Рассмотрено влияние нанесения покрытия на поверхность резьбы на точность и жесткость инструмента.

Ключевые слова: расточные режущие инструменты, точность, моделирование, шероховатость, покрытия

IMPROVING THE PRECISION AND STIFFNESS OF A MICROMETRIC THREADED CONNECTION IN MACHINES AND TOOLS

Nikolay N. Popok¹, Elena M. Tikhon², Dmitry A. Shelepen³

^{1,2,3}Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk,
Republic of Belarus

Abstract. The results of stress modeling in micrometric threaded connections at different contact areas are given. The contact area is measured when the threaded connection is brought to the working position. The influence of coating the surface of the thread on the accuracy and rigidity of the tool is considered.

Keywords: boring cutting tools, accuracy, modeling, roughness, coatings

В современных металлорежущих станках и технологической оснастке широко применяются высокоточные резьбовые соединения, например, в расточных режущих инструментах с микрометрической настройкой лезвий.

Анализ конструкций расточных режущих инструментов показывает [1], что точность расточных режущих инструментов зависит от зазоров в резьбовом соединении «винт-втулка» (рис. 1), а их жесткость – от возникающих в резьбовой паре напряжений в процессе резания. В свою очередь, значения напряжений в механизмах регулирования расточных режущих инструментов, возникающих при воздействии нагрузки, будут зависеть от площади поверхностей контакта резьбовых соединений, а также направления осевой силы F , прилагаемой в процессе приведения инструмента в рабочее положение. Под действием осевой силы F резьба находится, с одной стороны, в напряженном состоянии, что приводит к изнашиванию резьбовой пары, и с другой стороны, могут образовываться зазоры, что снижает точность перемещения [2].

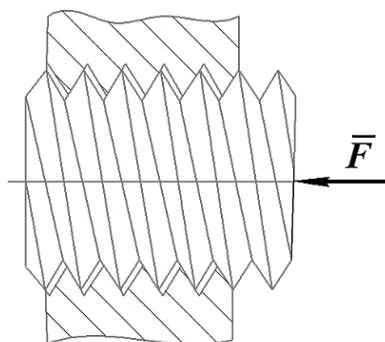


Рис. 1. Механизм образования зазора в резьбе

Предлагаются различные технические решения по компенсации зазоров в резьбовом соединении, в частности, используются разрезные резьбовые втулки. Был проведен анализ напряжений, возникающих при воздействии нагрузки при 100 % площади поверхностей контакта. Результаты моделирования, представленные на рис. 2, показывают, что основные напряжения сосредоточены по оси винта и максимальные значения напряжения достигаются в вершинах резьбы втулки.

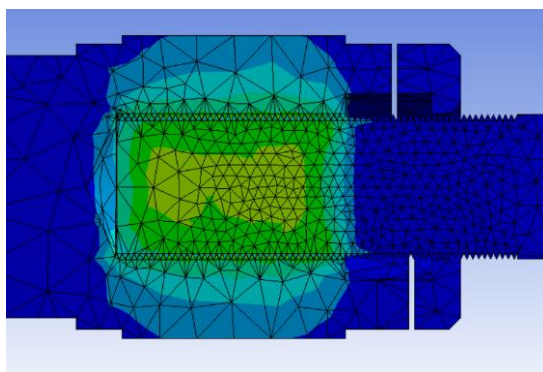


Рис. 2. Карта распределения напряжений на поверхности резьбы при площади контакта 100 %

Для определения реальной площади поверхностей контакта резьбовых соединений была создана физическая модель резьбового соединения «винт-втулка», отпечатанная на 3D принтере из пластикового материала и проведены измерения линейных размеров на видеоизмерительном микроскопе модели NVM-4030D фирмы NORGAU с целью выявления величины зазоров (рис. 3).

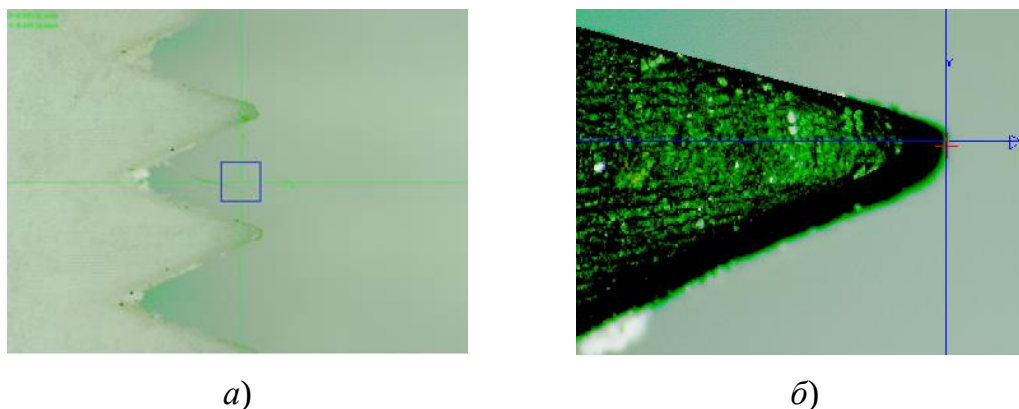


Рис. 3. Измерение линейных размеров резьбового соединения на видеоизмерительном микроскопе:

- а* – резьбовое соединение в исходном положении;
б – резьбовое соединение с зазором в рабочем положении

Полученные результаты измерений показывают, что при создании дополнительного натяга в резьбе путем расклинивания втулки наблюдается перемещение винта в направлении действия осевого усилия F и контакт возникает на разносторонних поверхностях резьбы винта и втулки. При этом наблюдается уменьшение площади поверхностей контакта до 50 %, концентрация напряжений происходит в винте и крайних витках резьбы втулки (рис. 4).

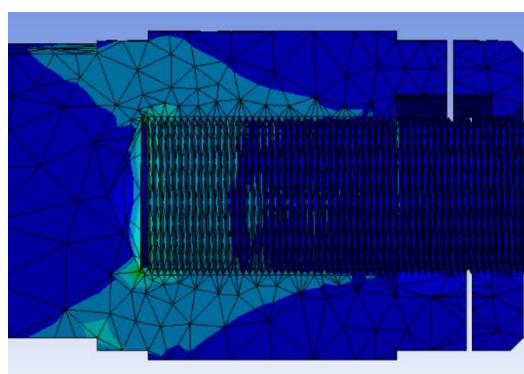


Рис. 4. Карта распределения напряжений при контакте под воздействием осевой силы

Однако полученные результаты не являются точными, так как поверхность резьбы, получаемая резанием, будет иметь неравномерный микрорельеф (шероховатую поверхность), что будет уменьшать факти-

ческую площадь контакта [3] и, тем самым, увеличивать размер зазора и уменьшать прочность инструмента.

Повысить прочность и износостойкость, а также уменьшить зазор возможно за счет нанесения покрытия на поверхность резьбы. Нанесение покрытия в зависимости от технологии, материала и условий нанесения может, как снизить шероховатость (заполнить впадины микронеровностей, снижая значение среднеарифметического отклонения профиля Ra), так и увеличить шероховатость (покрытия, содержащие крупные частицы, при электродуговом напылении). Некоторые покрытия формируют собственную микроструктуру, отличную от исходной, что важно для адгезии и функциональности.

Максимальная прочность сцепления шероховатой поверхности с основой возникает при нанесении «треугольной нарезки». Поэтому предлагается формирование микрорельефа поверхности резьбы лезвийной обработкой на высокой скорости резания и нанесение вакуумным ионно-плазменным методом «тонкого» (до 3–5 мкм) покрытия из нитрида титана.

Для обоснования рационального формирования микрорельефа поверхности под покрытие воспользуемся положением теории контакта поверхностей. Согласно этой теории, рассматриваются различные типы начальных участков опорных поверхностей, получаемых резанием (рис. 5), и предложены формулы для расчета относительной площади касания при контакте шероховатой поверхности с твердой гладкой поверхностью [3]:

$$\eta = b \cdot \varepsilon^v, \quad (1)$$

где $\eta = \frac{F_{\Phi}}{F_K}$ – отношение фактической площади контакта к контурной; ε – отношение приближения к максимальной высоте неровностей; b – поправочный коэффициент; v – показатель, характеризующий опорную кривую.

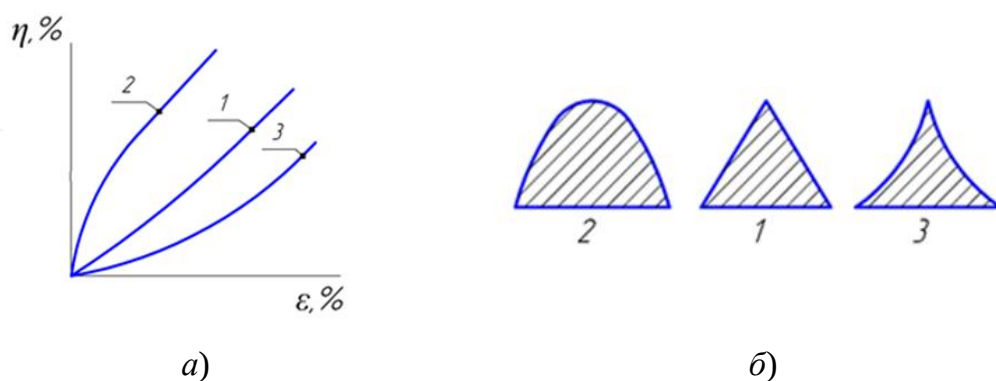


Рис. 5. Зависимость отношения фактической и контурной поверхностей контакта от отношения приближения к максимальной высоте неровностей (а) при различных профилях неровностей (б):

1 – $v < 1$; 2 – $v = 1$; 3 – $v > 1$

Относительную площадь касания η при упругом контакте на основании рассмотрения сферической модели поверхности можно определить по формуле:

$$\eta = \left(\frac{b}{2}\right)^{\frac{1}{2\nu+1}} \cdot \left[\frac{2,35(1+\mu^2) \cdot r^{1/2} \cdot q_k}{REK_2} \right]^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуансона; r – радиус закругления вершин шероховатости; q_k – контурное давление; E – модуль Юнга; K_2 – коэффициент, зависящий от ν .

Расчеты по формуле (2) показывают, что относительная площадь касания η в резьбовых соединениях, изготовленных из инструментальной стали 40Х точением ($\nu = 1$, $b = 2$) со среднеарифметическим отклонением профиля $Ra = 0,8$ мкм будет равна $\eta = 0,8$, а при $Ra = 1,2$ мкм – $\eta = 0,61$.

При нанесении покрытия толщиной до 5 мкм из нитрида титана вакуумным ионно-плазменным методом, которое упрочняет поверхность по вершинам микронеровностей, относительная площадь касания η будет равна $\eta = 0,9$ при $Ra = 0,8$ и $\eta = 0,76$ при $Ra = 1,2$ мкм соответственно. Результаты расчетов показывают, что площадь контакта увеличивается на 10–15 %.

Важно отметить, что шероховатость поверхности при нанесении покрытия будет зависеть от шероховатости исходной поверхности. Для поверхности со среднеарифметическим отклонением профиля $Ra < 0,4$ мкм – шероховатость поверхности ухудшается, в диапазоне $Ra = 0,4 \div 0,8$ мкм шероховатость поверхности практически не изменяется, улучшение наблюдается при $Ra > 0,8$ мкм [4]. Причем при высокой исходной шероховатости поверхности нанесение покрытия может ее снизить в 10 раз [5, 6].

Таким образом, нанесение «тонкого» покрытия из нитрида титана позволяет увеличить площадь контакта резьбового соединения на 10 – 15 %, которая в рабочем положении составляет около 50 %. Это позволяет уменьшить зазор в соединении, снизить возникающие напряжения и, в следствии, повысить прочность и износостойкость инструмента.

Список литературы

1. Попок Н. Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки имплантации // Вестник Пензенского государственного университета. 2012. № 3. С. 19–37.

2. Попок Н. Н., Тихон Е. М., Кукареко В. А., Анисимов В. С. Повышение долговечности регулировочных механизмов расточных режущих инструментов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2023. С. 218–224.

3. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1973. 430 с.

4. Белый А. В., Дорудейко В. Г., Макушок Е. М., Миневиц А. А. Прогрессивные методы изготовления металлорежущего инструмента. Минск : БелНИИТИ, 1989. 55 с.

5. Попок Н. Н., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Гвоздь Г. И. Кинематическое и технологическое обеспечение формирования регулярного микрорельефа сферических поверхностей деталей комбинированной обработкой резанием // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2017. № 11. С. 16–25.

6. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий. Минск : Навука і тэхніка, 1991. 94 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Попок

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии
и оборудование машиностроительного
производства», Полоцкий
государственный университет имени
Евфросинии Полоцкой (Республика
Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)
e-mail: n.porok@psu.by

Nikolay N. Popok

Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of technology and equipment
of machine-building industry,
Euphrosyne Polotskaya State
University of Polotsk (29 Blokhin
street, Novopolotsk, Republic
of Belarus)

Елена Михайловна Тихон

старший преподаватель кафедры
«Технологии и оборудование
машиностроительного производства»,
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
(Республика Беларусь, г. Новополоцк,
ул. Блохина, 29)
e-mail: e.tikhon@psu.by

Elena M. Tikhon

Lector of the department of
technology and equipment of
machine-building industry,
Euphrosyne Polotskaya State
University of Polotsk (29 Blokhin
street, Novopolotsk, Republic
of Belarus)

Дмитрий Александрович Шелепень

инженер кафедры «Технологии
и оборудование машиностроительного
производства», Полоцкий
государственный университет имени
Евфросинии Полоцкой (Республика
Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)
e-mail: d.shelep@psu.by

Dmitry A. Shelepen

Engineer of the department
of technology and equipment
of machine-building industry,
Euphrosyne Polotskaya State
University of Polotsk (29 Blokhin
street, Novopolotsk, Republic
of Belarus)

ОБ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ МЕХАНООБРАБОТКИ ДЛЯ НУЖД ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Дмитрий Алексеевич Борисов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Отмечены трудности, связанные с утилизацией стружки различными способами, в особенности на этапе брикетирования. Показан способ возвращения тугоплавких металлов в производственные процессы из стружки с использованием технологии центробежно-дугового диспергатора.

Ключевые слова: утилизация стружки, брикетирование стружки, фильеры, технология центробежно-дугового диспергатора

ON THE DISPOSAL OF MECHANICAL PROCESSING WASTE FOR THE NEEDS OF POWDER METALLURGY

Alexander E. Zverovshchikov¹, Dmitry A. Borisov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article highlights the difficulties associated with chip disposal in various ways, especially at the briquetting stage. A method of returning refractory metals to production processes from chips using centrifugal arc dispersant technology is shown.

Keywords: chip recycling, chip briquetting, spinners, centrifugal arc dispersant technology

С тех пор как существует обработка металлов резанием, существует и проблема утилизации стружки, в которую в настоящее время, даже при самых совершенных методах компьютерного проектирования, уходит до 10–15 % обрабатываемого металла, часто легированного теми или иными дорогостоящими компонентами. Это очень значительная цифра, в особенности в условиях, когда конъюнктура ставит перед механообработчиками задачу экономии каждого рубля.

Трудность решения этой задачи объясняется спецификой стружки как утильсырья. Так, обычная плавка стружки в тигле непосредственным нагревом ведет к чрезвычайному расходу топлива ввиду того, что элементы стружки отделены друг от друга хорошим изолятором – воздухом, и от этого фактора невозможно избавиться даже прессованием стружки в брикеты – в том числе из-за ее пружинящих свойств.

Определенные препятствия встречает плавка индукционным методом: согласно [1] «Стружка, загруженная в «сухой» тигель, нагревается до высокой температуры (800–900 °С), но не расплавляется. Расплавление происходит только при наличии жидкой фазы». Также отмечены ошлаковывание, сильное задымление (а обычные индукционные печи не оборудованы системой удаления газов).

В настоящее время часто используется так называемая «плавка с затравкой»: сначала в тигле расплавляют некоторое количество обычного «чушечного» металла, а потом уже опускают в этот расплав стружку. Таким образом удастся избавиться от «воздушных изоляторов», препятствующих плавке стружки в обычных условиях. При работе данным методом есть ограничение, стружка должна подаваться дозированными и относительно небольшими порциями, чтобы не вызывать чрезмерное остывание расплава и его кристаллизацию; да и подготовка «затравки» требует серьезных энергетических затрат.

Не всегда удобна и отправка стружки на крупные металлургические предприятия, где плавка металлов осуществляется в очень значительных количествах. Здесь возникает фактор транспортных расходов и некоторые организационные вопросы. В качестве примера последних можно привести проблемы возникающие при сортировке стружки. В одной партии может оказаться и стружка, допустим, стали с высоким содержанием углерода, и с низким; загрузка перемешанной стружки в «плавильный котел» металлургического предприятия приведет к подшихтовке и выходу характеристик выплавленного металла за требуемые пределы [2].

Сумма этих факторов порождает настороженность металлургов в отношении переработки «вторсырья» механообработчиков.

В связи с перечисленными трудностями предлагается метод переработки стружки на центробежно-дуговом диспергаторе. Суть метода в том, что расходный стержень (электрод) подводится к поверхности вращающегося диска; между ними создается разность напряжений, вследствие чего обращенная к ротору оконечность расходного стержня начинает плавиться, а вращение ротора создает из капель плавящегося материала форс брызг, которые, остывая, превращаются в сферические гранулы настраиваемого за счет различных параметров диаметра от 5 до 100 мкм – материал для переработки методом порошковой металлургии. Остывшие гранулы улавливаются коллектором и поступают на дальнейшие звенья технологической цепочки [3].

Процесс подготовки переработки стружки в стержень должен проходить следующим образом.

В авторский варианте стружка, нагретая пропусканием электрического разряда через материал до температуры спекания, проводится

через фильеру (ряд фильер), при помощи установленного пресса. На выходе из фильеры полученный из стружки «жгут» пропитывается каким-либо относительно легкоплавким металлом с хорошей электропроводностью – например, кобальтом (подобная пропитка осуществляется и при изготовлении обычных стержней-электродов для получения порошка методом диспергирования).

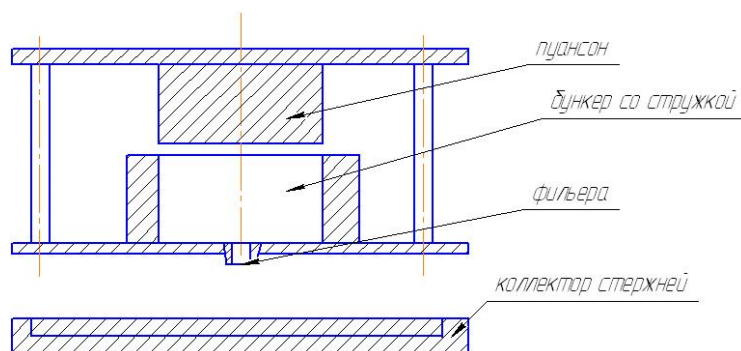


Рис. 1. Система выдавливания стержней

Другим вариантом подготовки стержня может выступить электрошлаковый переплав (ЭШП) – в данном случае стружка за счет проплавления через слой шлака очищается от неметаллических включений, вредных примесей и газов. Просачивающиеся капли металла будут остывать в формах, заготовленных для стержней в водоохлаждаемом поддоне. Это позволяет получать сверхчистые сплавы с уникальными свойствами, но данный способ в виду низкой производительности и высокой энергоемкости не будет применяться повсеместно.

Полученная тем или иным способом заготовка расходного стержня подается на установку для центробежно-дугового диспергирования и перерабатывается в порошок.

Разумеется, подобным способом нельзя провести утилизацию всего объема стружки, образующейся на металлообрабатывающих предприятиях. Ее слишком много. Но дать «вторую жизнь» отходам от обработки наиболее ценных тугоплавких материалов этим методом вполне возможно.

Предложенная технология сулит не только прирост доступного сырья для порошковой металлургии, пока еще достаточно дефицитного, но и сулит серьезный экономический эффект: нагрев стружки до ее спекания требует гораздо меньше энергии, чем ее плавка, а энергетические затраты на обогрев фильер отчасти компенсируются теплом, выделяемом при волочении (более точным будет определение «продавливания») стружечного жгута через фильеры.

Предложенное техническое решение готовится к апробированию на установке для центробежно-дугового диспергирования Пензенского

государственного университета и к защите авторских прав на него путем подачи заявки на изобретение.

Список литературы

1. Волков Д. А., Мельников А. П., Волков А. Д. [и др.]. Исследование и оптимизация технологии переплава чугуновой стружки в индукционных печах // Литье и металлургия. 2007. № 2 (42). С. 124–128.
2. Дьяконов О. М. Получение металлургических брикетов на основе стружко-порошковых композиций горячим прессованием // Литье и металлургия. 2011. № 4 (63). С. 129–137.
3. Патент 2746197 С1 Российская Федерация, МПК В22F 9/10, В22F 9/14. Способ получения мелкодисперсного порошка тугоплавкого материала / Зверовщиков А. Е., Зверовщиков В. З., Колмаков К. М., Борисов Д. А. № 2020115605 ; заявл. 11.05.2020 ; опубл. 08.04.2021.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич

Зверовщиков

доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Технологии и оборудование
машиностроения», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Дмитрий Алексеевич Борисов

ведущий инженер кафедры
«Технологии и оборудование
машиностроения», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: Steerman70098@yandex.ru

Dmitry A. Borisov

Leading engineer of the department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 621.833.15

ПЕРСПЕКТИВЫ КОНЦЕПЦИИ ПЕРЕДАЧИ НОВИКОВА В СОВРЕМЕННУЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЭПОХУ

Дмитрий Алексеевич Борисов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассмотрены преимущества и недостатки передачи Новикова. Предложены наиболее перспективные варианты ее применения. Изучен опыт преодоления недостатков, свойственных передачам этого типа.

Ключевые слова: зубчатое колесо, передача Новикова, тороидальная передача, червячная передача, упрочнение чеканкой

PROSPECTS FOR NOVIKOV'S TRANSMISSION CONCEPT IN THE MODERN TECHNOLOGICAL ERA

Dmitry A. Borisov

Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article discusses the advantages and disadvantages of the Novikov transmission. The most promising applications of this type of transmission are proposed. The article also examines the experience of overcoming the disadvantages of this type of transmission.

Keywords: gear wheel, Novikov transmission, toroidal transmission, worm transmission, hammering hardening

В настоящее время перед предприятиями встают задачи по увеличению производительности обработки деталей, в связи с чем резко возрастают нагрузки на силовые элементы и передаточные звенья привода металлорежущих станков. В настоящее время в качестве таковых применяются передачи с эвольвентным зацеплением. При всех их преимуществах, у такого рода передач есть один существенный недостаток: повышение несущей способности ограничено конструктивно и приводит к снижению ресурса зубьев зубчатых колес этого вида.

Поиск решения этой проблемы затрагивает ряд отраслей техники. Одним из выходов является применение роликового зацепления: подобного рода передаточные механизмы обладают большей износостойкостью, выдерживают большие нагрузки, но, применительно к станочному оборудованию, устройства, построенные по данному принципу, широкого применения не нашли. Основная причина – роликовые передачи обеспечивают меньшую плавность хода по сравнению с зубчатыми передачами, а для станков, к которым предъявляются требования точной и прецизионной обработки деталей подобное отклонение от требований недопустимо. Еще одна особенность роликовых передач – они требуют практически постоянного контроля, что в условиях масштабного промышленного производства реализовать достаточно сложно и накладно [1].

Известно применение еще одного вида зубчатых передач, имевших распространение вплоть до 70-х годов XX столетия в условиях серьезных ударных и переменных нагрузок на механизмы (большегрузные самосвалы, буровые установки и т.п.; в станкостроении и в то время широкого применения не находили), но впоследствии вытесненных.

Речь идет о косозубых передачах Новикова. Косозубая передача при тех же массогабаритных параметрах, что и эвольвентная, способна выдерживать вдвое большие нагрузки. Это достигается за счет того, что при эвольвентном зацеплении оба зуба зубчатой пары соприкасаются выпуклыми сторонами, контакт происходит по линии (от одного края зуба к другому), и через эту линию и передается усилие [2].

При косозубом зацеплении выпуклая часть зуба одного колеса зубчатой пары соприкасается с вогнутой стороной зуба другого колеса зубчатой пары. Контакт происходит не по линии, а по поверхности. Что и обуславливает способность косозубой передачи передавать большие нагрузки [1].

Рассмотрим два варианта развития концепции косозубого зацепления.

Вариант первый это «Винтовая передача с зацеплением Новикова».

Передача, являющаяся развитием классической червячной, в которой оба элемента спроектированы под зацепление Новикова, но с перекрещивающимися валами. Ведущее звено («червяк») имеет винтовую поверхность, образованную дугами окружности (как у зуба Новикова), ведомое звено («колесо») имеет зубья, также спроектированные по принципу Новикова, но рассчитанные на зацепление с этим конкретным винтом.

В качестве второго варианта рассмотрим зубчатую тороидальную передачу с зацеплением Новикова.

Это передача с перекрещивающимися валами (до 90°), где ведущее звено – это тороидальное зубчатое колесо, зубья которого расположены на его внутренней поверхности и имеют профиль, рассчитанный по принципу Новикова (т.е. их боковая поверхность), а ведомое звено – это коническое или цилиндро-тороидальное зубчатое колесо, зубья которого также имеют профиль Новикова.

Однако для подобных передач характерны ряд проблем, связанных с технологичностью (сложность изготовления профиля, высокая точность межосевого расстояния, взаимозаменяемость пар).

Проблемы, описанные выше, могут решаться на современном уровне развития технологий и конструктивных решений. Снижение жесткости допуска на межосевые расстояния решается путем придания радиусу кривизны вогнутого зуба несколько большего значения, чем на выпуклом зубе, что компенсирует возможные погрешности расположения осей зубчатой пары [3]. При этом также формируется более существенная масляная пленка на поверхности зубьев. Косозубое зацепление передачи при этом потребует, все же большего периода приработки, увеличивая ресурс зубчатой пары [4].

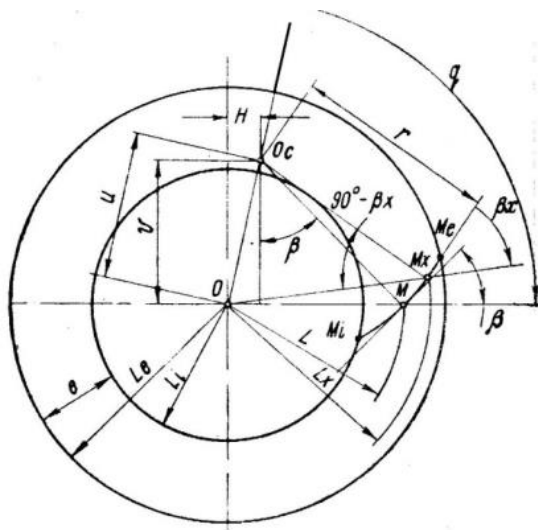


Рис. 1. Сечение по начальной поверхности производственного конического колеса

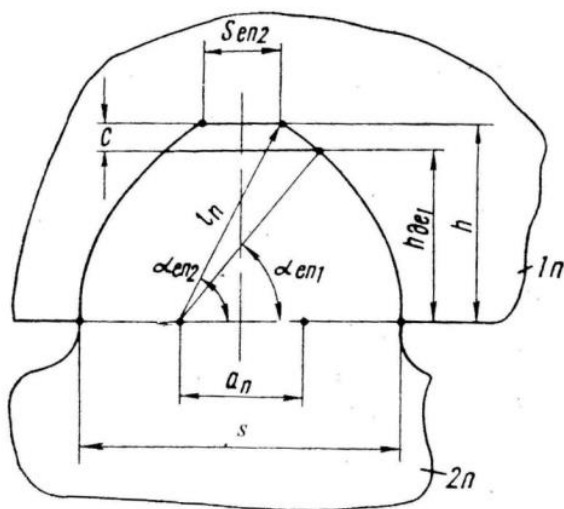


Рис. 2. Зубья производящих колес в нормальном сечении

Упрочнение зубчатых колес передачи Новикова осуществляется чеканкой, что повышает усталостную прочность на изгиб на 45–60 % [5].

Таким образом, основной проблемой для станкостроения является сложность формообразования зубьев передач Новикова. В работах М. Л. Новикова имеются основные рекомендации по определению количества зубьев колес косозубого зацепления и их геометрической формы.

При эвольвентном зацеплении увеличение количества зубьев колеса способствует повышению плавности работы зубчатой пары, а при косозубом зацеплении количество зубьев столь принципиального значения не имеет: плавность хода от количества зубьев колеса не зависит, подрезания не происходит. По опыту эксплуатации достаточное

количество зубьев – 9 [6]. Проектный расчет геометрии выглядит следующим образом.

Ширина венца зуба принимается равной:

$$b = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{3} \right) L_e,$$

где L_e – радиус зубчатого колеса по его вершинам.

Радиус кривизны профиля зуба определяется из условия, что данный радиус равен длине образующей, оформляющей профиль зуба: $r = 1$.

При этом bb_1 – это активный участок соприкосновения профилей ведущего и ведомого колес, ψ_1 – угол, ограничивающий отрезок bb_1 .

Отсюда связь между длиной отрезка bb_1 и размером $r = 1$:

$$|bb_1| = 2\pi l \frac{\psi_1}{2\pi} = l\psi_1.$$

Длина отрезка bb_1 выбирается из условий усилий, действующих при передаче крутящего момента.

Высота зуба зубчатого колеса с косозубым зацеплением определяется по формуле:

$$h = l \sin \alpha_{en2},$$

где угол α определяется по формуле

$$\cos \alpha = \frac{a_n + S_{en2}}{2l},$$

где a_n – расстояние между центрами кривизны противоположных профилей зуба в нормальном сечении:

$$a_n = 2l - S,$$

где S – ширина зуба у основания.

Таким образом, большинство проблем связанных с применением косозубых передач в станочном оборудовании, решаемы, а преимущества, которые дает этот тип передачи в особо сложных условиях работы металлообрабатывающих станков, вполне очевидны.

Список литературы

1. Чепанов А. Н. Классификация и материалы зубчатых передач // Нефит : сб. материалов науч.-практ. конф. студентов и магистрантов НГПУ. Н. Новгород : НГПУ, 2008. Вып. 5. С. 136.

2. Патент 2793981 С1 Российская Федерация, МПК F16H 55/08. Зубчатая передача смешанного зацепления силового редуктора / Кузин П. В.,

Зверовщиков В. З., Нестеров С. А., Зверовщиков А. Е. № 2022122813 ; заявл. 24.08.2022 ; опубл. 11.04.2023. EDN: KBOISZ

3. Лившиц Г. А., Соломин Л. Н. Повышение точности быстроходных зубчатых передач притиркой. М. : Филиал Всесоюзного института научной и технической информации, 1959. 30 с.

4. Москатов К. А., Лесная В. И. Повышение долговечности быстроходных зубчатых передач. М. : Филиал Всесоюзного института научной и технической информации, 1957. 27 с.

5. Зайцев Г. З. Способ увеличения долговечности зубчатых колес с зацеплением Новикова. М. : Центральный институт технико-экономической информации, 1961. Вып. 16. С. 103–111.

6. Бадаев А.М. Теоретические основы нарезания зубьев конических колес с зацеплением Новикова // Опыт применения зубчатых передач с зацеплением Новикова. М. : Центральный институт технико-экономической информации, 1961. Вып. 16. С. 7–47.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Алексеевич Борисов
ведущий инженер кафедры
«Технологии и оборудование
машиностроения», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: Steerman70098@yandex.ru

Dmitry A. Borisov
Leading engineer of the department
of technologies and equipment of
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 621.9

ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

**Александр Евгеньевич Образцов¹,
Владимир Михайлович Утенков²,
Павел Михайлович Кузнецов³**

¹АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», Москва, Россия

^{1,2}Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³Московский авиационный институт (национальный
исследовательский институт), Москва, Россия

Аннотация. Традиционные методы лезвийной обработки имеют ряд существенных недостатков, такие как значительное тепловыделение, приводящее к износу инструмента и деформациям, возникновение вибраций, ухудшающих точность,

проблемы, связанные с стружкообразованием и ее отводом. Перспективным подходом к преодолению этих ограничений является метод резания с применением осциллирующих движений. Его сущность заключается в наложении на режущий инструмент или заготовку колебаний заданной частоты и амплитуды, что преобразует непрерывный процесс в периодический. Данный механизм обеспечивает следующие положительные эффекты: снижение температуры в зоне резания, эффективное демпфирование паразитных вибраций, улучшение процесса дробления и удаления стружки, расширение диапазона допустимых параметров обработки. Совокупность этих эффектов позволяет существенно улучшить ключевые технологические показатели: повысить качество и точность обрабатываемых поверхностей, увеличить производительность и ресурс режущего инструмента.

Ключевые слова: вибрационная обработка, технологии вибрационного резания, колебательное резание, прерывистое резание, осциллирующие движения, управляемые колебания, ультразвуковое резание, повышение эффективности обработки

EDGE CUTTING MACHINING USING OSCILLATING MOTIONS AS A WAY TO IMPROVE ITS QUALITY

Alexander E. Obraztsov¹, Vladimir M. Utenkov²,
Pavel M. Kuznetsov³

¹VNIINSTUMENT, Moscow, Russia

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Moscow Aviation Institute (National Research Institute) Moscow, Russia

Abstract. Traditional edge cutting machining have a number of significant disadvantages, such as significant heat generation, leading to tool wear and deformation, the occurrence of vibrations that impair accuracy, and problems associated with chip formation and chip removal. A promising approach to overcoming these limitations is the oscillating motion cutting method. Its essence consists in applying vibrations of a given frequency and amplitude to a cutting tool or workpiece, which transforms a continuous process into a periodic one. This mechanism provides the following positive effects: reducing the temperature in the cutting area, effective damping of parasitic vibrations, improving the crushing and chip removal process, and expanding the range of acceptable processing parameters. The combination of these effects makes it possible to significantly improve key technological indicators: improve the quality and accuracy of the treated surfaces, increase productivity and life of the cutting tool.

Keywords: vibration processing, vibration cutting technologies, oscillatory cutting, intermittent cutting, oscillating movements, controlled vibrations, ultrasonic cutting, increased processing efficiency

Введение

Изготовление высокоточных деталей для станкостроения, аэрокосмической отрасли и оптики представляет собой сложную задачу, поскольку требует высокоточного оборудования и контроль режущего

инструмента. Традиционные методы обработки, как труднообрабатываемых металлов, так и оптических материалов (стекло, кристаллов) сталкиваются с технологическими ограничениями на пути повышения производительности.

Одним из перспективных подходов в повышении производительности и качества получаемой поверхности является вибрационное резание в ультразвуковом диапазоне. Ультразвуковая вибрационная обработка, в ходе которой режущему инструменту или заготовке сообщаются высокочастотные колебания, позволяет не только существенно повысить производительность, но и сохранить высокое качество поверхности. Данная технология успешно применяется в токарной обработке, сверлении и фрезеровании, как металлов, так и оптических компонентов [1].

Ключевым преимуществом метода является значительное увеличение стойкости инструмента. Например, при обработке натриево-известкового стекла алмазный инструмент демонстрирует незначительный износ после 59 метров резания, в то время как традиционные методы быстро выводят его из строя. Исследования показывают, что износ при вибрационной обработке менее критично влияет на качество поверхности благодаря равномерному распределению нагрузок и отсутствию повреждений режущей кромки [2].

Кроме того, применение данного способа позволяет увеличить срок службы твердосплавного инструмента в 20 раз при обработке стеклокерамики и значительно снизить износ при работе с нержавеющей сталью [3, 4]. Это делает метод особенно эффективным для обработки хрупких и труднообрабатываемых материалов, открывая возможности для выполнения ранее недоступных операций.

Обработка с применением осциллирующих движений является частным случаем управляемого вибрационного резания, где колебательные движения инструмента носят постоянный характер, с заданной периодичностью и прерывистым контактом между заготовкой и режущей кромкой.

Резание с применением колебательных движений.

В процессе резания, с применением осциллирующих движений, инструменту сообщаются колебания заданной частоты, формы и амплитуды, что создает прерывистый характер резания с циклическим контактом между инструментом и материалом. Применение колебаний с регулируемой частотой и амплитудой приводит к значительному улучшению качества обработанной поверхности, снижению вибраций и ударных нагрузок, уменьшению сил резания и повышению стойкости инструмента [5].

Особенно эффективна эта технология для обработки труднообрабатываемых материалов, где она обеспечивает улучшение качества поверхности и снижение силовых нагрузок. Проблема обработки хрупких материалов связана с их высокой чувствительностью к изменению глубины резания, что обусловлено низкой вязкостью разрушения. Пример обработки кремния в работе [6] наглядно демонстрирует это, где при увеличении глубины резания на 5 – 10 мкм привело к образованию микротрещин.

Ключевым параметром при обработке хрупких материалов является критическая толщина стружки, определяющая переход от пластичного резания к хрупкому разрушению. Исследования [7–10] показывают, что применение обработки с колебательными движениями позволяет значительно увеличить эту критическую толщину. Различают два основных типа колебательных воздействия: в одном направлении (1D) и осциллирующее (в двух направлениях 2D) резание. Хотя 2D-обработка требует более сложного оборудования, но она обеспечивает лучше производительность, качество поверхности, меньшее усилие резания и износ инструмента. 1D обработка, хотя и имеет выше шероховатость обработанной поверхности, широко применяется в прецизионной обработке при черновой или получистовой операции и позволяет снижать осевое усилие на 20 % по сравнению с традиционными методами.

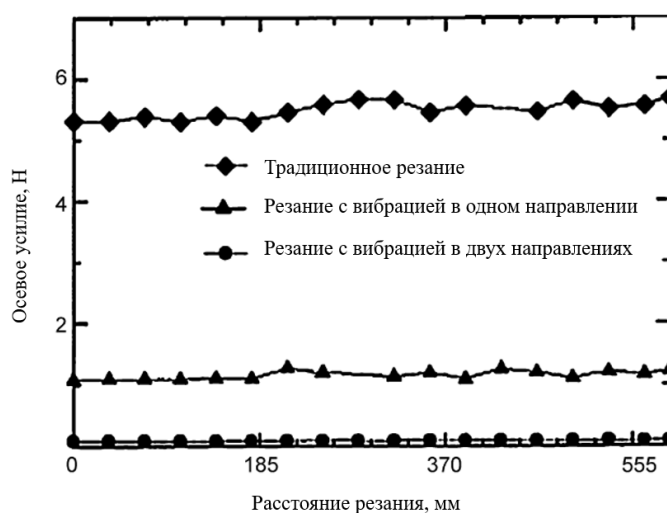


Рис. 1. Средняя осевая сила при обычном резании, 1D и 2D обработки с частотой $f = 18,66$ кГц [11]

Обработка с применением осциллирующих движений обеспечивает значительное снижение усилий резания по сравнению с традици-

онными методами. Это достигается за счет эллиптической траектории движения инструмента, которая изменяет геометрию стружки и характер взаимодействия между инструментом и материалом.

Повышая производительность за счет увеличения стойкости инструмента, толщины срезаемого слоя 1D-обработка все же имеет ключевой недостаток, проявляемый на низких частотах, в виде повышении шероховатости [9].

Исследование [12] сравнивало три метода обработки титанового сплава: традиционное резание, резание с колебаниями в одном направлении и с эллиптической траекторией (осциллирующее движение) инструмента. Микроскопия показала, что традиционный метод приводит к хаотичной адгезии частиц и образованию борозд. Колебания в одном направлении устранили адгезию, но оставили периодический микрорельеф. Обработка с применением осциллирующих движений продемонстрировала наилучшее качество поверхности благодаря минимальному тепловыделению и подавлению паразитных вибраций.

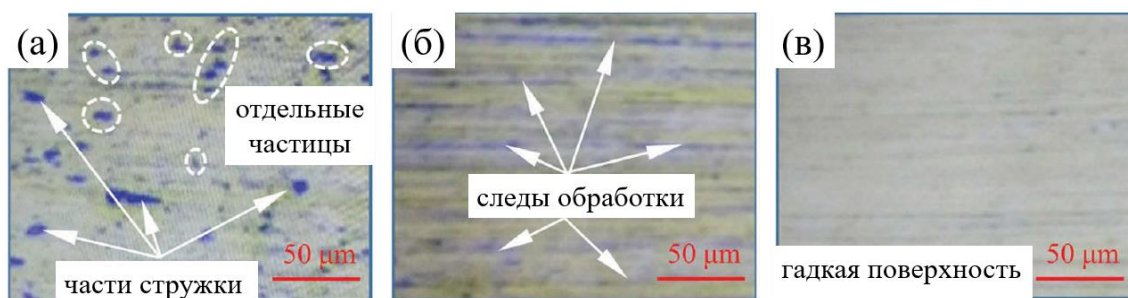


Рис. 2 Качество обработанной поверхности образцов:
а – традиционное резание; б – резание с колебаниями в одном направлении;
в – обработка с применением осциллирующих движений [12]

Анализ стружки подтвердил преимущества методов обработки с применением колебательных движений. При традиционной обработке наблюдалась стружка с зазубринами и микродефектами, свидетельствующими о высоких нагрузках и температуре. Колебания в одном направлении обеспечили гладкую стружку и снижение сил резания на 25–40 %, а температуры на 15–20 %. Осциллирующие движения привели к уменьшению шага спирали до 138 мкм.

Качественное преобразование стружки под воздействием колебательных движений напрямую связано со снижением силовых и температурных нагрузок. Периодическое отделение стружки от передней поверхности инструмента сокращает зону пластического контакта, что эффективно подавляет адгезию и формирования дефектов.

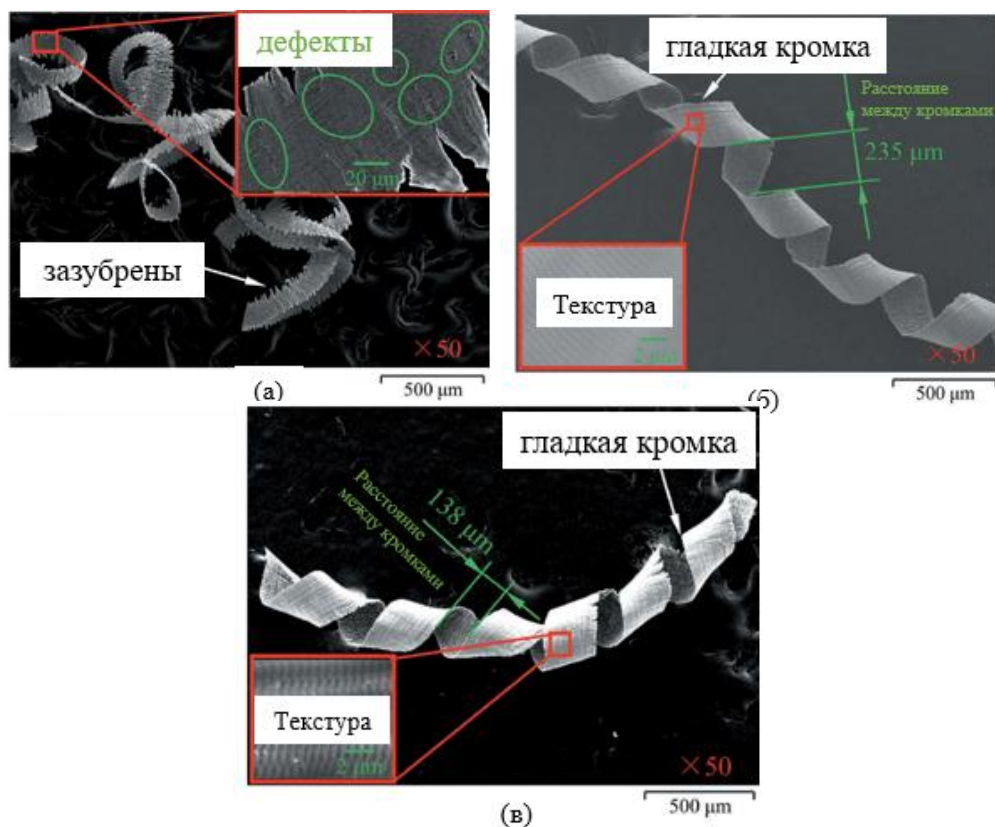


Рис. 3. Результаты обработки:

а – традиционное резание; б – резание с колебаниями в одном направлении;
в – обработка с применением осциллирующих движений [12]

Уменьшение шага скручивания стружки при использовании эллиптической траектории движения инструмента по сравнению с колебаниями в одном направлении служит подтверждением повышения эффективности теплоотвода и снижения уровня остаточных напряжений.

Заключение

Обработка с применением колебаний в ультразвуковом диапазоне представляет собой перспективную технологию для высокоточной обработки широкого спектра материалов – от труднообрабатываемых металлов до хрупких оптических компонентов. Ключевыми преимуществами метода являются значительное снижение силовых нагрузок и температурного воздействия в зоне резания, повышение стойкости режущего инструмента и улучшение качества обрабатываемой поверхности.

Экспериментально доказано, что применение ультразвуковых колебаний, особенно по эллиптической траектории, позволяет устранить адгезию, минимизировать образование микротрещин и снизить шероховатость поверхности.

Внедрение данной обработки в промышленные процессы позволит повысить эффективность производства высокоточных деталей для станкостроения, аэрокосмической отрасли, оптического приборостроения и других передовых секторов промышленности.

Список литературы

1. Xue-Hui Shen, Jian-Hua Zhang, Hua Li. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. Vol. 64. P. 41–49.
2. Moriwaki T., Shamoto E., Inoue K. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration // *Cirp Annals – Manufacturing Technology*. 1992. Vol. 41. P. 141–144.
3. Weber H., Herberger J., Pilz R. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool // *Annals of the CIRP*. 1984. Vol. 33. P. 85–87.
4. Xiao M., Karube Shu, Soutome T., Sato K. Analysis of chatter suppression in vibration cutting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. Vol. 42. P. 1677–1685.
5. Xin Quan Zhang, Shamsul Arefin, Senthil Kumar, Kui Liu. Elastic and plastic chip deformation mechanism in 1D vibration-assisted metal cutting // *4th CIRP Conference on Surface Integrity*. 2018. Vol. 71. P. 309–312. doi: 10.1016/j.procir.2018.05.027
6. Chavoshi S. Z., Goel S., Luo X. Influence of temperature on the anisotropic cutting behavior of single crystal silicon: A molecular dynamics simulation investigation // *Journal of Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 23. P. 201–210. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.06.009
7. Kim J. D., Choi I. H. Micro surface phenomena of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics // *Journal of Materials Processing Technology*. 1997. Vol. 68. P. 89–98. doi: 10.1016/s0924-0136(96)02546-0
8. Xiaobo Wang, Chaosheng Song, Jinglin Tong [et al.]. Study on the influence of ultrasonic-assisted cutting on the surface quality of CFRP // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 131. P. 1989–2000. doi: 10.21203/rs.3.rs-2195027/v1
9. Jun-Yun Chen, Tian-Ye Jin, Xi-Chun Luo. Key machining characteristics in ultrasonic vibration cutting of single crystal silicon for micro grooves // *Advances in Manufacturing*. 2019. Vol. 7. P. 303–314. doi: 10.1007/s40436-019-00263-4
10. Brehl D. E., Dow T. A. Review of vibration-assisted machining // *Precision Engineering*. 2008. Vol. 32. P. 153–172. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.08.003
11. Ma C., Shamoto E., Moriwaki T. Study on the Thrust Cutting Force in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting // *Mater. Sci. Forum*. 2004. Vol. 471. P. 396–400. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.471-472.396
12. Rongkai Tan, Xuesen Zhao, Shuo Zhang, Xicong Zou. Study on ultra-precision processing of Ti-6Al-4V with different ultrasonic vibration-assisted cutting modes // *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 34. P. 1380–1388.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Образцов

начальник конструкторского отдела,
АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»
(Россия, г. Москва, ул. Большая
Семеновская, 49); аспирант,
Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (Россия,
г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)
e-mail: obrazcow2@mail.ru

Alexander E. Obratsov

Head of the design department,
VNIINSTUMENT (49 Bolshaya
Semyonovskaya street, Moscow,
Russia); postgraduate student,
Bauman Moscow State Technical
University (5 2-ya Baumanskaya
street, Moscow, Russia)

Владимир Михайлович Утенков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Металлорежущие
станки», Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (Россия,
г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)
e-mail: utencov@bmstu.ru

Vladimir M. Utenkov

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the department
of metal-cutting machines, Bauman
Moscow State Technical University
(5 2-ya Baumanskaya Moscow,
Russia)

Павел Михайлович Кузнецов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Системное
моделирование и автоматизированное
проектирование», Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, ул. Волоколамское
шоссе, 4)
e-mail: profpol@rambler.ru

Pavel M. Kuznetsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of system
modeling and computer-aided design,
Moscow Aviation Institute (National
Research University) (4 Volokolamsk
highway, Moscow, Russia)

УДК 621.815

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЕВИДНОГО ФРИКЦИОННО-ПРОФИЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Антон Александрович Грошев¹,
Игорь Иванович Воячек²**

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматриваются особенности спиралевидных фрикционно-профильных соединений (СФПС), которые изучены недостаточно. СФПС сочетает преимущества цилиндрических соединений с натягом (СШН) и профильных соединений, обеспечивая оптимальное значение натяга и надежную передачу крутящего

момента. Цель работы – обоснование применения известной методики проектирования ССН для определения параметров СФПС. С учетом конструктивных особенностей СФПС методом конечных элементов определено контактное давление на спиралевидных сопрягаемых поверхностях. Установлено, что величины контактного давления в СФПС и в подобном цилиндрическом соединении с натягом близки по значению. Это подтверждает возможность использования методики проектирования ССН для СФПС с учетом конструктивных и технологических различий.

Ключевые слова: спиралевидное фрикционно-профильное соединение, конструктивные параметры, процесс сборки, натяг, контактное давление

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A SPIRAL FRICTION-PROFILE JOINT

Anton A. Groshev¹, Igor I. Voyachek²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article discusses the features of spiral friction-profile compounds (SFPS), which have not been sufficiently studied. SFPS combines the advantages of cylindrical interference connections (SSNs) and profile connections to ensure optimal interference value and reliable torque transmission. The purpose of the work is to substantiate the use of the well-known DC design technique for determining the parameters of the SPS. Taking into account the design features of the SFS, the contact pressure on the spiral mating surfaces was determined by the finite element method. It has been established that the values of contact pressure in the SFPS and in a similar cylindrical connection with interference are close in value. This confirms the possibility of using the DC design methodology for SFS, taking into account design and technological differences.

Keywords: spiral friction-profile connection, design parameters, assembly process, interference, contact pressure

Среди разнообразных конструкций неподвижных соединений деталей технологического оборудования [1] перспективным является применение профильных соединений, в частности, спиралевидного фрикционно-профильного соединения с натягом [2–6].

Спиралевидное фрикционно-профильное соединение с натягом (СФПС) (рис. 1) представляет из себя профильное соединение с криволинейным профилем сопрягаемых поверхностей, выполненным по спирали Архимеда. Профиль выполняется в виде повторяющихся секторов, связанных между собой переходным участком [8]. Форма профиля позволяет выполнить затягивание соединения с формированием натяга. Оно имеет признаки как профильного соединения, так с соединения с натягом, однако его свойства не изучены в полной мере.

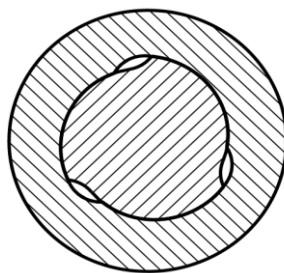


Рис. 1. Поперечное сечение СФПС

Как известно, параметром, определяющим несущую способность фрикционных соединений с натягом, является контактное давление. С целью определения возможности использования известной методики проектирования [1] цилиндрического ССН для СФПС был проведен расчет контактного давления в цилиндрическом ССН при радиальном натяге $N_R^p = 0,033$ мм и соответствующих геометрических и физико-механических параметрах. Посадочный диаметр $D = 29$ мм, вал сплошной, наружный диаметр втулки 50 мм. Длина соединения в осевом направлении равна $l = 20$ мм. Коэффициент трения в зоне контакта задавался равным $f = 0,1$. Параметры материала вала и втулки (сталь 35Х с закалкой): модуль упругости – $2,14 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона – 0,29, предел текучести – $7,35 \cdot 10^8$ Н/м².

Получена итоговая формула, связывающая номинальное контактное давление в середине ССН по длине (в МПа) и диаметральный натяг N (в мм):

$$p_k = \frac{N}{D \cdot 1,407} 10^5 = \frac{0,066}{29 \cdot 1,407} 10^5 = 161,8 \text{ МПа.}$$

Для сравнительного определения контактного давления в СФПС проведено конечноразностное моделирование напряженно-деформированного состояния соединения после сборки с радиальным натягом $N_R^p = 0,033$ мм. Максимальный и минимальный радиусы спиралевидного сектора трехсекторного соединения $R_{\max} = 15$ мм и $R_{\min} = 14$ мм. Остальные параметры соответствуют цилиндрическому ССН. Значения контактного давления фиксировались в среднем сечении соединений по длине спиралевидных участков в 10 точках.

Дополнительно определялось изменение контактного давления при нагружении СФПС эксплуатационным крутящим моментом $M_{кр} = 200$ Нм в прямом направлении (затягивание соединения) и в обратном направлении.

Аналогичное моделирование проведено и для ССН.

Исследуемая модель СФПС и результаты моделирования представлены на рис. 2–4 и в табл. 1.

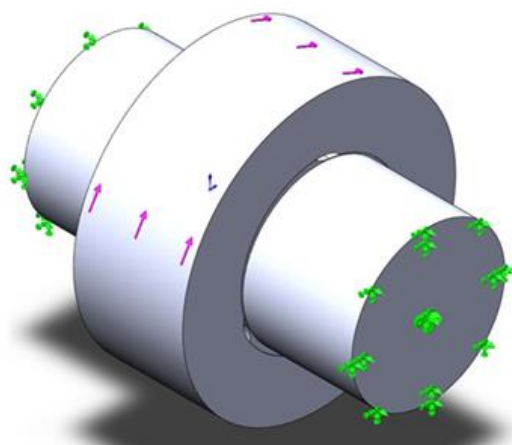


Рис. 2. Модель СФПС, исследуемая методом конечных элементов

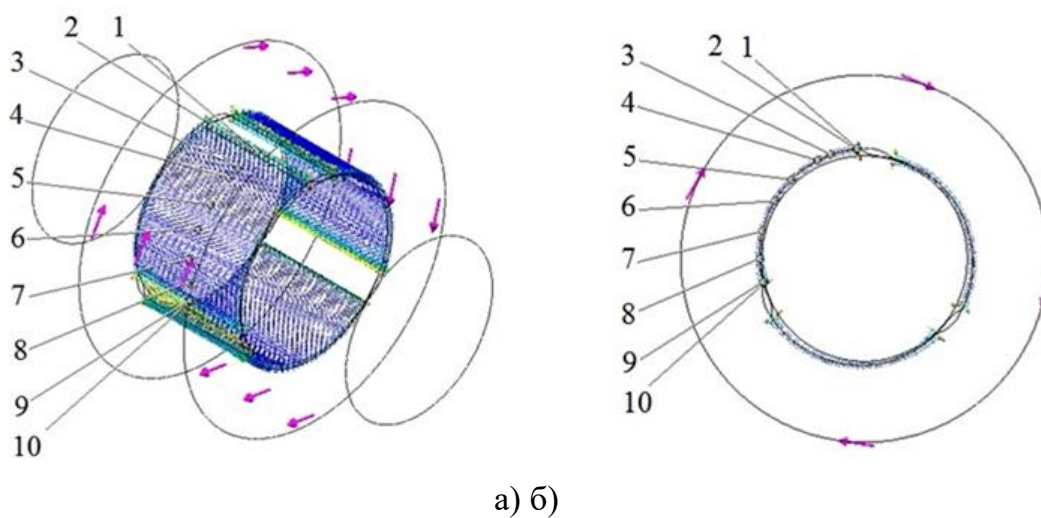


Рис. 3. Результаты определения контактного давления в СФПС:
а) по всей площади контакта;
б) в середине соединения по всей длине спиралевидного сектора

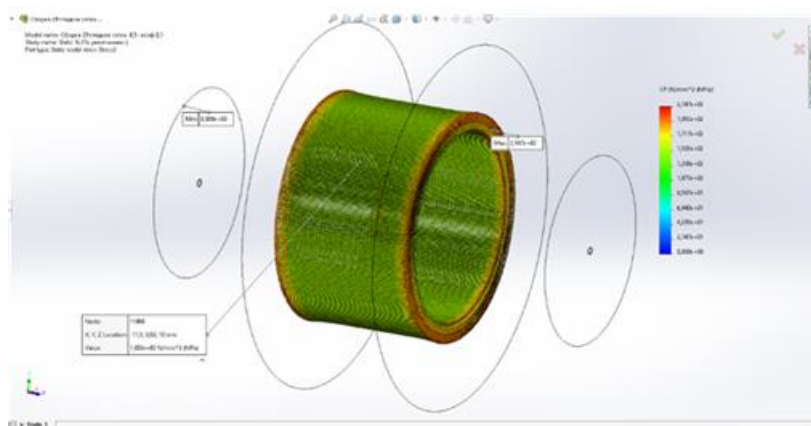


Рис. 4. Результаты определения контактного давления в ССН

**Распределение контактного давления по длине
спиралевидных секторов**

Условия нагруже- ния крутя- щим мо- ментом	Контактное давление в точке, МПа									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M = 0$	501,5	289,9	172,4	157,3	155,0	158,9	161,6	169,8	364,6	756,7
$M = 200\text{Нм}$ (прямое)	503,4	293,1	177,1	164,2	157	160	163,3	170,4	365,2	752,4
$M = 200\text{Нм}$ (обратное)	514,2	278,9	168,2	156,6	150,6	154,3	159,1	168,7	361,3	735,9

Величина контактного давления для ССН при $M = 0 - p = 160\text{МПа}$ и при $M = 200\text{МПа} - p = 162\text{МПа}$.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Отклонения величины контактного давления на большей части спиралевидных участков СФПС не превышают 5 % от значений в цилиндрическом ССН, поэтому применение методики расчета ССН для СФПС с учетом особенностей его конструкции и технологии изготовления целесообразно.

2. У СФПС краевой эффект проявляется не только в осевом направлении соединения, но и в поперечном сечении на краях спиралевидных участков (таблица 1). Данный эффект необходимо учитывать при проектировании соединений. Однако превышение предела текучести в крайних точках спиралевидного сектора допустимо, так как местная пластическая деформация не приводит к существенному снижению несущей способности СФПС.

3. Величина контактного давления при приложении крутящего момента в середине спирали изменяется несущественно в пределах $\pm 3...5\%$ (плюс – в направлении затягивания, минус – в обратном направлении). Это связано с формой спиральных секторов и с изменением напряженно-деформированного состояния деталей при приложении крутящего момента.

Список литературы

1. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2006. 42 с.

2. Ильиных В. А. Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 10–17. doi: 10.26731/1813-9108.2021.1(69)

3. Рожкова Е. А. Теория и методы проектирования профильных неподвижных неразборных соединений с равноосным контуром с натягом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2014. 20 с.

4. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Лытаев Д. В. [и др.]. Исследование конструкторско-технологических факторов, влияющих на функциональные свойства спиралевидных соединений деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 74–84. doi: 10.21685/2072-3059-2022-3-8

5. Voyachek I., Kochetkov D., Baranov I., Slashchev E., Voyachek O. The Influence of the Design Parameters and Technological Factors on Functional Properties of the Spiral Joints of the Parts // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 509. P. 751–760. doi: 10.1007/978-3-031-11058-0_75

6. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Грошев А. А. Особенности формирования контакта деталей при сборке спиралевидного фрикционно-профильного соединения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4 (164). С. 32–41. doi: 10.26730/1999-4125-2024-4-32-41 EDN: CDMIPG

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Александрович Грошев
аспирант, Пензенский
государственный университет,
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: groshev.anton.a@gmail.com

Anton A. Groshev
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Игорь Иванович Воячек
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek
Doctor of technical sciences,
professor, professor of the department
of technologies and equipment of
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Никита Тимурович Юсупов¹,
Игорь Иванович Воячек²

¹ООО «Техносервис», Пенза, Россия

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлены результаты комплексного контроля функциональных свойств защитных покрытий на основе карбида хрома и карбида вольфрама, нанесенных на стальные подложки, имитирующие рабочие поверхности пробок шаровых кранов.

Ключевые слова: шаровой кран, пробка, покрытия, карбид хрома, карбид вольфрама, микротвердость, адгезия

CONTROL OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF CARBIDE COATINGS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT PARTS

Nikita T. Iusupov¹, Igor I. Voyachek²

¹LLC "Technoservice", Penza, Russia

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive control of the functional properties of protective coatings based on chromium carbide and tungsten carbide applied to steel substrates that simulate the working surfaces of ball valve plugs.

Keywords: ball valve, ball, coatings, chromium carbide, tungsten carbide, microhardness, adhesion

К современному технологическому оборудованию предъявляются повышенные требования по износостойкости, твердости, коррозионной стойкости поверхностей деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации при действии знакопеременных нагрузок и агрессивных сред, например, деталей трубопроводной арматуры и др.

Наиболее эффективно перечисленные требования достигаются нанесением покрытий из твердосплавных материалов, таких как карбид вольфрама и карбида хрома, нанесенных газотермическим способом. Часто после нанесения покрытий из твердосплавных материалов требуется их шлифование для обеспечения геометрических характеристик поверхностей (шероховатости, волнистости, отклонений формы),

то есть при определении оптимальной толщины покрытия необходимо обеспечить припуск на обработку.

В связи с тем, что к изделиям запорной арматуры предъявляются высокие требования по надежности, актуальным является достоверный контроль качества покрытий, обеспечивающих износостойкость и герметичность соединений деталей в период длительной эксплуатации.

В данной работе представлена система контроля свойств газотермических покрытий из карбида вольфрама и карбида титана, при этом полученные результаты позволяют оценить качество покрытий с точки зрения предъявляемых функциональных требований.

Для проведения исследований были изготовлены плоские образцы из стали 09Г2С, которая часто применяется в конструкциях запорной арматуры, размерами $180 \times 30 \times 1,5$ мм, на которые методами газопламенного напыления на установке высокоскоростного напыления (HVOF) были нанесены покрытия на основе карбида хрома и карбида вольфрама. Высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF) – нанесение сверхплотных защитных покрытий с высокими адгезионными характеристиками и специальными свойствами (стойкость к коррозии, износостойкость и т.д.) при изготовлении и ремонте деталей и узлов машин [1, 2, 7].

Образцы имели покрытия разной толщины: 100 мкм, 200 мкм, 300 мкм, 400 мкм, 500 мкм. Часть образцов после нанесения покрытий обрабатывалась шлифованием до $Ra = 0,63 - 0,8$ мкм. Обработка проходила на плоскошлифовальном станке алмазным кругом с зернистостью 40/28. Обрабатывалась средняя часть образца, которая деформировалась при контроле на изгиб.

Комплексный контроль функциональных свойств покрытий включал следующие измерения и испытания:

До шлифования покрытий

1. Контроль поверхностных трещин методом цветной дефектоскопии (ЦДС) ГОСТ 18442–80 [3]. Класс чувствительности II.

2. Металлографический контроль: определение толщины покрытия [4], оценка структуры и пористости покрытия на поперечных шлифах с применением металлографического микроскопа мод. 4ХС [5].

После шлифования покрытий

3. Измерение микротвердости – определение твердости по Викерсу при нагрузке в соответствии с ГОСТ 9450–76 [6].

4. Испытания на изгиб – качественная оценка адгезионной прочности сцепления покрытия с подложкой путем изгиба образца на 180° вокруг цилиндра диаметром 22,5 мм с последующим анализом области деформации [4].

При контроле ЦДС установлено, что трещины, поры, поверхностные дефекты на образцах с покрытиями отсутствуют. Металлографический контроль показал, что покрытия имеют неравномерную структуру. Неравномерность толщины покрытий варьируется от 10 до 40 мкм (табл. 1).

Таблица 1

Результаты контроля толщины покрытия

Карбид хрома		Карбид вольфрама	
Номинальное значение, мкм	Фактическое значение, мкм	Номинальное значение, мкм	Фактическое значение, мкм
100 мкм	125–135 мкм	100 мкм	75–100 мкм
200 мкм	200–225 мкм	200 мкм	175–230 мкм
300 мкм	250–300 мкм	300 мкм	270–325 мкм
400 мкм	375–400 мкм	400 мкм	375–420 мкм
500 мкм	500–550 мкм	500 мкм	400–500 мкм

Покрытия имеют высокую микротвердость: ~1650 HV для карбида хрома и ~1850 HV для карбида вольфрама, что соответствует требованиям для работы в условиях абразивного износа.

Испытания на изгиб показали удовлетворительную адгезию с материалом подложки обоих типов покрытий при толщине в 200 мкм, которая рекомендуется как оптимальная. При деформации на 180° вокруг оправки диаметром 22,5 мм наблюдалось некоторое растрескивание покрытий, характерное для хрупких материалов, однако отслаивания от подложки не происходило. Попытки поддевания покрытия острым лезвием в зоне изгиба не привели к отслаиванию, что свидетельствует о хорошей адгезии.

На рис. 1 и 2 представлены образцы с покрытием карбид вольфрама толщиной 200 мкм и 300 мкм, соответственно.



Рис. 1. Средняя часть образца с покрытием толщиной 200 мкм после изгиба

После изгиба образца с покрытием толщиной 300 мкм наблюдается растрескивание и отслаивание покрытия.



Рис. 2. Средняя часть образца с покрытием толщиной 300 мкм после изгиба

В результате можно сделать вывод, что предлагаемый комплекс измерения и исследования характеристик покрытий из твердосплавных материалов является достаточно информативным, чтобы сделать достоверный вывод о функциональном качестве покрытий.

Список литературы

1. Балдаев Л. Х., Калита В. И. Современные тенденции получения газотермических покрытий // Технология металлов. 2003. № 2. С. 37–43.
2. Балдаев Л. Х., Шестеркин Н. Г., Лупанов В. А., Шатов А. П. Особенности процессов высокоскоростного газопламенного напыления // Технология машиностроения. 2005. № 3. С. 31–34.
3. ГОСТ 18442–80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 2005.
4. ГОСТ 9.302–88 Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. М. : Изд-во стандартов, 2001.
5. Лончих П. А., Борюшкина С. А., Чарный С. М. Вибродиагностика и металлографический анализ как элемент обеспечения качества // Современные технологии. Моделирование. 2007. № 16. С. 370.
6. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М. : Изд-во стандартов, 1993.
7. ГОСТ 28844–90. Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. М. : Изд-во стандартов, 2004.

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Тимурович Юсупов

инженер-конструктор, ООО
«Техносервис» (Россия, г. Пенза, пр-кт
Победы, 75А); магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: yusupov.ekk@gmail.com

Nikita T. Iusupov

Design engineer, LLC
"Technoservice" (75A Pobedy
avenue, Penza, Russia); master
degree student, Penza State
University
(40, Krasnaya Street, Penza, Russia)

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of technologies and
equipment of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.7

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

**Ольга Алексеевна Лапко¹,
Светлана Игоревна Прач²**

^{1,2} Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. Современные технологические методы обработки деталей играют важную роль в производстве различных изделий. Рассматриваются основные методы, позволяющие создавать сложные детали из различных материалов. Эти методы обеспечивают высокую точность и качество обработки деталей.

Ключевые слова: методы обработки, электроэрозионная обработка, ультразвуковая обработка, электрохимическая, скайвинг

PROMISING MODERN TECHNOLOGICAL METHODS OF PARTS PROCESSING FOR MACHINE-TOOL BUILDING

Olga A. Lapko¹, Svetlana I. Prach²

^{1,2} Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

Abstract. Modern technological methods for machining parts play a vital role in the production of various products. This article examines the key methods for creating complex parts from various materials. These methods ensure high precision and quality of machining.

Keywords: processing methods, electrical discharge machining, ultrasonic machining, electrochemical, skiving

Для изготовления деталей применяются различные виды обработки. Механическая обработка является самой доступной и применяемой на сегодняшний день. Но такая обработка не всегда выгодна и эффективна. Некоторые изделия невозможно изготовить только при помощи механической обработки, тогда появляются новые методы, более экономичные, безопасные и эффективные.

Одним из современных технологических методов обработки металлов является электроэрозионная обработка (рис. 1). К заготовке, находящейся в жидком диэлектрике, и инструменту подключается источник постоянного тока, который генерирует кратковременные импульсы, проходящие через электроды. Создаваемая дуга легко прожигает металлическую поверхность, и так как она действует небольшой период времени, она не деформирует металл [1].

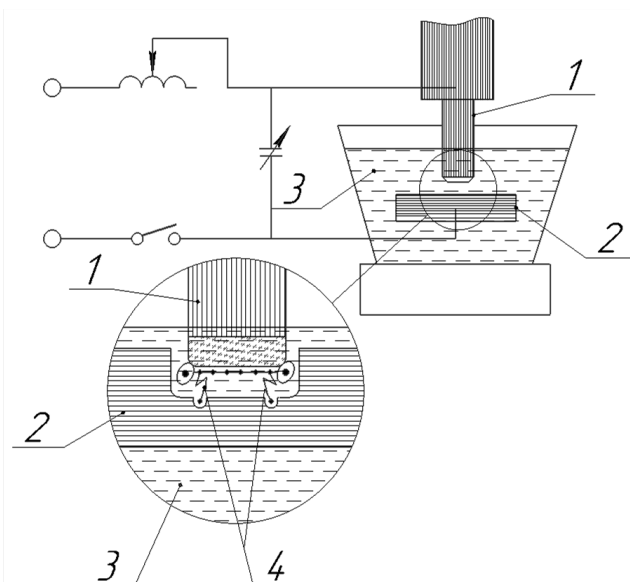


Рис. 1. Схема электроэрозионного метода обработки: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкий диэлектрик; 4 – электрические разряды

Благодаря данной обработке создаются достаточно сложные детали. Эта технология используется в машиностроении и авиастроении, при изготовлении мелких деталей для двигателей и турбин.

Следующий современный метод – это технология с использованием электролиза (рис. 2). Другими словами, это реакция, при которой ионы, которые получены от растворенного вещества, движутся к катоду и аноду в зависимости от того, положительно или отрицательно они заряжены.

Преимущество данного метода обработки в том, что можно обрабатывать любой металл любой формы. Также нужно отметить, что катод в процессе работы не изнашивается.

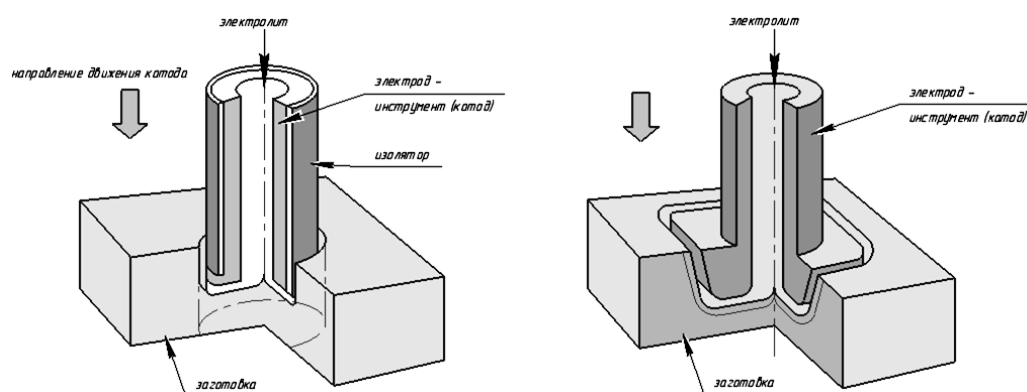


Рис. 2. Примеры электрохимической обработки

Гидроабразивная металлообработка (рис. 3) – это еще один современный метод обработки, принцип которого заключается в воздействии жидкости высокого давления на обрабатываемую поверхность.

Гидроабразивная металлообработка применяется в основном для повышения качества поверхности, снятия микронеровностей, очистки поверхности. Режущая струя может быть как с абразивными компонентами, так и без них. Абразивный материал, который содержится в эмульсии, постоянно обновляется, чтобы обеспечить качественный результат.

Данный вид обработки по сравнению с механической обработкой имеет преимущество, так как при механической обработке много материала уходит в стружку.

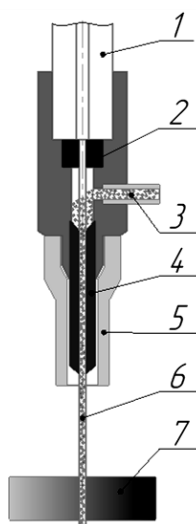


Рис. 3. Схема гидроабразивной обработки:

1 – подвод воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – подача абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя; 7 – разрезаемый материал

Лазерная обработка (рис. 4) – способ получения в заготовках отверстий малого диаметра повышенной точности. Во время теплового действия лазера на металл, прилегающие зоны интенсивно упрочняются.

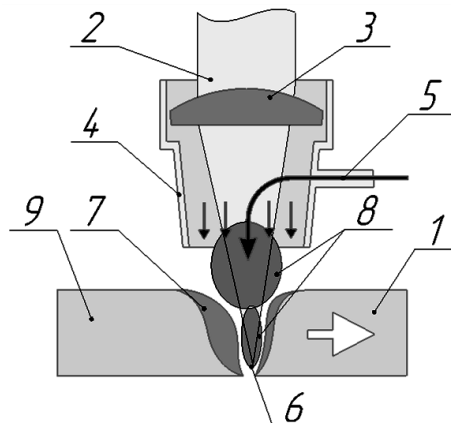


Рис. 4. Схема и общий вид установки для лазерной обработки:
 1 – обрабатываемый металл; 2 – лазерный пучок; 3 – фокусирующая линза;
 4 – сопло с потоком защитного газа; 5 – подача защитного газа;
 6 – парогазовый канал в металле; 7 – кристаллизационная ванна жидкого
 металла; 8 – лазерная плазма; 9 – кристаллизовавшийся металл

Лазерный луч способен обработать достаточно тугоплавкие материалы, например, молибден. Данный метод экономит энергию, повышает скорость производства и сокращает количество отходов [2].

3D-печать коренным образом меняет подход к производству металлических деталей. Эта технология позволяет быстрее создавать прототипы и разрабатывать более сложные конструкции, что важно для быстроразвивающихся компаний, которые, используя 3D-печать, могут быстро вносить изменения в дизайн, сокращая время производства и повышая инновационность продукции. 3D-печать позволяет изготавливать детали по индивидуальному заказу без использования сложных инструментов [3].

Следующий метод направлен на изготовление зубчатых колес. У зубчатых передач есть характерная особенность – сложность геометрической формы и взаимосвязь размерных параметров, которые должны быть выполнены достаточно точно. При изготовлении зубчатых колес наиболее трудоемкими и технологически сложными являются операции формообразования зубьев. Зубчатые колеса производятся различными методами, одним наиболее производительным и эффективным является скайвинг [4].

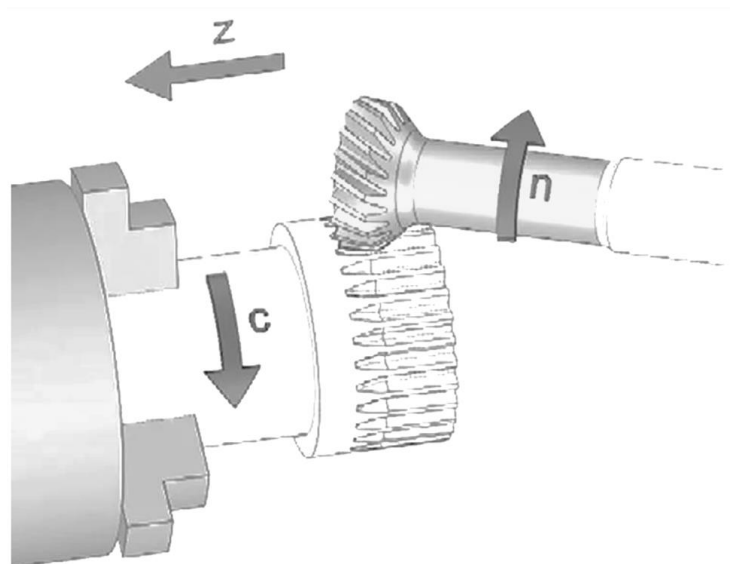


Рис. 5. Схема обработки скайвингом

Скайвинг – это процесс изготовления зубчатых колес с помощью специализированного режущего инструмента. Скайвинг позволяет выполнять обработку профиля зуба с получением высоких точностей, в особенности с применением инструмента со сменной твердосплавной головкой. В отличие от зубофрезерования, процесс формирования стружки при скайвинге происходит с изменением условий резания: в области выхода кромки из материала передний угол становится отрицательным; по этой причине метод обработки осуществляется за несколько проходов.

Анализ современных технологических методов обработки деталей показывает, что современные технологии обработки металлов непрерывно совершенствуются, на основе новейших достижений.

Список литературы

1. Тотай А. В., Нигоркин М. Н., Федоров В. П. Детали машин. Современные средства и прогрессивные методы обработки. М. : Юрайт, 2019. 288 с.
2. Рахматулаев А. Р. Оптимизация технологического процесса изготовления детали «Вал» конического редуктора КВС-1-0135000 / науч. рук. С. И. Прач // МИТРО 2024 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов (г. Гомель, 6 декабря 2024 г.). Гомель : ГГТУ имени П. О. Сухого, 2024. С. 184–185.
3. Дубоделова П. В. Проектирование 3D-модели металлорежущего инструмента с использованием графической системы ANSYS // Исследования и разработки в области машиностроения, энергии и управления : сб. ст. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. Гомель : ГГТУ имени П. О. Сухого, 2024. С. 268–271.

4. Таран А. В. Особенности технологии скайвинг для обработки зубчатых колес / науч. рук. О. А. Лапко // МИТРО 2023 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : тез. докл. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых (г. Гомель, 6 декабря 2023 г.). Гомель : ГГТУ имени П. О. Сухого, 2023. С. 94.

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Алексеевна Лапко

старший преподаватель кафедры
«Механика», Гомельский
государственный технический
университет имени П. О. Сухого
(Республика Беларусь, г. Гомель,
пр-кт Октября, 48)
e-mail: olya777@gstu.by

Olga A. Lapko

Senior lecturer of the department of
mechanics, Sukhoi State Technical
University of Gomel (48 Octiabria
avenue, Gomel, Republic of Belarus)

Светлана Игоревна Прач

старший преподаватель кафедры
«Механика», Гомельский
государственный технический
университет имени П. О. Сухого
(Республика Беларусь, г. Гомель,
пр-кт Октября, 48)
e-mail: peace@gstu.by

Svetlana I. Prach

Senior lecturer of the department of
mechanics, Sukhoi State Technical
University of Gomel (48 Octiabria
avenue, Gomel, Republic of Belarus)

УДК 621.813

ВЛИЯНИЕ АНАЭРОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Денис Викторович Кочетков¹,
Игорь Иванович Воячек²,
Александр Максимович Пучков³,
Ярослав Валентинович Власов⁴**

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования прочности и жесткости резьбовых соединений, собранных с анаэробными материалами и без них. Установлено, что эквивалентные напряжения у соединений, собранных с применением анаэробных материалов, существенно уменьшаются, следовательно, прочность и жесткость соединений повышаются.

Ключевые слова: резьбовое соединение, анаэробный материал, прочность, жесткость, метод конечных элементов

EFFECT OF ANAEROBIC MATERIALS ON THE STRENGTH AND RIGIDITY OF THREADED CONNECTIONS

Denis V. Kochetkov¹, Igor I. Voyachek²,
Alexander M. Puchkov³, Yaroslav V. Vlasov⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This article presents the results of a study examining the strength and rigidity of threaded connections assembled with and without anaerobic materials. It was found that equivalent stresses in connections assembled using anaerobic materials are significantly reduced, thereby increasing the strength and rigidity of the connections.

Keywords: threaded connection, anaerobic material, strength, stiffness, finite element method

Резьбовые соединения (РС) играют важную роль в обеспечении прочности и надежности различных технологических конструкций [1–6].

Неравномерное распределение эксплуатационной нагрузки по виткам резьбы приводит к разрушению соединений и конструкций технологического оборудования.

В настоящее время обеспечение эксплуатационных характеристик РС осуществляется преимущественно конструкторскими методами, при этом конструкция соединения усложняется, а себестоимость увеличивается. Однако следует отметить, что исключительно конструктивными подходами не всегда удастся решить задачу повышения эксплуатационных характеристик РС. Вместе с тем, существуют эффективные технологические методы, например, управление контактным взаимодействием сопрягаемых деталей за счет введения в зону контакта анаэробных материалов (АМ), подтверждается результатами ранее проведенных исследований [2–6].

В работе представлены результаты исследования влияния АМ на прочность и жесткость РС. Исследования проводились методом конечных элементов в программе SolidWorks Simulation, исследовалось напряженно-деформированное состояние деталей (болт, гайка) РС. При этом моделировалось два варианта – сборка РС с АМ и сборка РС без АМ.

При моделировании, в CAD-программе SolidWorks, для осуществления сборки резьбовых деталей использовалось следующее геометрическое допущение: резьба по винтовой линии заменялась резьбой в виде массива колец с профилем эквивалентным резьбе [2–6]. С целью уменьшения времени вычислений выделялась 1/6 часть соединения (см. рис. 1 и 2).

В табл. 1 представлены исходные данные для моделирования и расчета РС.

Исходные данные для моделирования и расчета РС

Резбовое соединение	M10 – 6H/6g
Наружный диаметр резьбы $d = D$, мм	10
Внутренний диаметр резьбы $d_1 = D_1$, мм	8,647
Средний диаметр резьбы $d_2 = D_2$, мм	9,188
Размер гайки под ключ D_0 , мм	17
Шаг резьбы P , мм	1,25
Угол профиля резьбы α , град.	60
Зазор посадки по среднему диаметру $S^{\text{пос}}$, мм	0,306
Материал болта	сталь 45X ($E_1 = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu_1 = 0,32$)
Материал гайки	сталь 35X ($E_2 = 2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu_2 = 0,29$)
Марка анаэробного материала	HM162 ($E_{\text{AM}} = 2,62 \cdot 10^3 \text{ МПа}$)
Внешняя нагрузка F , кН	10
Коэффициент трения в зоне контакта резбовых деталей f :	
для РС без АМ:	0,2
для РС с АМ:	0,4

Выполненные в CAD – программе *SolidWorks* твердотельные модели сборки РС представлены на рис. 1.

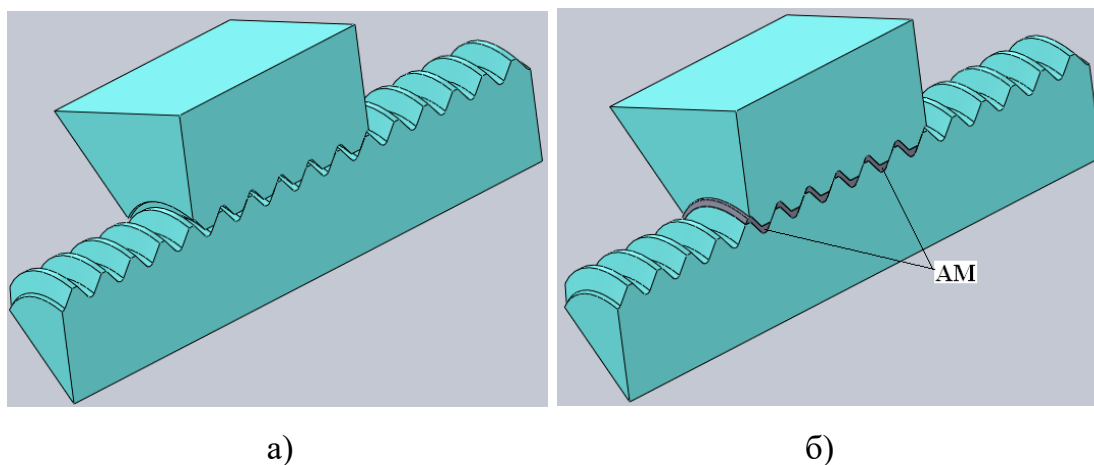


Рис. 1. Твердотельные модели сборки резьбовых деталей:

- а – соединение резьбовых деталей без АМ;
- б – соединение резьбовых деталей с АМ

Расчетная модель РС показана на рис. 2.

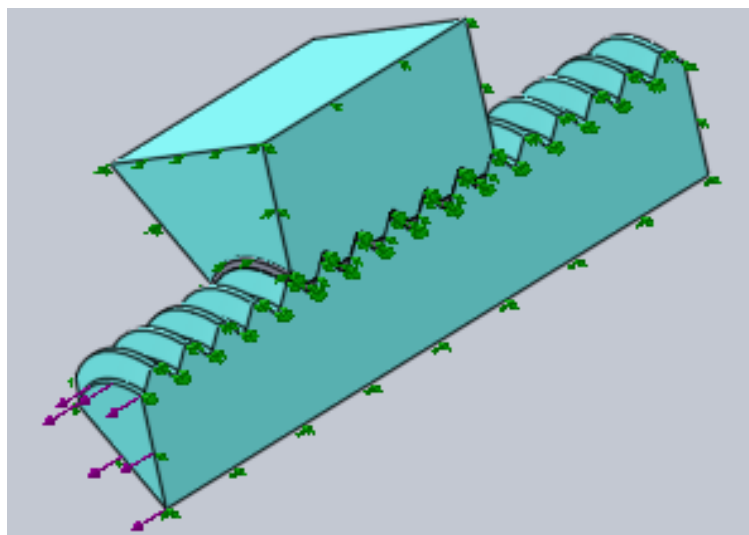


Рис. 2. Расчетная модель РС

При расчете определялись эквивалентные напряжения по Мизесу в сечениях болта и гайки (см. рис. 3 и табл. 2).

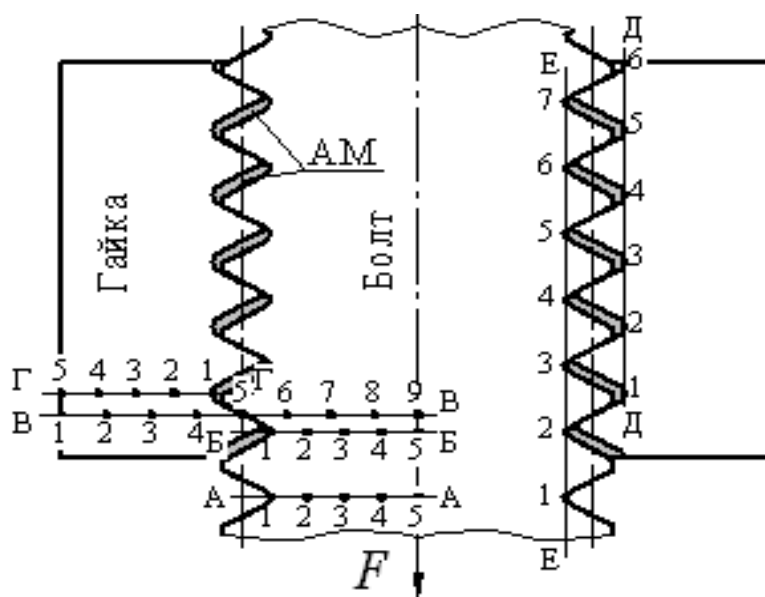


Рис. 3. Схема сечений болта и гайки

Анализ результатов (таблица 2) показывает, что под нулевым витком болта в сечении А-А эквивалентные напряжения при сборке РС с АМ уменьшаются на (5,5–13,6) %; под первым витком болта в сечении Б-Б – на (14–39,2) %; в зоне контакта первого витка болта и гайки в сечении В-В – на (18,9–60,3) %; под впадиной первого витка гайки в сечении Г-Г – на (30–59,3) %; под впадинами витков гайки в сечении Д-Д – на (9,3–40,2) %; под впадинами витков болта в сечении Е-Е – на (13,6–56,3) %.

**Результаты расчетов эквивалентных напряжений по Мизесу
в сечениях болта и гайки**

Сечение		Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа								
		№ точки в сечении								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
А-А	без АМ	310,9	169,4	148,1	137,8	135,0	—	—	—	—
	с АМ	268,7	169,7	139,9	124,0	118,0	—	—	—	—
Б-Б	без АМ	651,9	128,8	130,0	127,8	127,5	—	—	—	—
	с АМ	396,5	110,8	95,4	90,1	88,8	—	—	—	—
В-В	без АМ	74,9	75,3	104,1	159,8	217,6	167,3	136,6	130,7	129,0
	с АМ	29,7	39,6	65,3	129,6	317,5	102,2	92,6	87,1	84,4
Г-Г	без АМ	266,7	123,5	95,5	73,1	71,5	—	—	—	—
	с АМ	166,3	87,7	61,1	39,3	29,1	—	—	—	—
Д-Д	без АМ	266,7	159,1	93,2	88,1	66,4	48,8	—	—	—
	с АМ	166,3	141,7	102,8	52,7	41,0	39,9	—	—	—
Е-Е	без АМ	310,9	651,9	263,7	175,1	157,9	119,4	93,3	—	—
	с АМ	268,7	396,5	216,0	126,2	85,9	52,2	51,4	—	—

Таким образом, по результатам расчета видно, что эквивалентные напряжения по Мизесу в теле болта и гайки при сборке РС с АМ существенно уменьшаются, то есть прочность и жесткость увеличивается.

Список литературы

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М. : Машиностроение, 1990. 368 с.
2. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Повышение функциональных характеристик резьбовых соединений при сборке с анаэробными материалами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 6. С. 37–40.
3. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Влияние анаэробных материалов на распределение нагрузки в резьбовом соединении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 6. С. 34–39.

4. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Комплексное повышение эксплуатационных характеристик резьбовых соединений при сборке с анаэробными материалами // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 41–46.

5. Кочетков Д. В., Воячек И. И., Зверовщиков А. Е. Разработка и исследование функциональных моделей резьбовых соединений типа стяжки при сборке с анаэробными материалами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 4 (20). С. 115–127.

6. Voyachek I. I., Sága M., Ságová Z. [et al.]. Providing Cyclic Robustness of Bolted Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Novel Trends in Production Devices and Systems V : Materials Science Forum, Trans Tech Publications. Switzerland Publishing house, 2019. Vol. 952. P. 3–12. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.3

Информация об авторах / Information about the authors

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Металлорежущие
станки», Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of technical sciences,
associate professor, head of the
department of metal cutting
machines, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of technologies
and equipment of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Максимович Пучков

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: p04alex19@yandex.ru

Alexander M. Puchkov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ярослав Валентинович Власов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tmspgu@mail.ru

Yaroslav V. Vlasov

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ AISI 430 И AISI 304 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Евгений Валерьевич Зотов¹,
Даниил Алексеевич Тюрин²,
Владислав Игоревич Рожков³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния технологических параметров лазерной сварки на формирование структуры и механические свойства сварных соединений разнородных нержавеющей сталей AISI 430 и AISI 304. Применены методы численного моделирования в программной среде Simufact Welding, а также экспериментальные исследования, включающие механические испытания и металлографический анализ. Выявлены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие высокое качество соединений и минимальные остаточные деформации. Разработаны практические рекомендации по внедрению технологии на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: лазерная сварка, AISI 430, AISI 304, численное моделирование, микроструктура, сварные соединения, остаточные напряжения

OPTIMIZATION OF LASER WELDING PARAMETERS OF AISI 430 AND AISI 304 STAINLESS STEELS USING NUMERICAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION

Evgeny V. Zotov¹, Daniil A. Tyurin², Vladislav I. Rozhkov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article presents the results of a study on the influence of technological parameters of laser welding on the structure and mechanical properties of dissimilar stainless steel joints (AISI 430 and AISI 304). Numerical modeling was performed using Simufact Welding software, complemented by experimental studies including mechanical tests and metallographic analysis. Optimal process parameters were identified to ensure high-quality joints and minimal residual deformations. Practical recommendations for industrial implementation are proposed.

Keywords: laser welding, AISI 430, AISI 304, numerical modeling, microstructure, welded joints, residual stresses

Современные технологии сварки находят широкое применение в различных отраслях машиностроения, особенно в случаях, когда требуется соединение разнородных материалов. Одним из таких эффективных методов является лазерная сварка, обеспечивающая высокую точность, малую зону термического влияния и минимальные деформации. Особый

интерес представляет соединение ферритной стали AISI 430 и аустенитной стали AISI 304, применяемых в производстве оборудования, работающего в агрессивных средах и при повышенных температурах.

Поэтому актуальной задачей является определение оптимальных параметров лазерной сварки сталей AISI 430 и AISI 304, обеспечивающих высокое качество соединения при минимальных остаточных деформациях. Для решения этой задачи было проведено численное моделирование процесса сварки и экспериментальная проверка качества соединений с использованием лазерной сварки. На основе исследований разработаны практические рекомендации.

Численное моделирование выполнено в программной среде Simufact Welding, что позволило оценить температурные поля и распределение деформаций. Экспериментальная часть включала изготовление сварных образцов с последующим проведением механических испытаний (испытания на прочность, микротвердость, ударную вязкость) и металлографического анализа шва.

На основе численного моделирования определены оптимальные режимы лазерной сварки, при которых достигается равномерное распределение температуры (рис. 1) и минимизируются деформации (рис. 2). В частности, выявлено влияние скорости сварки, мощности лазера и диаметра пятна на качество соединения.

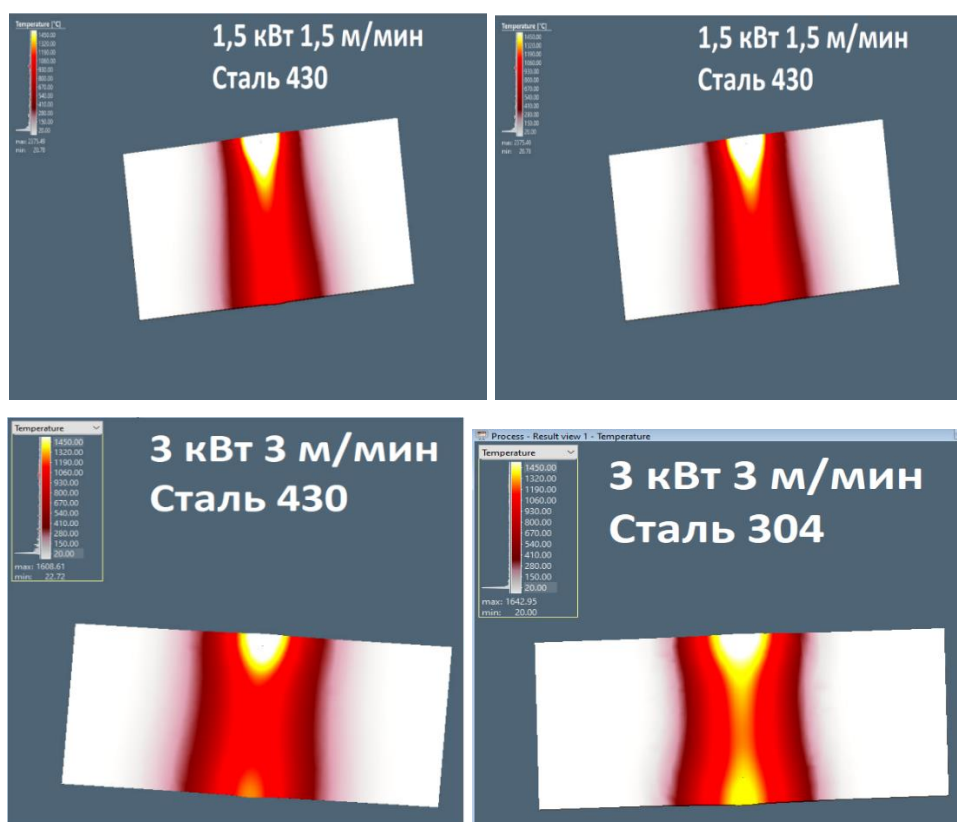


Рис. 1. Распределение температуры стали 430 и стали 304 при различных режимах обработки

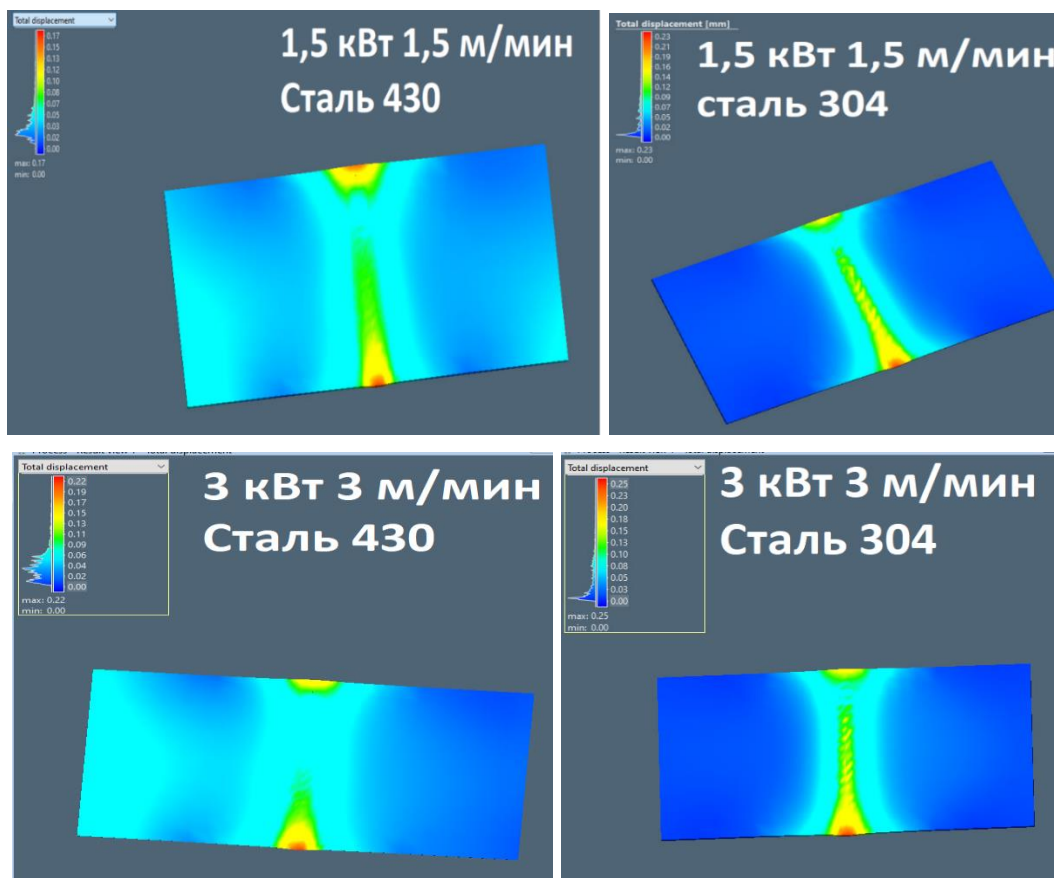


Рис. 2. Распределение деформаций в сварном соединении стали 430 и стали 304 при различных режимах обработки

Моделирование позволило существенно сократить объем физического эксперимента и с высокой точностью предсказать поведение сварного соединения при различных режимах.

Выводы:

- Температурный градиент у AISI 304 менее выражен благодаря никелю.
- Деформации остаются выше, чем у AISI 430, но разница сокращается до 14 %.

Сравнительный анализ результатов моделирования сталей представлен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов моделирования сталей

Параметр	AISI 430 (1,5 кВт)	AISI 304 (1,5 кВт)	AISI 430 (3 кВт)	AISI 304 (3 кВт)
Макс. температура, °C	2375,49	2460,24	1608,61	1642,95
Макс. смещение, мм	0,17	0,23	0,22	0,25

Ключевые различия:

1. AISI 304:

- Более высокая пиковая температура из-за теплопроводности.
- Увеличенные деформации из-за аустенитной структуры.

2. AISI 430:

- Уже зона термического влияния (ЗТВ).
- Меньший риск коробления.

Таким образом, на основе математического моделирования было выяснено, что для AISI 430 оптимален режим 3 кВт / 3 м/мин (меньшие деформации и стабильный шов), а для AISI 304 требуется контроль деформаций и возможен компромиссный режим 2,5 кВт / 2 м/мин.

Можно сказать, что математическое моделирование в Simufact Welding доказало свою эффективность для предсказаний дефектов (поры, трещины) и их минимизации; оптимизации режимов сварки под конкретные материалы и снижения себестоимости разработки технологии за счет замены физических испытаний виртуальными.

Выявленные в численном моделировании оптимальные режимы обработки были использованы в экспериментальных исследованиях. Проведенные испытания показали высокие значения прочности сварных соединений при отсутствии дефектов, таких как непровары или поры. Микроструктурный анализ выявил равномерную структуру с минимальным образованием твердых интерметаллидных фаз.

На основании проведенных экспериментальных исследований (рис. 3) предложены следующие рекомендации: использовать скорость сварки в пределах 2–3 м/мин при мощности лазера 2–3 кВт; обеспечить предварительную очистку кромок и применение защитной атмосферы и использовать численное моделирование как этап предварительной настройки параметров в производственных условиях.

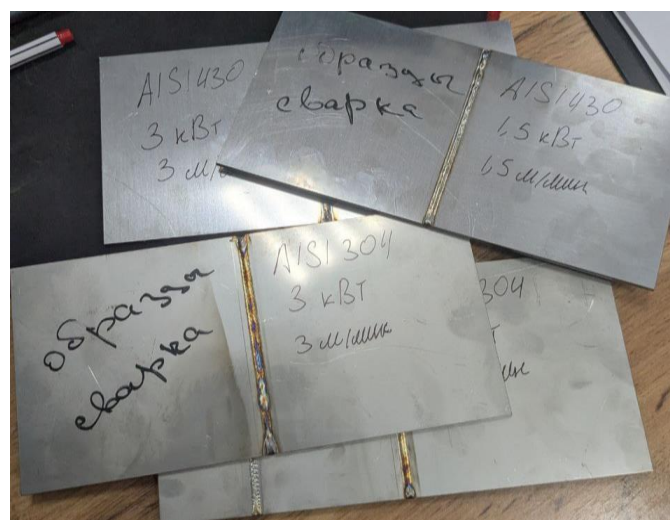


Рис. 3. Фотографии образцов, используемых для экспериментальных исследований

Таким образом, проведенное исследование показало, что сочетание численного и экспериментального подходов позволяет эффективно оптимизировать параметры лазерной сварки разнородных нержавеющей сталей. Выявленные закономерности и полученные рекомендации могут быть использованы на машиностроительных предприятиях для повышения качества сварных соединений и снижения производственных затрат.

Список литературы

1. Малащенко А. А., Мезенов А. В. Лазерная сварка металлов. М. : Машиностроение, 1984. 46 с.
2. Справочник по лазерной сварке / под ред. С. Катаяма. М. : Техносфера, 2015. 704 с.
3. Process fundamentals of industrial laser welding and cutting. David Havrilla – Rofin-Sinar, 1999. 203 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Валерьевич Зотов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: zotovpgu@gmail.com

Evgeny V. Zotov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department
of technologies and equipment
of mechanical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Даниил Алексеевич Тюрин

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: quemlinka@mail.ru

Daniil A. Tyurin

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Владислав Игоревич Рожков

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: rozhkov.w0rk@yandex.ru

Vladislav I. Rozhkov

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА ТМЖ-1М ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО КЛАПАНА DN15/PN1.6

Евгений Валерьевич Зотов¹,
Елена Валерьевна Федорова²,
Даниил Александрович Масленников³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения аэродинамического стенда ТМЖ-1м для исследования характеристик обратного клапана DN15/PN1.6. Приведен обзор литературы по основным параметрам, характеризующим работу клапанов: коэффициент местного сопротивления, коэффициент пропускной способности, минимальное давление открытия. Обоснована целесообразность применения воздушного стенда для экспресс-оценки изделий малого диаметра. Работа носит постановочный характер и намечает план проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: обратный клапан, аэродинамический стенд, коэффициент местного сопротивления, пропускная характеристика, минимальное давление открытия

APPLICATION OF THE AERODYNAMIC STAND TMZH-1M TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF THE DN15/PN1.6 CHECK VALVE

Evgeny V. Zotov¹, Elena V. Fedorova², Daniil A. Maslennikov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This article examines the use of the TMZh-1m aerodynamic stand to study the performance of a DN15/PN1.6 check valve. A literature review is provided on the key parameters characterizing valve performance: local resistance coefficient, flow coefficient, and minimum opening pressure. The feasibility of using an air stand for express assessment of small diameter products is substantiated. This work is preliminary in nature and outlines a plan for conducting experimental studies.

Keywords: check valve, aerodynamic test bench, local resistance coefficient, flow characteristic, cracking pressure

Обратные клапаны широко применяются в трубопроводных системах энергетической, химической и нефтегазовой промышленности. Основная функция клапана заключается в предотвращении обратного потока рабочей среды, что обеспечивает безопасность и надежность

эксплуатации оборудования. При этом аэродинамические характеристики клапана: коэффициент местного сопротивления ζ , коэффициент пропускной способности K_v/C_v , а также минимальное давление открытия – оказывают прямое влияние на эффективность системы в целом. Таким образом, даже небольшие изменения этих параметров могут существенно сказаться на работе всей системы.

Для понимания реальной работы клапанов важно рассматривать не только их конструктивные особенности, но и практические показатели. Исходя из априорного анализа информации, можно выделить несколько ключевых направлений оценки работы обратных клапанов. К ним относятся: экспериментальные исследования потерь давления, определение коэффициентов K_v/C_v , оценка герметичности затвора, а также определение давления начала открытия. Согласно государственным и международным стандартам [1, 2], особое внимание уделяется испытаниям на герметичность и надежность. Именно эти характеристики определяют безопасность оборудования в эксплуатации.

В ряде работ [3, 4] рассматривается возможность применения воздушных потоков для экспресс-оценки характеристик клапанов. Методика позволяет оперативно снимать зависимости $\Delta p-Q$, вычислять коэффициент местного сопротивления и сопоставлять полученные результаты с паспортными данными. При этом отмечается, что использование аэродинамических стендов целесообразно в первую очередь на этапах предварительных исследований.

Объектом исследования является обратный клапан DN15/PN1.6 (рис. 1), изготовленный по ТУ 3742-007-53711114-2009. Клапан предназначен для предотвращения обратного потока рабочей среды в трубопроводах. Материал корпуса – сталь 09Г2С. Конструктивное исполнение обеспечивает класс герметичности «А» и возможность эксплуатации при температуре рабочей среды от -10 до $+70$ °С.

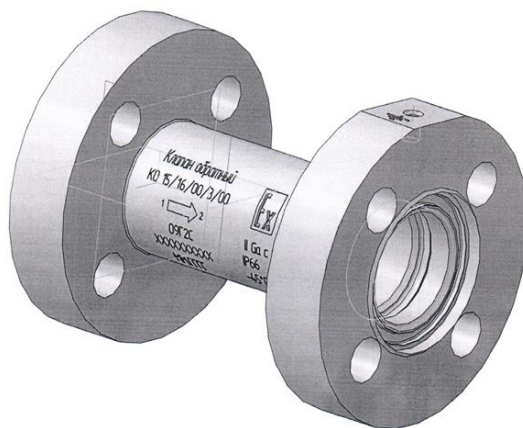


Рис. 1. 3D-модель клапана

В качестве оборудования для исследований выступает аэродинамический стенд ТМЖ-1м. Этот стенд позволяет получать зависимости между расходом и перепадом давления, измерять распределение давления на поверхности тел, исследовать особенности обтекания различных элементов. В данной работе планируется использовать стенд для снятия следующих характеристик клапана: Δp - Q зависимости, коэффициента местного сопротивления ζ , коэффициента K_v/C_v , а также минимального давления открытия.

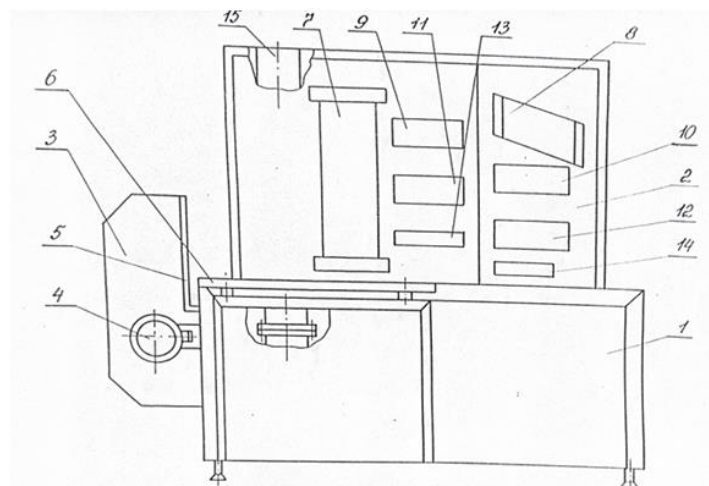


Рис. 2. Схема аэродинамического стенда ТМЖ-1м

Стенд состоит из двух секций: нижней (1) и верхней (2).

В состав нижней секции входит вентилятор и электродвигатель (находятся внутри секции); всасывающий прямоугольный воздуховод (3) с установленным в нем дроссельным клапаном для регулирования расхода. Открытие клапана осуществляется дискретно с помощью регулирующего механизма (1). В начале всасывающего воздуховода (5) имеется фланец с сеткой и уплотнением для болтового присоединения исследуемых модулей; выдвижного стола (6) для установки исследуемых модулей; лабораторного столика для записи результатов лабораторных исследований.

В состав верхней секции с внешней стороны входят: приборная часть, которая состоит из шести вертикальных пьезометров (7), четырех наклонных пьезометров (8), двух опросных панелей (9) и (10) для измерения параметров потока в двенадцати и четырнадцать точек соответственно с помощью микроманометра, панели с двенадцатью штуцерами (11), панели с четырнадцатью штуцерами (12), панели с шестью штуцерами (13), панели с четырьмя штуцерами (14). Внутри верхней секции находится напорный воздуховод прямоугольного сечения (15).

Целью исследования является разработка методики применения аэродинамического стенда для определения аэродинамических харак-

теристик обратных клапанов малого диаметра. Это позволит быстро и удобно проверять работу клапанов в лабораторных условиях. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы экспериментального определения характеристик обратных клапанов.

2. Изучить возможности аэродинамического стенда ТМЖ-1м для снятия параметров Δp – Q , ζ , K_v/C_v и давления начала открытия.

3. Сформировать план проведения экспериментов и разработать протокол измерений.

4. Сопоставить ожидаемые данные с паспортными характеристиками клапана. То есть проверить, насколько результаты эксперимента совпадают с тем, что указано производителем.

Результаты исследований позволяют обосновать применимость стенда для экспресс-оценки обратных клапанов и могут быть использованы для быстрой оценки изделий без сложных промышленных испытаний. Полученные данные могут быть использованы для предварительных испытаний изделий на предприятиях, что делает методику практичной и доступной.

Таким образом, работа открывает перспективы применения лабораторных аэродинамических стендов для решения практических задач машиностроения и повышения качества выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Международный стандарт ISO 5208.
2. ГОСТ 9544–2015. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов.
3. Балугев Д. Е., Никаноров О. Л., Рогожкин С. А., Шепелев С. Ф. Экспериментальные и расчетные исследования обратного клапана с шаровым запирающим элементом // Киберленинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-i-raschetnye-issledovaniya-obratnogo-klapana-s-sharovym-zapirayuschim-elementom/viewer>
4. Denne J., Neild S.A., Goman M.G. Aerodynamic Characterization of a Wind Tunnel Using Pressure Distribution Measurements // Journal of Aircraft. 2024. Vol. 61, № 3.

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Валерьевич Зотов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: zotovpgu@gmail.com

Evgeny V. Zotov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of technologies and
equipment of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Елена Валерьевна Федорова
студентка, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: lf3dor0v4@mail.ru

Elena V. Fedorova
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Даниил Александрович
Масленников**
студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: Extmda@mail.ru

Daniil A. Maslennikov
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ПРОЦЕСС ГЛУБИННОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Юлия Николаевна Кошелева²**

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на процесс профильного глубинного алмазного шлифования изделий из твердых сплавов. Разработана методика экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи смазочно-охлаждающей жидкости при глубинном алмазном шлифовании.

Ключевые слова: глубинное шлифование, профильное алмазное шлифование, твердый сплав, коэффициент конвективной теплоотдачи, СОЖ, контактная температура

STUDYING THE INFLUENCE OF CUTTING LUBRICANTS ON THE PROCESS OF CREEP-DEEP DIAMOND GRINDING OF HARD-ALLOY PARTS

Alexander E. Zverovshchikov¹, Yulia N. Kosheleva²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This paper examines the influence of cutting fluids on the process of deep-cut profile diamond grinding of hard-alloy parts. A methodology for experimentally

determining the convective heat transfer coefficient of cutting fluids during deep-cut profile diamond grinding has been developed.

Keywords: deep grinding, profile diamond grinding, hard alloy, convective heat transfer coefficient, coolant, contact temperature

Перспективным методом обработки изделий из твердых сплавов, является профильное глубинное алмазное шлифование [1–3]. Однако процесс глубинного алмазного шлифования сопровождается интенсивным тепловыделением в зоне обработки, что может привести к возникновению дефектов в поверхностных слоях шлифованных деталей, таких как микротрещины и прижоги [3–6]. Одним из способов решения проблемы является применение смазочно-охлаждающих жидкостей отводящих тепло из зоны резания, в том числе посредством конвективного теплообмена.

Ряд исследований [6] показывает, что СОЖ позволяет снизить температуру при шлифовании на 17 – 30 %.

Оценка влияния СОЖ на температуру в зоне шлифования связана с определением коэффициента конвективного теплообмена α [5, 6].

Существуют методики [7, 8], которые были адаптированы для экспериментального определения α при шлифовании с СОЖ.

Экспериментальные исследования проводились на стенде (рис. 1) для твердосплавных втулок 1 из твердого сплава ВК8 размером: наружный диаметр 24 мм, внутренний диаметр 17 мм, длина 36 мм. Нагревательный элемент 2 – спираль из нихромовой проволоки марки х20н80 диаметром 1 мм, диаметр навивки спирали 14 мм, длина спирали 34 мм. Спираль изолирована от втулки с помощью каменной слюды. Втулка 1 закреплена на керамической подставке с помощью термостойкого клея и помещена в емкость с СОЖ 5 (3-% содовый раствор). Для регулирования напряжения использовался симисторный регулятор напряжения 6. Значение силы тока для расчета мощности нагревательного элемента определялось с помощью токоизмерительных клещей 7. СОЖ 5 налита в емкость, в которой размещена втулка с нагревательным элементом внутри. С помощью двух термопар 3 и 4 измерялись температуры втулки и СОЖ.

Выполнен проектный расчет сопротивления нихромовой проволоки и определены допустимые значения напряжения и силы тока в электрической цепи:

$$R = \frac{4 \cdot l_{\text{пров}} \cdot \rho}{\pi \cdot d_{\text{пров}}^2},$$

где ρ – удельное сопротивление нихрома, Ом·мм²/м.

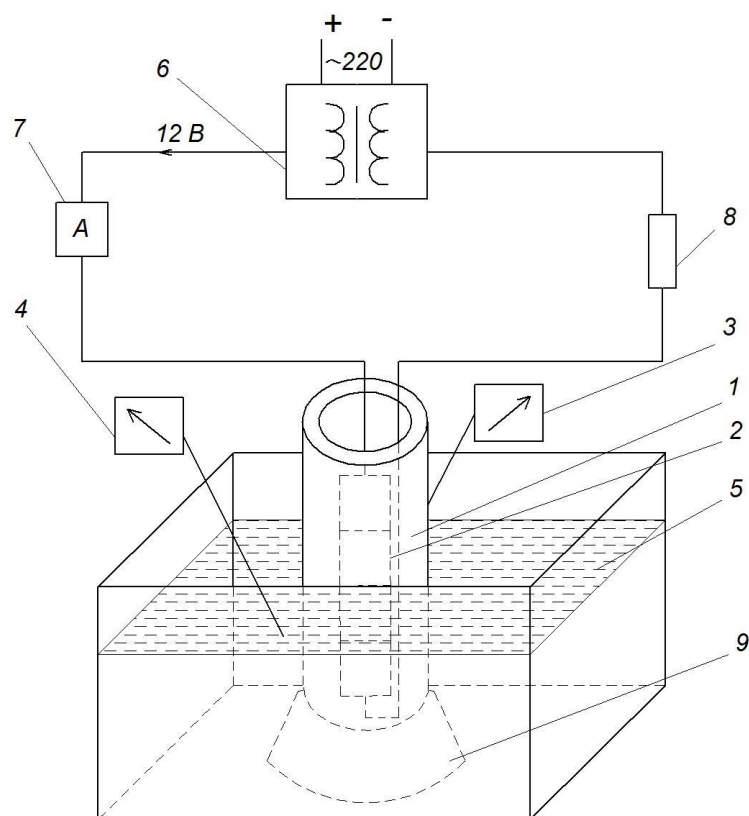


Рис. 1. Стенд для определения коэффициента конвективной теплоотдачи:
 1 – втулка из твердого сплава; 2 – нагревательный элемент;
 3 – термопара с мультиметром для измерения температуры втулки;
 4 – термопара с мультиметром для измерения температуры СОЖ; 5 – СОЖ;
 6 – симисторный регулятор напряжения; 7 – амперметр

В результате расчета получены данные по нагревателю $d_{\text{пров}} = 1$ мм, $L_{\text{спираль}} = 34$ мм, $D_{\text{стержня}} = 13$ мм, $l_{\text{витка}} = 42$ мм, $N_{\text{витков}} = 23$, $l_{\text{пров}} = 975$ мм, $R = 1,4$ Ом, $I = 8,6$ А, $U = 12$ В, $T = 500$ °С.

После наступления состояния теплового равновесия с помощью термопар замерялись температуры окружающей среды (СОЖ) T_c , °С и температура нагретого твердосплавного образца T_o , °С. По нижеприведенной методике определялся общий коэффициент конвективной теплоотдачи α_k , Вт/(м²·К):

$$\alpha_k = \frac{N}{(T_o - T_c) \cdot F},$$

где F , м² – площадь теплоотдачи образца.

Коэффициент конвективной теплоотдачи определится:

$$\alpha = \alpha_k - \alpha_{\text{л}},$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К).

$$\alpha_{\text{л}} = \varphi \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_0 - T_c},$$

где φ – угловой коэффициент поглощения, учитывающий часть излучения первого тела, которое воспринимается вторым телом; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы тел.

Экспериментальным путем установлено, что коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности твердосплавной втулки из ВК8 к СОЖ $\alpha = 249 \pm 0,84$ Вт/(м²·К). По результатам проверки интервальная оценка величин характеризуется следующими параметрами для ВК8: $\Delta a_i = 0,84$, $S_B^2 = 11,4$, $t(P, m, N) = 0,49$.

Использование данной методики позволяет достаточно точно определить коэффициент конвективной теплоотдачи для охлаждения в заданной среде (СОЖ). Полученные значения коэффициента конвективной теплоотдачи можно использовать для дальнейших расчетов или компьютерного моделирования тепловых процессов при шлифовании с учетом конвективного теплообмена.

Список литературы

1. Абдулгазис Д. У., Абдулгазис У. А., Братан С. М. Оценка целесообразности применения алмазных шлифовальных кругов для обработки твердых сплавов в режиме глубинного шлифования // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 123–128.
2. Горбунова И. А., Пиралишвили Ш. А., Волков Д. И. Теоретико-экспериментальное моделирование тепловых процессов в поверхностных слоях заготовки при глубинном шлифовании // Инженерный журнал. 2005. № 3. С. 29–33.
3. Безъязычный В. Ф., Голованов Д. С. Качество поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при глубинном шлифовании // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2017. № 3 (42). С. 65–69.
4. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М. : Машиностроение, 1971. 217 с.
5. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 167 с.
6. Ящерицын П. И., Цокур А. К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск : Наука и техника, 1973. 184 с.
7. А. с. 1553849 (СССР). Стенд для определения коэффициента конвективной теплоотдачи / Караваев С. Н. № 4169307 ; заявл. 25.11.1986 ; опубл. 30.03.1990.
8. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина. М., 2004.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич

Зверовщиков

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of technologies and equipment of
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Юлия Николаевна Кошелева

специалист по учебно-методической
работе Учебно-методического
управления, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: j231@mail.ru

Yulia N. Kosheleva

Specialist in educational and
methodological work at the
educational and methodological
department, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 67.05

СТАБИЛИЗАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА МЕМБРАН ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Михаил Геннадьевич Мищенко²**

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается стабилизация физико-механических свойств материала мембран гидравлических систем управления.

Ключевые слова: чувствительный элемент, протяжные станки, работоспособность, легирующие элементы

STABILIZATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF THE MEMBRANE MATERIAL OF HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS

Alexander E. Zverovshchikov¹, Mikhail G. Mishchenko²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The stabilization of the physico-mechanical properties of the membrane material of hydraulic control systems is considered.

Keywords: sensing element, broaching machines, operability, alloying elements

Одним из основных требований к работоспособности мембран гидравлических систем управления протяжных станков является высокая стабильность и повторяемость функциональной взаимосвязи геометрических размеров детали и физических параметров, достигаемых в процессе их нагружения [1].

Сплав 36НХТЮ применяют как конструкционный материал при изготовлении различных пружин, упругочувствительных элементов, входящих в состав датчиков давления гидравлических систем, работающих при температурах ниже 250 °С. [3].

Основными функциональными характеристиками мембраны являются:

- предварительный ход;
- рабочий ход;
- усилие взведения стабильно;
- усилие срабатывания.

Для проверки работоспособности спроектирован стенд (рис. 1).

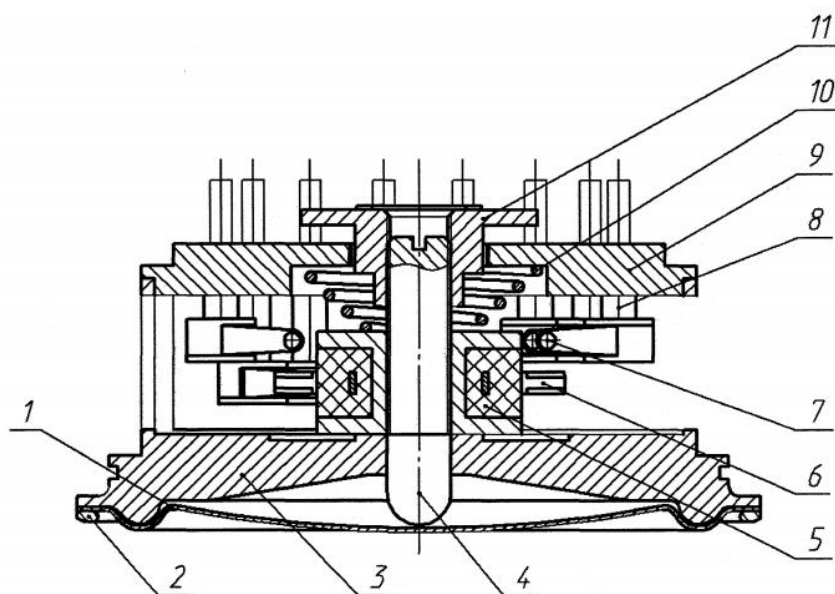


Рис. 1. Стенд для испытаний. Чувствительный элемент давления с контактной системой:

- 1 – хлопающая мембрана; 2 – прижим; 3 – корпус; 4 – направляющая;
 5 – переключатель; 6 – нож; 7 – контакт; 8 – токовывод; 9 – плата;
 10 – пружина; 11 – диск блокировочный

На листе заготовки выбирались участки по схеме рис. 2.

Схема расположения участков на заготовке приведена на рис. 2.

1	2	3	4	25	26	27	28
5	6	7	8	29	30	31	32
9	10	11	12	33	34	35	36
13	14	15	16	37	38	39	40
17	18	19	20	41	42	43	44
21	22	23	24	45	46	47	48

Рис. 2. Схема расположения участков контроля химического состава на исследуемых заготовках

На каждом из отмеченных участков определяли содержание основных химических элементов и примесей (табл. 1) до термической обработки так и после, для выявления дисперсии по легирующим элементам.

Из полученных результатов определения содержания химических элементов в сплаве 36НХТЮ8М видно, что химический состав в основном соответствует требованиям ГОСТ 10994–74 по содержанию главных легирующих элементов. Небольшое количество результатов по определению Cr и Ni с несколько заниженными/завышенными значениями можно рассматривать как «статистические вылеты», поскольку их общее количество не превышает 10 %. Наибольшее колебание содержания элементов наблюдается по Mo. В связи с выявленной закономерностью необходимо проанализировать механические свойства материала с учетом колебания содержания Mo.

Стабилизация химического состава материала заготовок способствует уменьшению разброса одного из основных технологических параметров толщины ленты. По сравнению с исходными параметрами S, Rсраб, Rвзв и Wp до термообработки, которые приведены в таблице.

Таблица 1

Содержание основных легирующих элементов на различных участках образцов сплава

36НХТЮ8М	Массовая доля элементов, масс. %			
	Mn	Cr	Ni*	Mo*
Норма по ГОСТ	0,8–1,2	12,0–13,5	35,0–37,0	7,5–8,5
Среднее содержание элемента, %	0,879333	12,90667	37,31233	8,520667
Дисперсия	0,001278	0,085072	0,473104	0,576442
Поле рассеяния по Гауссу	0,214456	1,750029	4,126954	4,555426
Нижний предел по партии, %	0,772105	12,03165	35,24886	6,242954
Верхний предел по партии, %	1,265386	18,92249	54,93676	11,64214

Результаты зависимости характеристик мембран гидравлических систем управления протяжных станков от их толщин и химического состава.

№ п.п	S, мм	Рсраб.	Рвзв.	Wp
среднее	0,213577	4,63	0,513333	2,086667
дисперсия	0,000183	0,029759	0,008092	0,000506
поле рассеяния	0,081196	1,035041	0,539732	0,134933

Исходные результаты зависимости характеристик мембран гидравлических систем управления протяжных станков от их толщин и химического состава.

№ п.п	S, мм	Рсраб.	Рвзв.	Wp
среднее	0,213577	4,63	0,506667	1,938
дисперсия	0,000183	0,029759	0,009609	0,004741
поле рассеяния	0,081196	1,035041	0,588159	0,413116

В соответствии с исследованиями было предложено ограничить содержание молибдена в заготовках интервалом от 7 до 9 % путем селективного отбора заготовок.

Выводы:

Заготовки в состоянии поставки из сплава 36НХТЮ8М, применяемого в производстве мембран гидравлических систем управления протяжных станков, соответствующие ГОСТ, имеют недопустимую неоднородность химического состава. Наиболее значительные колебания в химическом составе материала заготовок выявлены по содержанию молибдена (до 3,3 %). Установлено, что предельные значений содержания химических элементов, в частности молибдена существенно влияют на усилие срабатывания и другие функциональные характеристики изделий.

Список литературы

1. Справочник конструктора точного приборостроения / ред. Ф. Л. Литвинова. М. : Машиностроение, 1964.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М. : Машиностроение, 1979. Т. 3.
3. ГОСТ 14117–85. Лента из прецизионных сплавов для упругих элементов. Технические условия.
4. ГОСТ 10994–74. Сплавы прецизионные. Марки.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov
Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Михаил Геннадьевич Мищенко
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: mih.mischenko@yandex.ru

Mikhail G. Mishchenko
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.813

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕЗЬБЫ В СОЕДИНЕНИИ СО СЖАТО-РАСТЯНУТОЙ ГАЙКОЙ

**Игорь Иванович Воячек¹,
Денис Викторович Кочетков²,
Ярослав Валентинович Власов³,
Александр Максимович Пучков⁴**

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния сжато-растянутой гайки на распределение нагрузки в резьбовом соединении. Установлено, что нагрузка по виткам резьбы распределяется более равномерно и в зависимости от коэффициента трения уменьшается на первом витке на 40...45 %, соответственно прочность соединения повышается.

Ключевые слова: резьбовое соединение, сжато-растянутая гайка, анаэробный материал, прочность

LOAD DISTRIBUTION ALONG THREAD TURNS IN A JOINT WITH A COMPRESSED-STRETCHED NUT

**Igor I. Voyachek¹, Denis V. Kochetkov²,
Yaroslav V. Vlasov³, Alexander M. Puchkov⁴**

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This paper presents the results of a study examining the effect of a compressed-stretched nut on load distribution in a threaded connection. It was found that the load is

distributed more evenly across the thread turns and, depending on the friction coefficient, decreases by 40–45 % on the first turn, thereby increasing the strength of the connection. **Keywords:** threaded connection, compression-stretched nut, anaerobic material, strength

Повышенная неравномерность распределения нагрузки по виткам резьбы является одной из основных причин разрушения резьбовых соединений (РС), от прочности которых часто зависит надежность всей конструкции в целом [1–6]. Известны конструкции специальных гаек (рис. 1) [1, 2], в которых эксплуатационная нагрузка по виткам резьбы распределяется более равномерно по сравнению с классическим соединением типа болт-гайка. Однако исследований проведено не достаточно, в литературе отсутствуют сведения о доли нагрузки приходящейся на витки резьбовых соединений со специальными гайками.

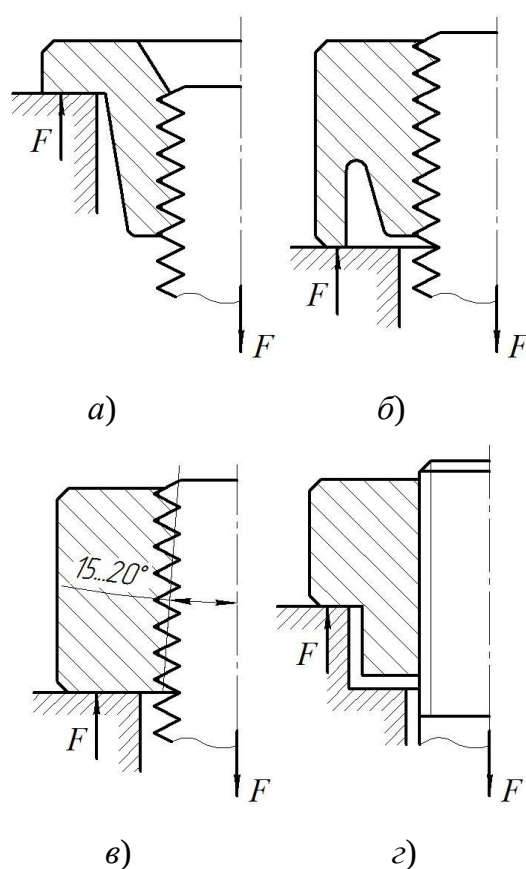


Рис. 1. Конструкции РС со специальными гайками

В настоящей работе исследуется влияние сжато-растянутой гайки на прочность РС, с учетом коэффициента трения в зоне контакта резьбовых деталей.

Сжато-растянутая гайка (рис. 1,г) является сочетанием резьбовых соединений типов – болт-гайка и стяжки. На рис. 2 показаны схемы

нагружения и схемы распределения нагрузки в резьбовых соединениях типа болт-гайка, типа стяжки и РС со сжато-растянутой гайкой [1].

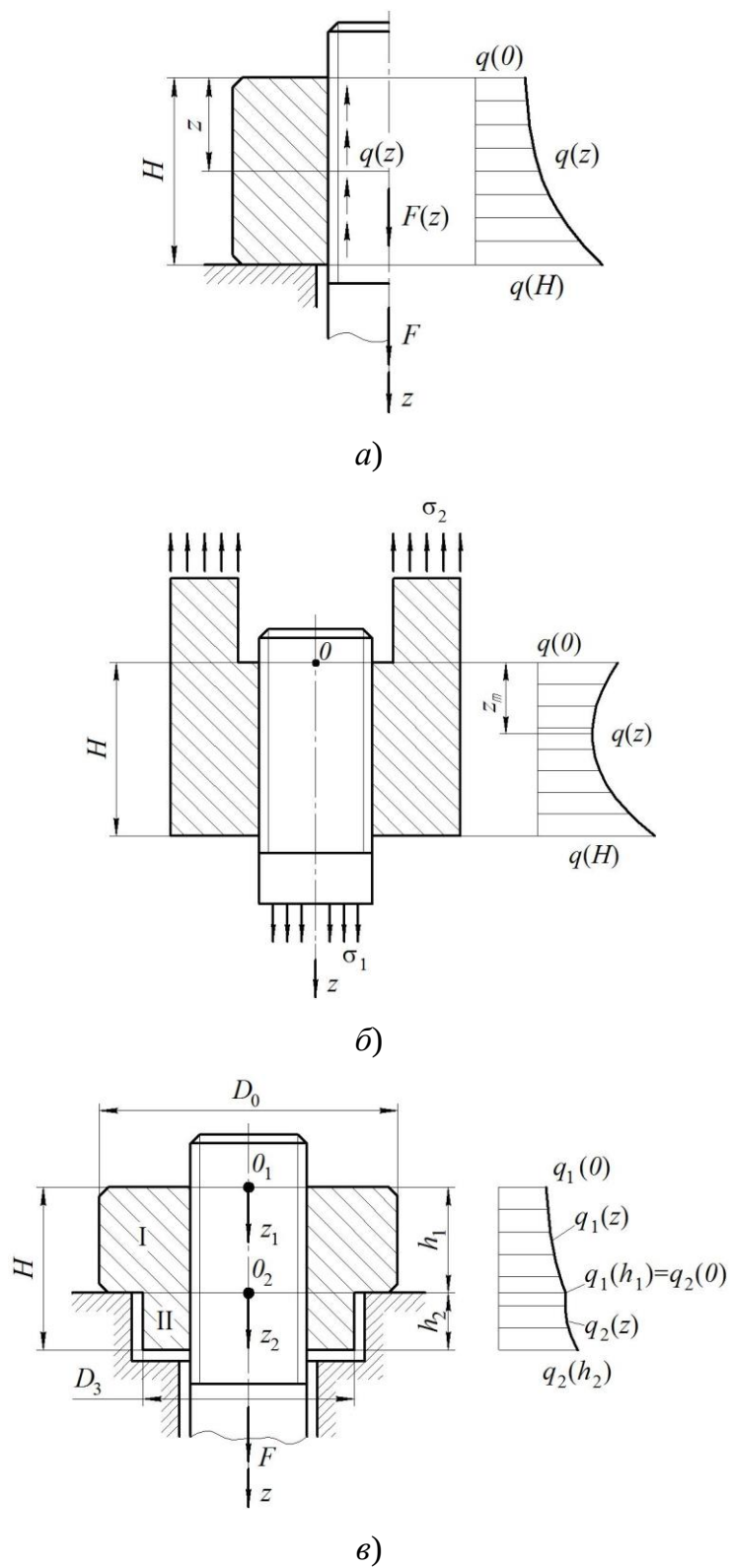


Рис. 2 – Схемы нагружения и схемы распределения нагрузки в РС:

а – РС типа болт-гайка; б – РС типа стяжки;

в – РС со сжато-растянутой гайкой

В табл. 1 представлены исходные данные для моделирования и расчета РС типа болт-гайка и РС со сжато-растянутой гайкой.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования и расчета соединений

Резбовое соединение	M10 – 6H/6g
Наружный диаметр резьбы $d = D$, мм	10
Внутренний диаметр резьбы $d_1 = D_1$, мм	8,647
Средний диаметр резьбы $d_2 = D_2$, мм	9,188
Размер гайки под ключ D_0 , мм	17
Диаметр на гайке D_3 , мм (см. рис. 2, в)	13,5
Размер h_2 (при $H = \text{const}$), мм (см. рис. 2, в)	2 и 3,75
Шаг резьбы P , мм	1,25
Угол профиля резьбы α , град.	60
Число витков резьбы n	6
Материал болта	сталь 45X ($E_1 = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu_1 = 0,32$)
Материал гайки	сталь 35X ($E_2 = 2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu_2 = 0,29$)
Марка анаэробного материала	HM162 ($E_{AM} = 2,62 \cdot 10^3 \text{ МПа}$)
Внешняя нагрузка F , кН	10
Коэффициент трения в зоне контакта резьбовых деталей f	0,1...0,4

Расчетные модели резьбовых соединений типа болт-гайка и со сжато-растянутой гайкой, выполненные в CAD-программе SolidWorks и CAE-системе SolidWorks Simulation, представлены на рис. 3.

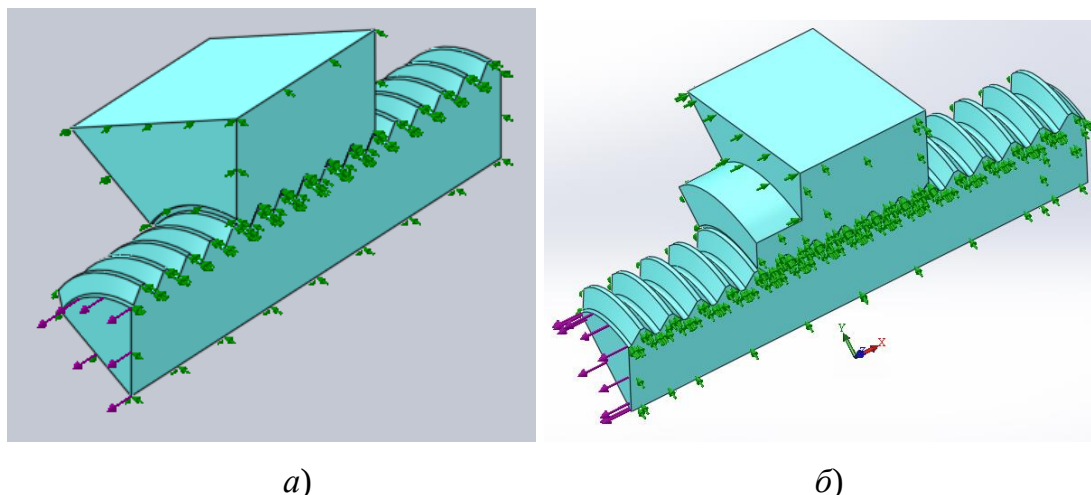


Рис. 3. Расчетные модели РС

Результаты расчетов доли нагрузки, приходящейся на каждый виток резьбы, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Доля нагрузки на витки РС

Модели РС	Доля нагрузки на витки РС, F_i/F , %						Суммарная нагрузка на витки РС, %
	1-ый ВИТОК	2-ой ВИТОК	3-ий ВИТОК	4-ый ВИТОК	5-ый ВИТОК	6-ой ВИТОК	
РС типа болт-гайка (рис. 3,а)							
$f = 0,1$	33,52	19,93	13,91	11,00	10,02	11,62	100
$f = 0,2$	33,26	20,06	14,11	11,19	9,98	11,40	100
$f = 0,4$	32,82	20,27	14,44	11,47	9,95	11,05	100
РС со сжато-растянутой гайкой (рис. 3, б)							
$f = 0,1$ ($h_2 = 2$ мм)	14,39	15,76	18,22	17,30	16,02	18,31	100
$f = 0,2$ $h_2 = 2$ мм)	14,30	15,93	18,44	17,45	15,93	17,95	100
$f = 0,4$ $h_2 = 2$ мм)	14,04	16,13	18,76	17,79	15,81	17,47	100
$f = 0,1$ ($h_2 = 3,75$ мм)	16,98	16,56	14,64	15,43	17,07	19,32	100
$f = 0,2$ ($h_2 = 3,75$ мм)	16,88	16,78	15,02	15,57	16,87	18,88	100
$f = 0,4$ ($h_2 = 3,75$ мм)	16,59	17,02	15,6	15,88	16,59	18,32	100

Результаты расчетов (табл. 2) показывают, что нагрузка в резьбовом соединении со сжато-растянутой гайкой распределяется по виткам резьбы более равномерно по сравнению с классическим соединением типа болт-гайка, и в зависимости от коэффициента трения уменьшается на первом витке на 40...45 %, соответственно прочность соединения повышается. В зависимости от размера h_2 для РС со сжато-растянутой гайкой происходит перераспределение нагрузки по виткам, первые витки резьбы на которых гайка образует с болтом РС типа стяжки разгружаются, а витки, на которых гайка образует РС типа болт-гайка наоборот нагружаются.

Таким образом, в РС со сжато-растянутой гайкой, за счет управления податливостью деталей и витков, нагрузка выравнивается, соответственно прочность повышается по сравнению с РС типа болт-гайка.

Список литературы

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М. : Машиностроение, 1990. 368 с.

2. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин : учебник для машиностроительных специальностей вузов. 12-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2008. 408 с.

3. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Влияние анаэробных материалов на распределение нагрузки в резьбовом соединении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 6. С. 34–39.

4. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Комплексное повышение эксплуатационных характеристик резьбовых соединений при сборке с анаэробными материалами // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 41–46.

5. Кочетков Д. В., Воячек И. И., Зверовщиков А. Е. Разработка и исследование функциональных моделей резьбовых соединений типа стяжки при сборке с анаэробными материалами // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 4 (20). С. 115–127.

6. Voyachek I. I., Sága M., Ságová Z. [et al.]. Providing Cyclic Robustness of Bolted Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Novel Trends in Production Devices and Systems V : Materials Science Forum, Trans Tech Publications, Switzerland Publishing house. 2019. Vol. 952. P. 3–12. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.3, ISSN: 02555476

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the
department of technologies
and equipment of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Металлорежущие станки»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of technical sciences,
associate professor, head of the
department of metal cutting
machines, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ярослав Валентинович Власов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tmspgu@mail.ru

Yaroslav V. Vlasov

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Александр Максимович Пучков
студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: p04alex19@yandex.ru

Alexander M. Puchkov
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.357

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА НИКЕЛИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВИБРАЦИИ КАТОДА

**Лев Васильевич Наумов¹,
Андрей Николаевич Вантеев²,
Павел Сергеевич Орещенко³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема диффузионных ограничений в гальвано-технике, ведущих к снижению качества и скорости формирования никелевых покрытий. Показана недостаточная эффективность традиционных методов перемешивания электролита. В качестве решения предложено использование вибрации катода для интенсификации массопереноса в прикатодной области. Проведено экспериментальное исследование влияния вибрации катода на скорость осаждения и морфологию никелевого покрытия. Установлено, вибрация катода приводит к увеличению выхода по току на 9 % относительно стационарного режима осаждения и увеличению скорости осаждения. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность метода для управления структурой и свойствами функциональных гальванических покрытий в станкостроении.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, никелирование, вибрация катода, диффузионные ограничения, интенсивность осаждения, выход по току, морфология, детали станков

INTENSIFICATION OF THE NICKEL PLATING PROCESS OF MACHINE EQUIPMENT PARTS DURING CATHODE VIBRATION

Lev V. Naumov¹, Andrey N. Vanteev², Pavel S. Oreshchenko³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The problem of diffusion limitations in electroplating, leading to a decrease in the quality and rate of formation of nickel coatings, is considered. The insufficient

effectiveness of traditional methods of electrolyte mixing is shown. As a solution, it is proposed to use cathode vibration to intensify mass transfer in the cathode region. An experimental study of the effect of cathode vibration on the deposition rate and morphology of the nickel coating has been carried out. It was found that the vibration of the cathode leads to an increase in current output by 9 % relative to the stationary deposition mode and an increase in the deposition rate. The results obtained demonstrate the high efficiency of the method for controlling the structure and properties of functional electroplating in machine tool manufacturing.

Keywords: electroplating, nickel plating, cathode vibration, diffusion limitations, deposition intensity, current output, morphology, machine parts

Современное станкостроение предъявляет повышенные требования к долговечности, надежности и точности работы технологического оборудования. Ключевым фактором, определяющим ресурс и стабильность характеристик металлорежущих станков, является состояние и свойства поверхностного слоя ответственных деталей, таких как шпиндели, направляющие, подшипники качения, зубчатые колеса и другие элементы кинематических пар и силовых передач [1]. В условиях интенсивных механических нагрузок, вибраций и агрессивного воздействия технологических сред (смазочно-охлаждающих жидкостей, атмосферной влаги) именно поверхность становится очагом возникновения усталостных трещин, коррозионного разрушения и абразивного износа.

Эффективным методом повышения функциональных свойств поверхностей деталей является нанесение защитно-упрочняющих покрытий. Среди многообразия способов формирования поверхностных слоев гальванические покрытия занимают одно из ведущих мест благодаря возможности точного контроля толщины, состава и структуры получаемых осадков, высокой производительности и относительной экологической контролируемости процессов [2]. В частности, никелевые и композитные на его основе покрытия широко востребованы для защиты от коррозии, повышения износостойкости и восстановления геометрических размеров изношенных деталей. Никель обладает удовлетворительной твердостью, хорошей адгезией к стальным основам и коррозионной стойкостью в ряде эксплуатационных сред [3].

Однако традиционный процесс гальванического осаждения никеля и его сплавов имеет ряд фундаментальных технологических ограничений. Наиболее существенным из них является диффузионное торможение, возникающее в прикатодном слое электролита. В процессе электрохимического разряда ионов металла их концентрация у поверхности катода истощается, что приводит к возникновению концентрационной поляризации и, как следствие, к снижению скорости осаждения. При достижении предельного диффузионного тока начинаются

побочные процессы, наиболее частым из которых является разряд ионов водорода, приводящий к образованию дефектов покрытия – пор, раковин, повышенной шероховатости и ухудшению адгезии [4]. Данное явление становится особенно критичным при получении толстых покрытий (более 50 мкм), необходимых для восстановительных операций, и при осаждении сплавов, где требуется точное поддержание процентного соотношения компонентов.

Для снижения диффузионных ограничений в гальванотехнике традиционно применяют механическое перемешивание электролита, барботаж инертным газом или катодное вращение. Однако, как отмечают многие исследователи, эффективность этих методов ограничена существованием неподвижного диффузионного пограничного слоя (ламинарного подслоя), в пределах которого скорость движения жидкости асимптотически стремится к нулю [5]. Таким образом, интенсификация массопереноса в непосредственной близости от катода остается актуальной научно-технической задачей.

Одним из перспективных направлений интенсификации электрохимических процессов является применение вибрации катода.

Эффект от воздействия вибрации катода не сводится только к интенсификации массопереноса. Как показывают исследования, вибрация катода может влиять на стадию кристаллизации, способствуя формированию более мелкозернистой и однородной структуры покрытия [6]. Это открывает возможности для целенаправленного управления не только скоростью процесса, но и функциональными характеристиками получаемых покрытий – твердостью, износостойкостью, внутренними напряжениями.

Таким образом, разработка и исследование технологий электрохимического осаждения покрытий с применением вибрации катода является высокоактуальной задачей, направленной на создание ресурсосберегающих и высокоэффективных процессов для машиностроительной отрасли, в том числе для производства и восстановления деталей станочного оборудования.

Целью работы являлось исследование влияния вибрации катода на выход по току, морфологию и физико-механические свойства покрытий. Для экспериментов был выбран электролит, следующего состава (г/л): $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 110–120; H_3BO_3 – 25; KCl – 5; $\text{pH} = 4 - 5$.

Вибрация катода изучалась на вибрационной установке с частотой колебания катода 50 Гц.

Зависимость величины предельной плотности тока от амплитуды вибрации катода (рис. 1) показывают, что разряд ионов никеля в области предельных токов протекает со смешанной кинетикой. При

небольших амплитудах вибрации катода электрохимическая реакция протекает в диффузионном режиме. При амплитуде вибрации больше 0,3 мм преобладает кинетический режим, и ток в меньшей степени зависит от амплитуды.

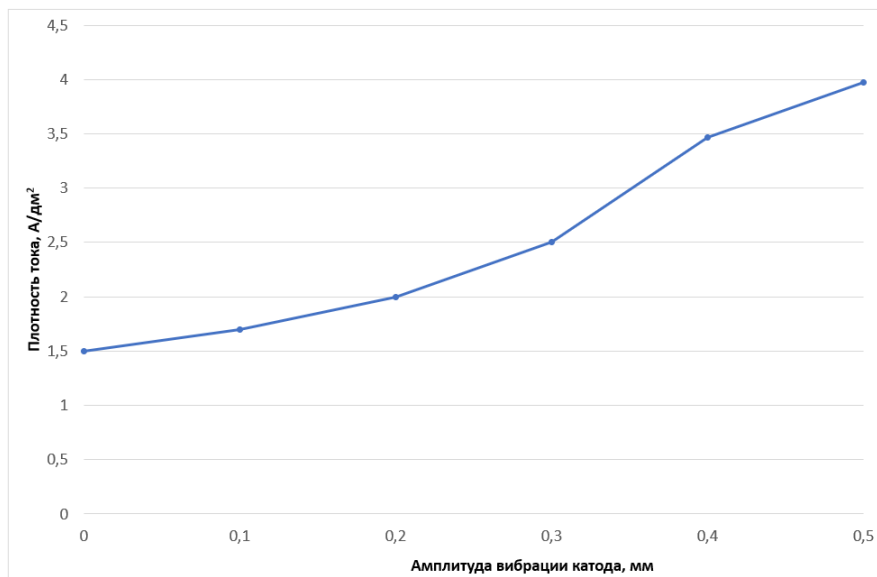


Рис. 1. Зависимость величины предельной плотности тока от амплитуды вибрации катода

В дальнейшие исследования проводились при амплитуде вибрации катода равной 0,5 мм.

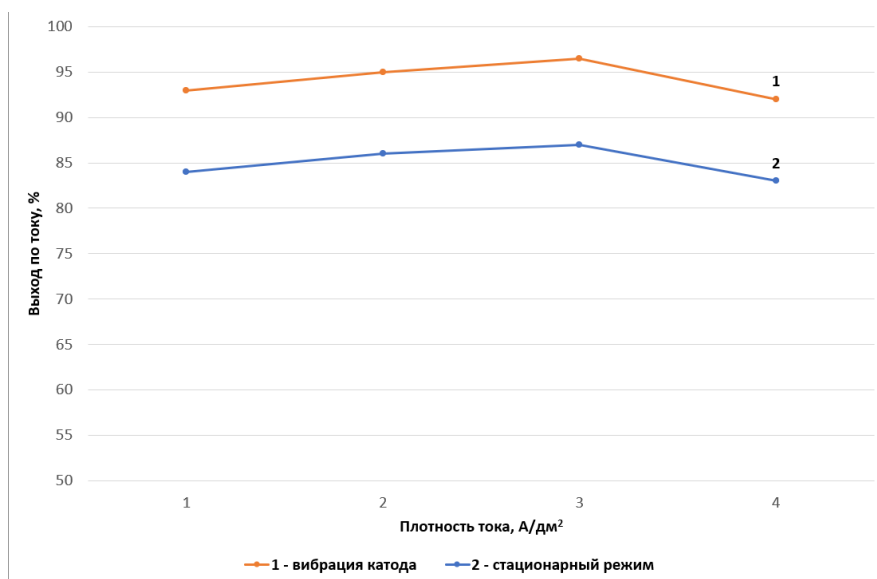


Рис. 2. Зависимость выхода по току никеля от плотности тока

Выход по току никеля зависит от плотности тока. Применение вибрации катода повышает выход по току на 9 %, относительно стационарного режима осаждения.

На постоянном токе блестящие никелевые покрытия осаждаются при плотности тока от 1 до 1,5 А/дм². Применение вибрации катода позволяют получать блестящие покрытия при плотностях тока 2–2,5 А/дм².

Визуальный и микроскопический анализ показал, что покрытия, полученные при вибрации катода, имеют более однородный, мелкозернистый вид с меньшим количеством дефектов, что коррелирует с уменьшением диффузионных ограничений и подавлением побочной реакции выделения водорода.

Экспериментально подтверждена высокая эффективность использования вибрации катода для интенсификации процесса электроосаждения никелевого покрытия. Установлено, что вибрация катода не только в 1,5–2 раза увеличивает скорость формирования покрытия, но и способствует формированию более мелкозернистых осадков, что открывает новые возможности для управления свойствами покрытия. Полученные результаты представляют значительный практический интерес для станкостроения, так как позволяют разрабатывать высокоскоростные и энергоэффективные технологии нанесения износостойких и коррозионно-стойких покрытий на ответственные детали станочного оборудования.

Список литературы

1. Решетов Д. Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. М. : Машиностроение, 1972. Т. 1. 662 с.
2. Ажогин Ф. Ф., Беленький М. А., Галль И. Е. [и др.]. Гальванотехника : справ. изд. М. : Металлургия, 1987. 736 с.
3. Гальванотехника : справочник / под ред. А. М. Гинберга, А. Ф. Иванова, Л. Л. Кравченко. М. : Металлургия, 1987. 735 с.
4. Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия. Технология, характеристики, применения : справочник. Долгопрудный : Интеллект, 2018. 232 с.
5. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М. : Химия, 1967. 856 с.
6. Виноградов С. Н., Наумов Л. В., Виноградов О. С. [и др.]. Новые гальванические покрытия и режимы электроосаждения // Новые технологии в образовании, науке и экономике : тр. XVI Междунар. симп. М. : Инф.-изд. центр Фонда поддержки вузов, 2007. С. 60–66.

Информация об авторах / Information about the authors

Лев Васильевич Наумов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: LVN-25@ yandex.ru

Lev V. Naumov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of technologies and
equipment of mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Андрей Николаевич Вантеев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Теоретическая
прикладная механика и графика»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: vanteev-79@mail.ru

Andrey N. Vanteev

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of theoretical
applied mechanics and graphics, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Павел Сергеевич Орещенко

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: paveloreshenko@list.ru

Pavel S. Oreshchenko

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 621.923.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Виктор Иванович Бурлаков¹,
Галина Юрьевна Бурлакова²,
Виктор Геннадиевич Артюх³,
Дарья Анатольевна Китаева⁴,
Николай Васильевич Корихин⁵**

^{1,2}Приазовский государственный технический университет,
Мариуполь, Россия

^{3,4,5}Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследованы детерминирующие факторы, определяющие эффективность процесса вибрационной обработки деталей механического оборудования.

Разработана комплексная математическая модель, интегрирующая ряд частных моделей, которая обеспечивает возможность анализа динамических характеристик рабочей среды с учетом специфических свойств обрабатываемого объекта. Предложенная модель базируется на анализе влияния физико-механических параметров на кинетику технологического процесса и может найти применение в инженерно-технических расчетах для прогнозирования величины съема металла, являющегося ключевым критерием производительности вибрационной обработки.

Ключевые слова: форма контейнера, вибрационная обработка, контейнер, гранула, переносная сила инерции, относительное движение, уравнения движения контейнера

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00921).

STUDY OF PRODUCTIVITY OF VIBRATION TREATMENT OF MECHANICAL EQUIPMENT PARTS

Viktor I. Burlakov¹, Galina Yu. Burlakova²,
Viktor G. Artiukh³, Daria A. Kitaeva⁴, Nikolay V. Korihin⁵

^{1,2}Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Russia

^{3,4,5}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The determining factors determining the efficiency of the process of vibration treatment of mechanical equipment parts are investigated. A complex mathematical model has been developed that integrates a number of particular models, which provides the possibility of analyzing the dynamic characteristics of the working medium, taking into account the specific properties of the processed object. The proposed model is based on the analysis of the effect of physical and mechanical parameters on the kinetics of the technological process and can be used in engineering calculations to predict the amount of metal removal, which is a key criterion for vibration processing performance.

Keywords: container shape, vibration treatment, container, granule, transfer inertial force, relative motion, equations of container motion

Financing: the study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (project № 25-19-00921).

Обладая значительным технологическим потенциалом, вибрационная обработка открывает широкие перспективы для внедрения в промышленное производство. Данный метод основан на процессе множественного микросоударения гранул абразивного материала о поверхность обрабатываемой детали, инициируемого направленными колебаниями, передаваемыми в рабочую зону. Удаление материала является следствием явления механического или механохимического диспергирования мельчайших частиц основного металла и его оксидных пленок с обрабатываемой поверхности посредством абразивных гранул. В настоящее

время вопросами оптимизации и развития указанной технологии активно занимается научное сообщество [1].

Интенсификация и конечный результат обработки находятся в прямой зависимости от ряда технологических переменных. На процесс оказывают влияние скорость относительного скольжения абразивных элементов, площадь контакта детали со средой и уровень её уплотнения, обуславливающий изменение реологических характеристик (коэффициентов вязкости и трения). Дополнительными регулируемые параметрами выступают: конфигурация рабочего органа (контейнера), его частотно-амплитудные режимы, а также гранулометрическое и количественное соотношение обрабатываемых объектов и абразивных частиц.

С целью анализа динамических характеристик движения рабочей среды с учетом специфики исследуемого технологического процесса была разработана соответствующая математическая модель. Уравнение динамики относительного перемещения компонентов загрузки, основанное на принципе суперпозиции, при котором абсолютная траектория гранулы рассматривается как геометрическая сумма двух независимых перемещений [2], представляется в форме:

$$m\vec{a}_{\text{отн}} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_{\text{пер}}^{\text{ин}}, \quad (1)$$

где $m\vec{g}$ – сила тяжести гранулы, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\vec{N}$ – результирующая реакций связей, накладываемых на гранулу со стороны других элементов загрузки и стенок контейнера; $\vec{F}_{\text{тр}} = fN$ – сила трения, приложенная к грануле; f – коэффициент трения, зависящий от материалов и состояния контактирующих тел; $\vec{F}_{\text{пер}}^{\text{ин}}$ – переносная сила инерции,

$$\vec{F}_{\text{пер}}^{\text{ин}} = -m\vec{a}_{\text{пер}}. \quad (2)$$

Кинематические уравнения, характеризующие движение контейнера, являются основой для определения как скалярного значения, так и пространственной направленности переносного ускорения, что реализуется через расчетные зависимости (1) и (2) [2].

Путем проецирования векторного уравнения (1) на координатные оси получена система дифференциальных уравнений, описывающих относительное движение гранулы в произвольной точке пространства рабочего контейнера.

Полученная система дифференциальных уравнений движения элементов загрузки дает возможность провести детальный анализ кинематических характеристик деталей в различных зонах контейнера. На основе данного анализа становится возможным определение экстремальных значений производительности технологического процесса вибрационной обработки.

В представленной работе анализируется зависимость параметров виброобработки мелких плоских деталей от геометрических характеристик контейнера. Актуальность исследования обусловлена необходимостью установления влияния формы вертикальных стенок и поперечного сечения рабочей камеры на интенсивность механохимического диспергирования металла вблизи её периметра. Дополнительно проведено сопоставление многоугольной и цилиндрической конфигураций сечения с позиции анализа режимов соударения элементов загрузки с ограждающими поверхностями (рис. 1).

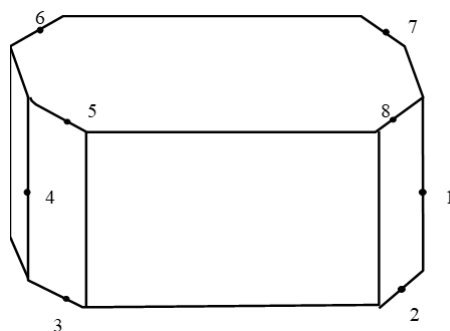


Рис. 1. Расположение исследуемых элементов загрузки в контейнере

В ходе работы была исследована функциональная зависимость между конфигурацией рабочего объема и технологической эффективностью вибрационного воздействия на мелкогабаритные плоские объекты. Отдельное внимание уделено динамическому поведению пограничных компонентов массы загрузки; для его характеристики проведена количественная оценка влияния горизонтального перемещения контейнера на абразивные гранулы, находящиеся в непосредственной близости от ограждающих поверхностей [3]. На рис. 2 представлена схематическая проекция контейнера сверху, отображающая предлагаемую конфигурацию поперечного сечения вибрационного оборудования.

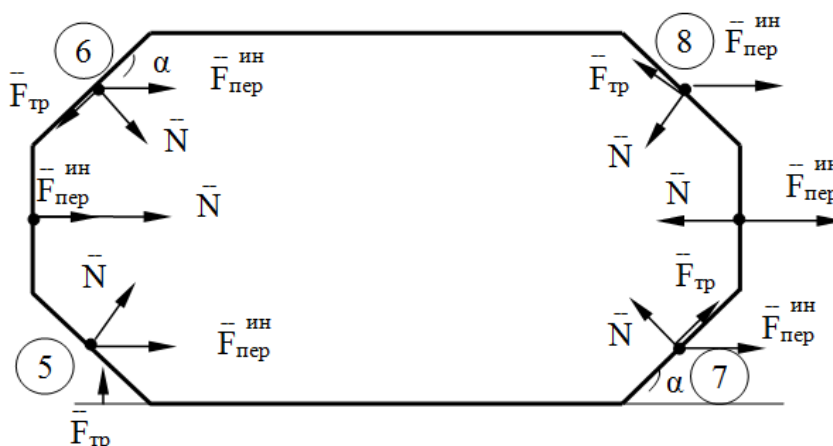


Рис. 2. Схема сил в крайнем правом положении дебаланса:
 α — угол, характеризующий форму сечения контейнера

Проанализирована кинематика элементов загрузки в пристеночных зонах с оценкой воздействия на них вертикальных и горизонтальных составляющих колебательного движения контейнера. Результаты исследования свидетельствуют о возникновении нормального давления на элементы загрузки вблизи точек 7 и 8 со стороны стенок контейнера. Установлено, что для многоугольного сечения данный параметр имеет меньшие значения и находится в прямой зависимости от угла α , возрастая с его увеличением.

Проведенный анализ результатов позволяет заключить, что в условиях крайнего правого положения дебаланса, горизонтальные составляющие нормальных и касательных сил реакции со стороны левых стенок отсутствуют при использовании прямолинейных ограждающих конструкций. Данные силовые факторы могут проявляться в конфигурациях с криволинейными (круглыми) сечениями, где допускается относительное перемещение деталей в горизонтальной плоскости.

Экспериментально подтверждено, что модификация геометрии контейнера обеспечивает возможность управления направлением потоков загрузки. Целенаправленное смещение потоков приводит к росту механического давления на обрабатываемые объекты, а интенсивное перемешивание массы способствует разрушению адгезионных связей.

Разработанная математическая модель, устанавливающая корреляцию между физико-механическими свойствами системы и параметрами обработки, применима для инженерного прогнозирования интенсивности съема металла, выступающего ключевым критерием производительности вибрационной технологии.

Список литературы

1. Бабичев А. П., Мотренко П. Д. [и др.] Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств. Ростов н/Д. : Изд-во ДГТУ, 2006. 624 с.
2. Бурлаков В. И. Моделирование движения рабочего контейнера при вибрационной обработке // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2014. Вып. 28. С. 162–166.
3. Проволоцкий А. Е., Лапшин С. П., Негруб С. Л., Ласкин В. М. Формирование развитых микрорельефов поверхностей // Резание и инструмент в технологических системах. 2004. Вып. 66. С. 153–162.

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Иванович Бурлаков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Транспортный
инжиниринг и цифровизация»,
Приазовский государственный
технический университет (Россия,
г. Мариуполь, ул. Университетская, 7)
e-mail: burlakovviktor3169@mail.ru

Viktor I. Burlakov

Candidate of technical sciences,
associate professor, head of the
department of transport engineering
and digitalization, Priazovsky
State Technical University
(7 Universitetskaya street,
Mariupol, Russia)

Галина Юрьевна Бурлакова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Логистика
автомобильного транспорта»,
Приазовский государственный
технический университет (Россия,
г. Мариуполь, ул. Университетская, 7)
e-mail: burlakovviktor3169@mail.ru

Galina Yu. Burlakova

Candidate of technical sciences,
associate professor, head of the
department of motor transport
logistics, Priazovsky State
Technical University
(7 Universitetskaya street,
Mariupol, Russia)

Виктор Геннадиевич Артюх

доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы механики
и процессов управления,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
e-mail: artiukh@mail.ru

Viktor G. Artiukh

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the higher
school of mechanics and process
control, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic
University (29 Polytechnicheskaya
street, St. Petersburg, Russia)

Дарья Анатольевна Китаева

кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент Высшей школы
механики и процессов управления,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
e-mail: dkitaeva@mail.ru

Daria A. Kitaeva

Candidate of physics and
mathematics sciences, associate
professor, associate professor of the
higher school of mechanics and
process control, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic
University (29 Polytechnicheskaya
street, St. Petersburg, Russia)

Николай Васильевич Корихин

кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы механики
и процессов управления,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29)
e-mail: nkorihin@gmail.com

Nikolay V. Korihin

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the higher school
of mechanics and process control,
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street,
St. Petersburg, Russia)

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Виктор Иванович Бутенко

Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассмотрены методы комбинированной обработки поверхностей деталей металлорежущих станков и промышленных роботов и определены области наиболее эффективного их применения. Раскрыта сущность предлагаемых методов комбинированной обработки деталей и даны рекомендации по их практическому применению в производстве.

Ключевые слова: деталь, методы обработки, металлорежущие станки, промышленные роботы, условия эксплуатации

COMBINED METHODS OF MACHINING PARTS OF MACHINE TOOLS AND INDUSTRIAL ROBOTS

Viktor I. Butenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The paper considers the methods of combined machining of the surfaces of parts of metal-cutting machines and industrial robots and identifies the areas of their most effective application. The essence of the proposed methods of combined machining of parts and recommendations for their practical application in production are given.

Keywords: part, processing methods, metal-cutting machines, industrial robots, operating conditions

В современном станко- и роботостроении значительная часть деталей изготавливается из высоколегированных сталей и сплавов, к которым предъявляются высокие требования по износостойкости, выносливости и коррозионной стойкости. В ОАО «Ейский станкостроительный завод» совместно с проектно-конструкторским и технологическим институтом кузнечно-прессового роботостроения (г. Таганрог) разработаны комбинированные методы обработки различных деталей металлорежущих станков (МС) и промышленных роботов (ПР), обеспечивающие требуемые показатели качества поверхностного слоя (ПС) деталей в зависимости от условий их эксплуатации.

В соответствии с разработанным классификатором методов комбинированной обработки КО деталей [1, 2] перспективным технологическим направлением КО прецизионных деталей МС и ПР является метод фрикционно-упрочняющей обработки с образованием регулярного

рельефа на обрабатываемых поверхностях деталей [3], при котором рабочая поверхность детали предварительно подвергается виброобработке на специальной установке для создания на ней необходимых качественных характеристик, а затем на поверхность детали синхронно по циклам электролитическим путем наносится тонкий слой покрытия (например, никеля или хрома). После каждого нанесенного слоя покрытия проводится виброобработка ПС детали (например, виброобкатывание). В результате износостойкость деталей повышается в 2,0–2,5 раза по сравнению с обычным никелированием или хромированием при одновременном повышении коррозионной стойкости материала ПС и герметичности соединений.

Для финишной обработки сопрягаемых поверхностей прецизионных деталей, выполняющих функции запорных устройств для регулирования отсечки подачи жидких, газообразных и газожидкостных сред в устройствах управления МС и ПР, разработана и апробирована в производственных условиях технология КО, сущность которой состоит в том, что финишная обработка указанных деталей выполняется доводочными операциями без использования абразивных материалов путем и состоит из двух этапов. На первом этапе производят эрозионно-химическое удаление макро- и микронеровностей путем анодного растворения металла ПС деталей с вершин неровностей обеих сопрягаемых поверхностей. На втором этапе проводится выравнивание микропрофиля сопрягаемых поверхностей деталей за счет комбинированного воздействия серии электрических разрядов при одновременном анодном растворении выступов микронеровностей ПС. Под действием электрических разрядов и давления на поверхностях сопрягаемых деталей возникают неровности в форме сферических лунок, диаметр и глубина которых зависят от свойств обрабатываемого материала детали и режимов КО. При этом одна часть этих лунок способствует удалению геометрических погрешностей профиля поверхности детали, другая – формирует микронеровности, определяющие шероховатость поверхности. Практика показала, что электрохимическая составляющая такой КО деталей способствует сглаживанию микропрофиля и снижению неровностей ПС до наноуровня, соответствующего окончательному способу доводки. В этом случае соотношение между диаметром и глубиной лунки регулируются в зависимости от требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности детали [4].

Отличительной особенностью такой КО деталей МС и ПР является отсутствие шаржированных абразивных зерен на рабочих поверхностях прецизионных деталей. Как показали результаты подконтрольной эксплуатации изделий, проведенной на ряде предприятий машиностроения Ростовской области, разработанная КО сопрягаемых поверхностей прецизионных деталей обеспечивает высокую точность получаемых размеров, что дает возможность устранить нарушения

герметичности запорных устройств в период эксплуатации и обеспечить требуемые пределы усилий для их быстрого срабатывания в механизмах МС, ПР и других машин и механизмов.

Весьма перспективным направлением КО поверхностей деталей МС и ПР является механо-импульсная обработка, которая в отличие от других способов поверхностного пластического деформирования материала ПС деталей позволяет управлять структурой материала упрочненного ПС и его физико-механическими свойствам на большой глубине, что особенно важно при работе деталей в условиях совместного действия высоких контактно-усталостных нагрузок и изнашивания. Эффект высокой работоспособности деталей достигается за счет совмещения импульсной упрочняющей обработки ПС детали с химико-термической обработкой (например, цементацией или азотированием). Подконтрольная эксплуатация токарных гидрокопировальных станков и цикловых ПР в автоматических линиях показала, что применение механо-импульсной обработки, совмещенной, например, с цементацией, особенно эффективно при обработке ответственных высоконагруженных деталей (шестерней, червяков, шлицевых валов, элементов подшипников качения, втулок, кулачковых муфт, направляющих в конструкциях МС и ПР, шкворней, пальцев, валиков и т.д.), к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины при высокой поверхностной твердости и трещиностойкости.

В производственных условиях проведены исследования КО валов и осей с использованием таких концентрированных источников теплоты, как лазерное и электронно-лучевое воздействие. Было установлено, что выбор метода КО поверхностей деталей трибосистем МС и ПР с использованием концентрированных источников теплоты зависит от многих факторов, основными из которых являются: материал детали, состояние ПС после предыдущей обработки и вид применяемого концентрированного источника теплоты. При этом необходимо учитывать комплексное влияние внешних воздействий на процесс принятого метода КО детали, которое может оказаться значительно интенсивнее прямого воздействия концентрированных источников теплоты и нейтрализовать или даже ухудшить суммарный результат обработки [1].

Для сокращения технологического цикла и более полного использования собственных производственных мощностей предприятия разработан метод комбинированного магнитно-импульсного воздействия на материал ПС деталей трибосистем МС и ПР [5]. Исследования показали, что отделочно-упрочняющая обработка деталей с применением дополнительной магнитно-импульсной обработки позволяет стабилизировать величину технологических остаточных напряжений в материале ПС, что особенно благоприятно сказывается на работоспособности корпусных деталей МС и ПР.

Практика внедрения в станко- и роботостроение различных комбинированных методов обработки деталей показала, что одним из наиболее радикальных и эффективных путей решения производственных задач, связанных с повышением работоспособности деталей МС и ПР, является КО ПС деталей с применением индукционного нагрева обрабатываемого материала [1, 3]. В настоящее время этот метод КО деталей хорошо отработан в технологическом плане как на экспериментальном, так и производственном уровнях, в достаточной степени оснащен необходимым оборудованием, прост и экономичен в осуществлении, не требует сложной защиты обслуживающего персонала от влияния вредных и опасных факторов, а также специальной подготовки поверхности детали для обработки. Существенными преимуществами этого метода КО деталей машин является то, что он легко управляем режимными параметрами, стабилен в протекании процесса, вполне универсален в плане конфигурации упрочняемых поверхностей и базируется на серийно выпускаемых стандартных генераторах ТВЧ, многие из которых модифицированы на комплексное использование эффектов, присущих явлению электромагнитной индукции.

В ряде случаев в станко- и роботостроении может найти применение комбинированная плазменно-механическая обработка поверхностей деталей, из хромоникелевых сталей и сплавов, подвергаемых в процессе эксплуатации интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию. Однако современное состояние технологий и оборудования на предприятиях станко- и роботостроения не дает возможность в полной мере использовать такой метод КО для повышения работоспособности деталей МС и ПР. Тем не менее, низкотемпературная газоразрядная плазма комбинированного разряда нашла применение в области инструментального производства для повышения стойкости режущего инструмента, что дает повод использовать ее для структурной модификации материала ПС деталей МС и ПР при соблюдении определенных требований к конфигурации и размерам обрабатываемых деталей [4].

Таким образом, в современном станко- и роботостроении разработаны и находят применение различные методы КО деталей, позволяющие успешно решать задачи повышения работоспособности изделий, эксплуатируемых в различных условиях. Выбор комбинированного метода обработки деталей МС и ПР зависит не только от условий их эксплуатации, но и производственных возможностей конкретного предприятия.

Список литературы

1. Бутенко В. И. Эффективные технологии и процессы обработки деталей машин. Ростов н/Д. : Изд. центр ДГТУ, 2025. 320 с.

2. Кулинский А. Д., Бутенко В. И. Комбинированные методы обработки поверхностей деталей трибосистем. Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2013. 220 с.
3. Бутенко В. И., Дуров Д. С., Шаповалов Р. Г. Наукоемкие технологии создания высокоресурсных деталей машин. Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2014. 404 с.
4. Бутенко В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов н/Д. : Изд. центр ДГТУ, 2017. 481 с.
5. Печагин А. П., Болдырев А. А., Смоленцев В. П. Влияние магнитоимпульсной обработки на поверхностный слой детали // Современные технологии производства в машиностроении : сб. науч. тр. Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2011. Вып. 15. С. 113–119.

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Иванович Бутенко

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
машиностроения», Донской
государственный технический
университет (Россия, г. Ростов-
на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: butenkowiktor@yandex.ru

Viktor I. Butenko

Doctor of technical science, professor,
professor of the department
mechanical engineering technology,
Don State Technical University
(1 Gagarin square, Rostov-on-Don,
Russia)

УДК 621

ВИБРАЦИОННАЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ

**Валерий Александрович Лебедев¹,
Николай Сергеевич Коваль²**

^{1,2}Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Раскрыта сущность вибрационной стабилизирующей обработки и технологические схемы ее реализации применительно к корпусным деталям станков. Представлена методика и рекомендации выбора технологической схемы и режимов обработки, обеспечивающих геометрическую точность, стабильность размеров и формы деталей в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: вибрационная стабилизирующая обработка, корпусные детали, геометрическая точность

VIBRATION STABILIZING TREATMENT OF MACHINE TOOL PARTS

Valery A. Lebedev¹, Nikolay S. Koval²

^{1,2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. This article describes the essence of vibration stabilizing treatment and the process flow diagrams for its implementation as applied to machine tool parts. The article presents the methodology and recommendations for choosing a technological process scheme and processing modes that ensure geometric accuracy, dimensional stability, and shape of parts during their operation.

Keywords: vibration stabilizing treatment, machine tool parts, geometric accuracy

Вибрационная стабилизационная обработка (ВиСО) – это методологический подход, при котором детали подвергаются воздействию периодических, полигармонических или гармонических ударных колебаний, находящихся в звуковом диапазоне частот. Основная цель данной процедуры заключается в обеспечении стабильности и сохранении точности геометрических параметров обрабатываемых объектов [1–3].

На практике ВиСО может быть реализована посредством различных технических решений. Одним из наиболее распространенных методов является установка детали на виброплатформу, которая генерирует необходимые колебательные воздействия. Альтернативно, к детали могут быть прикреплены вибровозбудители в количестве, необходимых для обеспечения требуемого режима колебаний. Кроме того, возможно применение метода ударного воздействия на поверхность детали, что инициирует её собственные колебательные процессы после каждого приложенного удара (рис. 1).

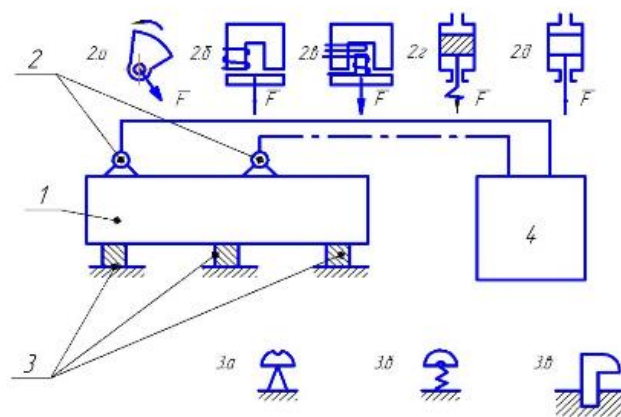


Рис. 1. Схема процесса вибрационной стабилизирующей обработки:
1 – обрабатываемая деталь; 2 – вибровозбудители (а – дебалансный;
б – электромагнитный; в – электродинамический; г – гидравлический;
д – пневматический); 3 – опоры (а – свободная; б – упругая; в – заделка);
4 – устройство управления

Вибрационная стабилизация материалов – это метод, направленный на уменьшение остаточных напряжений и повышение устойчивости к релаксационным процессам за счет микропластической деформации. Данный подход представляет собой эффективный инструмент для оптимизации свойств материалов в условиях сложных напряженных состояний, характеризующихся анизотропией и неоднородностью структуры.

Ключевым элементом системы вибрационной стабилизации (ВиСО) является деталь, находящаяся под воздействием многоосного нагружения. Эффективность процесса определяется параметрами вибровоздействия, такими как место, характер, направление и вид опорных элементов, на которые воздействует вибрационная сила.

Технологический режим вибрационной стабилизации включает комплекс параметров, таких как тип вибрационного воздействия, его частота, амплитуда и фаза. Эти параметры играют решающую роль в достижении оптимальных результатов стабилизации.

Область применения вибрационной стабилизации охватывает широкий спектр материалов, используемых в заготовках и производственных структурах машиностроительной отрасли, где требуется высокая точность и надежность материалов.

Для реализации методов вибрационной стабилизации разработаны специализированные установки, такие как УВС, УВСД и И9-07, предназначенные для использования как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Эти установки обеспечивают возможность проведения исследований и производственных процессов с высокой степенью контроля. Это позволяет достичь высочайшей воспроизводимости результатов при повторении опытов разными исследователями, и делает вибрационную стабилизацию важным инструментом в арсенале современных технологий обработки материалов.

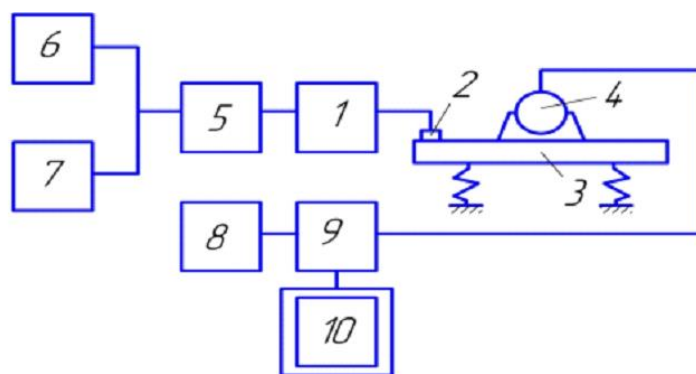


Рис. 2. Блок-схема установки УВС:

- 1 – согласующее устройство; 2 – акселерометр; 3 – деталь; 4 – вибратор;
5 – прибор ИШВ1; 6 – осциллограф; 7 – частотомер ЧЗ-7; 8 – блок
управления частотой; 9 – тиристорный выпрямитель; 10 – ваттметр

Системы управления технологическим процессом (СУТП) ВиСО регулируют режимы обработки и оптимизируют энергопотребление. Основным элементом системы управления технологическим процессом являются высокооборотные электродвигатели с частотой вращения до 7500 оборотов в минуту и мощностью в диапазоне от 1,5 до 2,5 киловатт, с током до 120 ампер. Эти компоненты определяют архитектуру установок. Ключевым компонентом данных систем является тиристорный выпрямительный модуль, который обеспечивает необходимую функциональность и эффективность работы системы.

Выбор схем и режимов обработки ВиСО осуществляется на основе анализа характеристик обрабатываемого материала, геометрии и формы детали. Технологический процесс разрабатывается с учетом норм точности, возможных деформаций и базовых элементов, таких как плоскости, цилиндры и кольца.

На этапе проектирования технологии проводится комплексный анализ геометрии детали, включающий оценку допусков и отклонений, а также прогнозирование потенциальных короблений. Эти данные являются критически важными для оптимизации параметров обработки и обеспечения требуемого качества поверхности.

Таким образом, комплексный подход к выбору схем и режимов ВиСО, основанный на глубоком анализе исходных данных и характеристик обрабатываемого материала, позволяет существенно повысить эффективность технологического процесса и качество конечного продукта.

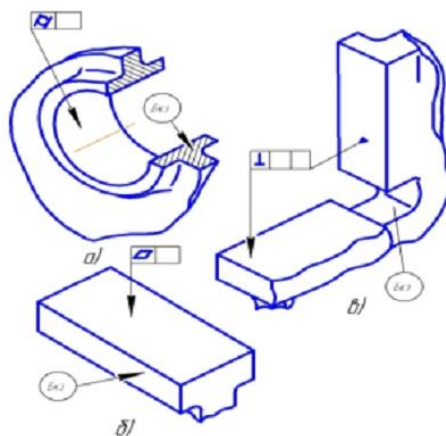


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая определение базового коэструктивного элемента (БКЭ): а) БКЭ-носитель базовой цилиндрической поверхности; б) БКЭ-носитель базовой плоскости; в) БКЭ-сочленение носителей базовых плоскостей

В процессе разработки упрощенной модели детали необходимо тщательно учитывать её структурные характеристики, которые должны коррелировать с наблюдаемыми деформациями коробления для обеспечения точности и эффективности анализа. На основании комплексного

исследования конструктивных особенностей и характера деформаций выбирается оптимальная схема виброударной стабилизации отклонений (ВиСО), которая минимизирует нежелательные отклонения.

Для простых балок, у которых одна основная поверхность (например, параллельные плоскости или цилиндры), лучше всего подходит одновибраторная схема ВиСО. Если предстоит работа с легкими и жесткими деталями, такими как балки, кольца или плиты (весом в десятки кило), оптимально использование этой схемы с накладными грузами. Грузы нужно ставить там, где колебания сильнее всего, чтобы всё работало лучше и стабильнее.

Для сложных деталей с несколькими поверхностями, например, коробчатых, предпочтительнее использовать двухвибраторную схему с рассинхронизацией. Важно, чтобы самая деформируемая часть конструкции была между вибраторами. Это поможет лучше распределить вибрацию и уменьшить ненужные эффекты.

Ударно-вибрационная схема демонстрирует высокую эффективность при обработке малых жестких деталей с первыми собственными частотами изгибных колебаний свыше 200 Гц. Ударник следует размещать напротив точки детали, соответствующей максимуму амплитуды возбуждаемых колебаний, что позволяет максимизировать эффективность демпфирования. Материал и форма ударника должны быть подобраны таким образом, чтобы минимизировать время соударения, приближая его к периоду колебаний по желаемой собственной форме, что способствует достижению оптимального результата.

Амплитуда циклических напряжений в процессе виброударной обработки (ВиСО) должна быть эквивалентной или превосходящей эксплуатационные требования. Это обеспечивает высокую надежность и долговечность обрабатываемых деталей. Контроль параметров осуществляется посредством тензометрии или виброизмерений, что позволяет проводить оперативный мониторинг эффективности процесса. Критерием успешности ВиСО является закономерное снижение энергопотребления в течение заданного временного интервала, что свидетельствует об оптимальном балансе между производительностью и энергозатратами.

Для типовых корпусных деталей, подвергаемых виброударной обработке, снижение энергопотребления может достигать значительных величин, варьирующихся в диапазоне от десятков до сотен ватт, что указывает на высокую эффективность данного метода. Временные параметры обработки регулируются амплитудой и частотой возбуждающих сил, что позволяет поддерживать высокую производительность даже при ритме производства, составляющем несколько минут. Таким образом, виброударная стабилизация отклонений представляет собой высокоэф-

фективный метод обработки деталей, позволяющий достигать высоких показателей точности, надежности и производительности.

В заключение следует отметить, что ВиСО в силу своей высокой производительности, по сравнению с методами, основанными на использовании температурного воздействия является наиболее перспективным (особенно для корпусных станочных деталей) деформационным методом стабилизирующей обработки.

Список литературы

1. Гаврюсев В. И. Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1981. 145 с.

2. Тамаркин М. А., Шевцов С. Н., Лебедев В. А., Пастухов Ф. А. Технология вибрационной стабилизирующей обработки изделий машиностроения // Научные технологии в машиностроении. Ростов-н/Д. : ДГТУ, 2018. С. 20–26.

3. Белозеров М. А., Лебедев В. А. Предпосылки применения вибрационной стабилизирующей обработки для обеспечения макрогеометрии деталей летательных аппаратов // Технические и естественные науки: инновации и перспективы : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. (30 января 2020 г.). Белгород : ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2020. С. 73–75.

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Александрович Лебедев
кандидат технических наук,
профессор, профессор кафедры
«Технология машиностроения»,
Донской государственный
технический университет, (Россия,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: va.lebedev@yandex.ru

Valery A. Lebedev
Candidate of technical sciences,
professor, professor, of the department
of mechanical engineering technology,
Don State Technical University
(1 Gagarin Square,
Rostov-on-Don, Russia)

Николай Сергеевич Коваль
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Приборостроение
и биомедицинская инженерия»,
Донской государственный
технический университет, (Россия,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
e-mail: koval-nc@mail.ru

Nikolay S. Koval
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor, of the department of
Instrumentation and biomedical
engineering, Don State Technical
University (1 Gagarin Square,
Rostov-on-Don, Russia)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ СТАНКЕ

**Дмитрий Иванович Волков¹,
Борис Викторович Цветков²**

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия

²Петербургский абразивный завод «Ильич», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены исследования высокоскоростного глубинного шлифования жаропрочных сплавов инструментом на основе кубического нитрида бора. Приведены результаты исследований силы шлифования и удельной производительности при обработке эльборовыми кругами с различной рецептурой. Показаны преимущества высокоскоростной обработки инструментом на основе кубического нитрида бора по сравнению с обработкой традиционным высокопористым инструментом с непрерывной правкой.

Ключевые слова: модернизация станка, высокоскоростное глубинное шлифование, кубический нитрид бора, жаропрочный сплав, сила шлифования, удельная производительность

INVESTIGATION OF HIGH-SPEED CREEP-FEED GRINDING OF HEAT-RESISTANT MATERIALS WITH A CUBIC BORON NITRIDE TOOL ON AN UPGRADED MACHINE

Dmitry I. Volkov¹, Boris V. Tsvetkov²

¹Rybinsk State Aviation Technical University named
after P. A. Solovyov, Rybinsk, Russia

²Ilyich Petersburg Abrasive Plant, St. Petersburg, Russia

Abstract. This paper presents a study of high-speed creep-feed grinding of heat-resistant alloys with a cubic boron nitride (CBN) tool. The results of grinding force and specific productivity studies using CBN wheels with different formulations are presented. The advantages of high-speed machining with a CBN tool compared to traditional high-porosity tools with continuous dressing are demonstrated.

Keywords: machine tool upgrade, high-speed creep-feed grinding, cubic boron nitride, heat-resistant alloy, grinding force, specific productivity

В современной промышленности шлифовальный инструмент из кубического нитрида бора получил широкое распространение в различных отраслях [1, 2, 3]. Благодаря высокой микротвердости и температурной стойкости зерна, эльборовый инструмент в сравнении с инструментами из традиционных абразивов обладает рядом преимуществ:

- ✓ высокая абразивная способность;
- ✓ возможность шлифования на повышенных скоростях резания;
- ✓ увеличение периода стойкости между правками более чем в 10 раз;
- ✓ низкое адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом.

К проблемам, затрудняющим эффективное использование эльборового инструмента в промышленности, относится отсутствие станочного оборудования, позволяющего реализовать его возможности в области высокоскоростного глубинного шлифования.

В ходе выполнения государственного контракта № 11411.1003704.05.074 от 10.11.2011 г., шифр «Шлифмодерн», был разработан модернизированный плоскошлифовальный станок 3E711 CNC, который имеет возможность шлифования со скоростью резания до 90 м/с, скоростью подачи от 50 мм/мин, а также имеет станцию для подачи СОТС с двумя насосами: с давлением 1,5 МПа и расходом 20 л/мин и давлением 0,6 МПа и расходом 50 л/мин.

При глубинном шлифовании из-за продолжительного времени контакта инструмента и заготовки, в зоне резания возникают температурные условия, отличающиеся от традиционного маятникового шлифования. На таких операциях стандартная структура эльборового круга не позволяет обеспечить достаточное подведение СОТС к зоне резания и обеспечить отвод длинной стружки. Для решения данной задачи на предприятии «Петербургский абразивный завод «Ильич» были разработаны высокопористые эльборовые круги, выпускаемые под торговой маркой Аэробор[®], позволяющие работать в данных условиях.

Однако, несмотря на высокую режущую способность высокопористого эльборового инструмента, данная технология оказалась не конкурентоспособна по сравнению с таким высокопроизводительным методом как глубинное шлифование абразивными кругами с непрерывной правкой.

Целью данной работы являлось исследование высокопористых эльборовых кругов нового поколения, позволяющих повысить эффективность обработки деталей из жаропрочных сплавов методом глубинного шлифования.

Экспериментальные исследования удельной производительности, стойкости, силы резания при глубинном шлифовании эльборовыми кругами выполнялось в лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьева на модернизированном плоско-профилешлифовальном станке 3E711 CNC (рис. 1).

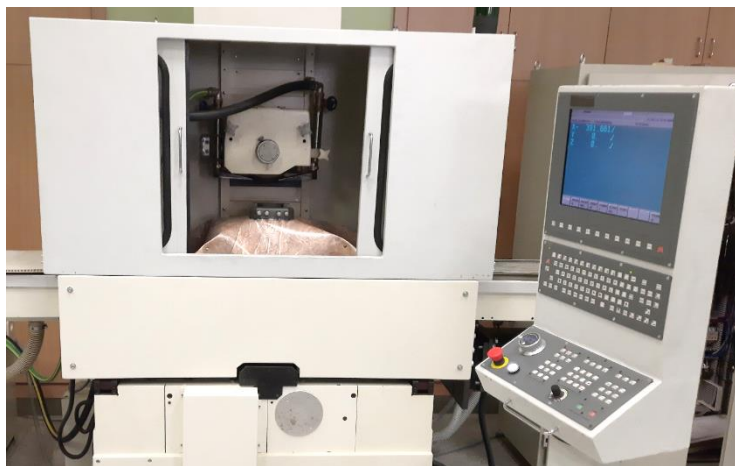


Рис. 1. Плоско-профилешлифовальный станок 3E711NC

Измерение составляющих сил резания проводилось на динамометре УДМ 600 (рис. 2).

Фиксация входящих сигналов осуществлялась посредством АЦП Е-154. Формирование зависимостей параметров от времени выполнялась с помощью специального ПО Lgraph (рис. 3).



Рис. 2. Столик динамометра УДМ-600 с установленным образцом

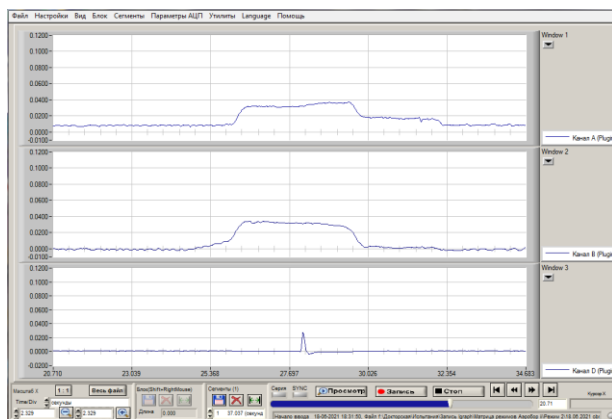


Рис. 3. Фиксация сигналов при шлифовании сплава ЖС26-У

Результаты экспериментального определения зависимости составляющих силы резания от количества проходов при разных скоростях шлифования представлены на рис. 4. Испытания проводились при следующих условиях: шлифовальный круг Аэробор II 3А1

200×21×76×16×10, направление шлифования – попутное; $V_p = 40$ (60) м/с; $S = 350$ мм/мин; материал образца: ЖС26-ВИ; $b = 10$ мм; $t = 0,5$ мм; $l = 50$ мм.

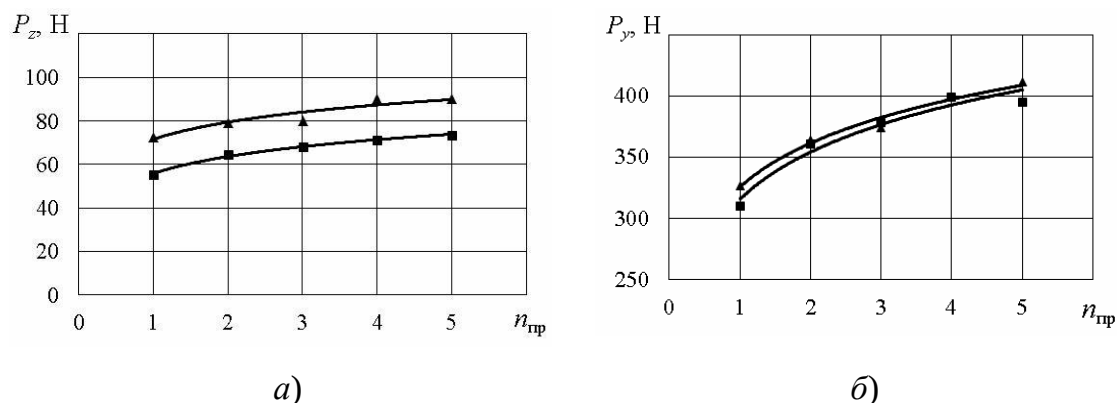


Рис. 4. Зависимость тангенциальной (а) и нормальной (б) составляющих силы шлифования P_z и P_y от количества проходов $n_{пр}$ для скорости круга V_p : $\blacktriangle$ – 40 м/с; $\blacksquare$ – 60 м/с.

Как видно на графиках при увеличении количества проходов постепенно растет величина составляющих силы резания это связано с затуплением режущих кромок и увеличением трения по площадкам износа.

Увеличение скорости резания при шлифовании в значительной степени отразилось на тангенциальной составляющей, её величина снизилась на 19,3 %. Данные изменения связаны с уменьшением глубины резания единичного зерна, для нормальной составляющей изменение данного показателя находится в пределах погрешности измерения.

На рисунке 5 изображены результаты экспериментального определения зависимости составляющих силы резания от скорости шлифования для кругов с эльбором различных марок.

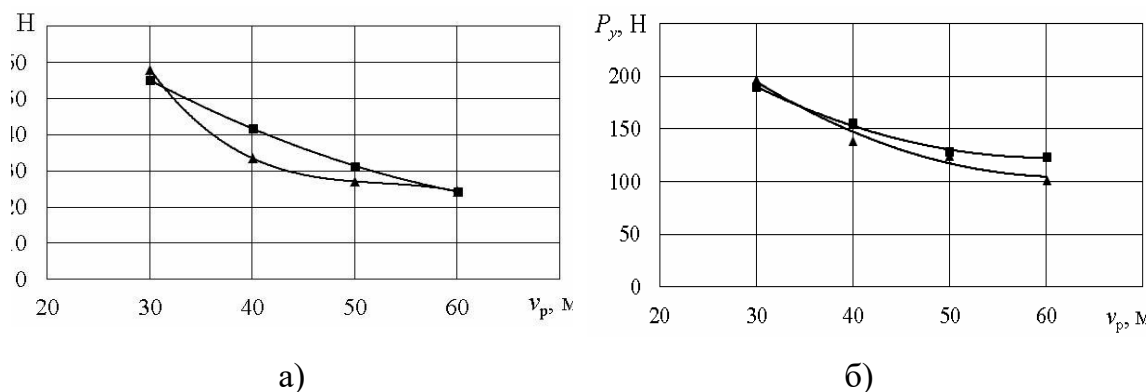


Рис. 5. Зависимость тангенциальной (а) и нормальной (б) составляющих силы шлифования P_z и P_y от скорости резания V_p для $\blacktriangle$ – ЛКВ51; $\blacksquare$ – ЛКВ50

Уменьшение нормальной составляющей силы резания при увеличении скорости круга для инструмента из эльбора марки ЛКВ51 в большей степени, чем у ЛКВ50 можно связать с более устойчивым сохранением острых вершин зерна.

На рис. 6 показаны результаты экспериментального определения зависимости составляющих силы резания от продольной подачи для кругов с эльбором различных марок.

На графиках можно увидеть значительную разницу в изменении тангенциальной составляющей от подачи для эльбора марки ЛКВ50 и ЛКВ51.

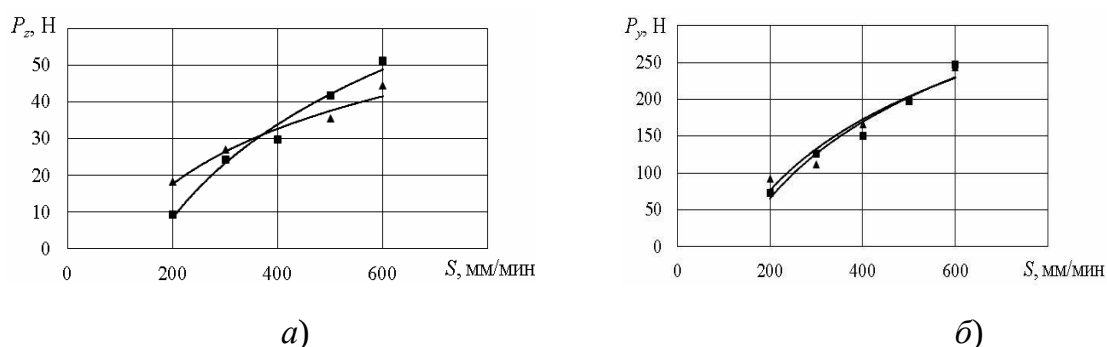


Рис. 6. Зависимость тангенциальной (а) и нормальной (б) составляющих силы шлифования P_z и P_y от продольной подачи S для ▲ – ЛКВ51; ■ – ЛКВ50

На рис. 7 представлены результаты экспериментального определения зависимости составляющих силы резания от глубины шлифования t для кругов с эльбором различных марок.

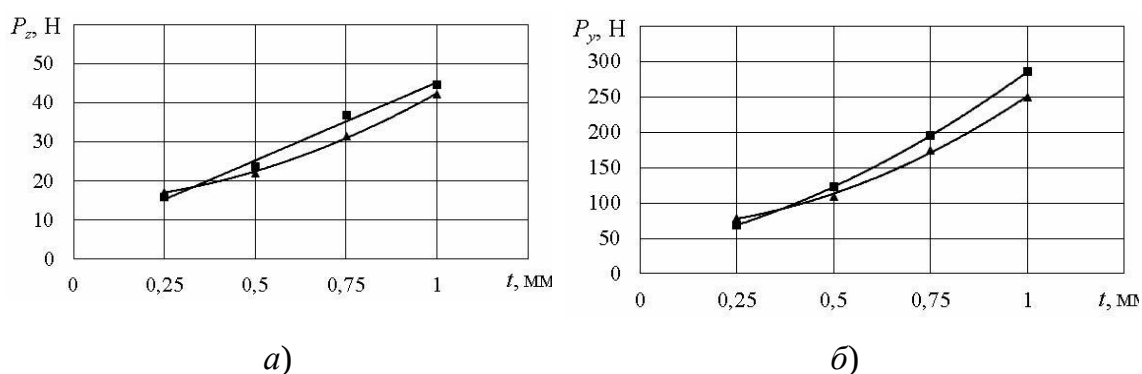


Рис. 7. Зависимость тангенциальной (а) и нормальной (б) составляющих силы шлифования P_z и P_y от припуска t для ▲ – ЛКВ51; ■ – ЛКВ50

Номинальное значение нормальной P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания для инструмента из эльбора марки ЛКВ51

ниже, чем для марки ЛКВ50, это говорит о большей режущей способности зерна.

Анализ работы эльборовых кругов в производственных условиях показал, что основной причиной ограниченного применения является низкая производительность, ограничивающим фактором которой является температура.

Для решения задачи повышения удельной производительности при отсутствии тепловых дефектов был проведен ряд опытных работ, в ходе которых, на основании особенностей глубинного шлифования был разработан круг Аэробор II (рис. 8).

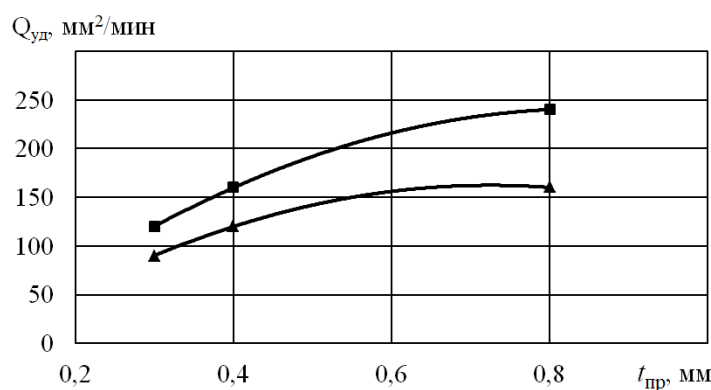


Рис. 8. Зависимость удельной производительности $Q_{уд}$ для кругов: $\blacktriangle$ – Аэробор; $\blacksquare$ – Аэробор II от глубины резания $t_{пр}$

Производительность в сравнении с кругом Аэробор первого поколения удалось повысить примерно в 1,5 раза, с сохранением стойкостных параметров.

Для апробации базовой рецептуры кругов Аэробор II были проведены производственные испытания круга 3В1 250×22×76,2×10×16×20 при шлифовании полок замкового элемента дет. «Лопатка рабочая ТВД» на станке Magerle MFP-50 (рис. 9).

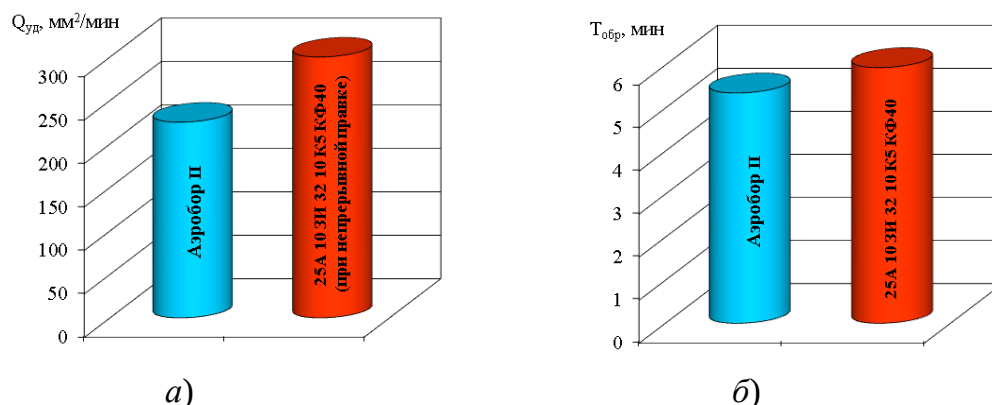


Рис. 9. Максимальная удельная производительность $Q_{уд}$ (а) и время обработки $T_{обр}$ (б) для кругов: Аэробор® II и 25A103И3210K5 КФ40

В результате испытаний показатель максимальной удельной производительности круга Аэробор II оказался ниже, чем у абразивного круга (при непрерывной правке) на 25 %, однако за счет перераспределения величины припусков на проходах общее время обработки удалось снизить на 11 %.

При апробации базовой рецептуры круга 1M1S 400×25×203×20×20 15° на операции шлифования «ёлочного» профиля замкового элемента детали «Лопатка рабочая ТВД» на станке Elb-Schliff SS-1300, круг Аэробор II показал максимальную удельную производительность выше на 67 %, а время обработки снизилось в 2,5 раза в сравнении с абразивным кругом, применяемым по базовой технологии.

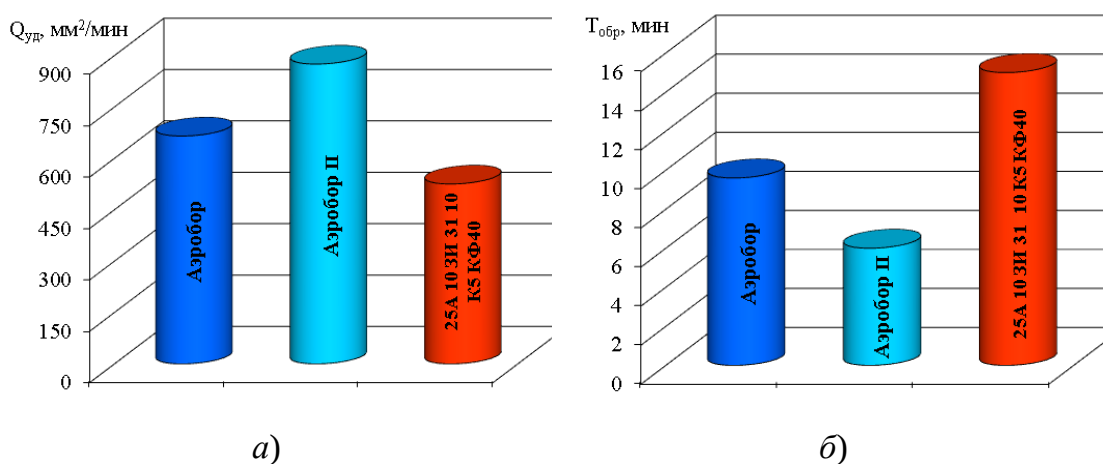


Рис. 10. Максимальная удельная производительность $Q_{уд}$ (а) и время обработки $T_{обр}$ (б) для кругов: Аэробор, Аэробор® II и 25A103И3110K5 KФ40

Список литературы

1. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб. : Политехника, 2007. 424 с.
2. Волков Д. И., Цветков Б. В., Голованова А. М. Повышение эффективности глубинного шлифования замкового элемента лопатки турбины высокопористым эльборовым шлифовальным кругом Аэробор II // Вестник машиностроения. 2021. № 7. С. 68–71.
3. Волков Д. И., Цветков Б. В. Перспективы развития глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей с использованием высокопористых эльборовых кругов // Вестник машиностроения. 2022. № 7. С. 45–48.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Иванович Волков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инновационное
машиностроение», Рыбинский
государственный авиационный
технический университет имени
П. А. Соловьева (Россия, г. Рыбинск,
ул. Пушкина, 53)
e-mail: d_i_volkov@rsatu.ru

Dmitry I. Volkov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
innovative mechanical engineering,
Rybinsk State Aviation Technical
University named after P. A. Solovyov
(53 Pushkin street, Rybinsk, Russia)

Борис Викторович Цветков

кандидат технических наук,
начальник отдела исследований
и новых разработок, Петербургский
абразивный завод «Ильич»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Красногвардейский пер., 23)
e-mail: boris_tsvetkov@mail.ru

Boris V. Tsvetkov

Candidate of technical sciences, head
of the research and development
department, Ilyich Petersburg Abrasive
Plant (23 Krasnogvardeysky lane,
St. Petersburg, Russia)

УДК 621.9

КРИТЕРИИ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Олег Владимирович Захаров

Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва, Россия

Аннотация. Предложены два критерия для оптимальной настройки бесцентрового шлифовального станка. Выполнена экспериментальная проверка для колец подшипников. Рекомендовано использовать критерий в виде безразмерного отношения максимального отклонения траектории точки от окружности к амплитуде гармоник.

Ключевые слова: бесцентровое шлифование, оптимальная настройка, круглость

CRITERIA FOR OPTIMAL ADJUSTMENT OF CENTERLESS GRINDING MACHINE

Oleg V. Zakharov

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

Abstract. Two criteria are proposed for optimal adjustment of the centerless grinding machine. An experimental test was performed for bearing rings. It is recommended to use

a criterion in the form of a dimensionless ratio of the maximum deviation of the point trajectory from the circle to the harmonic amplitude.

Keywords: centerless grinding, optimal adjustment, roundness

Метод бесцентрового шлифования очень чувствителен к настройке станка. При неправильной настройке могут появляться вибрации, нарушение контакта детали с башмаками. Это в свою очередь приводит к увеличению круглости, волнистости и шероховатости. Было проведено много исследований [1–3] для выяснения причин и устранения негативных факторов, связанных с нестабильностью круглости, динамики, контакта заготовки и башмаков. Совершенствование математических моделей для оценки стабильности при бесцентровом шлифовании была достигнуто благодаря успешному вкладу многих исследователей [4, 5].

Основную проблему составляет обеспечение круглости. Математическая модель формирования круглости дана в работах [6, 7]. Мы предлагаем два критерия для оптимизации. Первый критерий $K1$ представляет собой отношение среднего арифметического радиуса центра детали к амплитуде гармоники:

$$K1 = \frac{\Delta_m}{a_n}, \quad (1)$$

где Δ_m – среднеарифметическое радиуса центра при одном обороте детали.

Второй показатель $K2$ представляет собой отношение максимального отклонения траектории точки от окружности к амплитуде гармоники:

$$K2 = \frac{\max [r_m - r_0]}{a_n}, \quad (2)$$

где r_m – текущий радиус точки на профиле в системе координат станка.

Критерии являются безразмерными.

Для проверки эффективности критериев была проведена экспериментальная проверка на станке SWaAGL-50 (Германия). Измерение круглости и гармонический анализ проводились на приборе для измерения круглости Talyrond-30 (Великобритания). Образцами служили кольца подшипника диаметром 28 мм. Из партии колец подшипников были выбраны два кольца, у которых в гармоническом составе сильно выражены 2- и 3-я гармоники. Круглограммы и гармонический состав профилей показаны на рисунке 1. Кольцо 1 имеет наибольшую амплитуду 3-й гармоники, а кольцо 2 имеет наибольшую амплитуду 2-й гармоники. Центрирование и ширина записи выбраны по стандартному программному обеспечению прибора Talyrond-30. Применен фильтр

с $n = 25$ гармониками. При анализе круглости использована методика работы [7]. В качестве опорной окружности принята окружность минимальной зоны. Исходные значения круглости составили у кольца 1 (рис. 1,а) 3,8 мкм, у кольца 2 (рис. 1,б) 4,2 мкм.

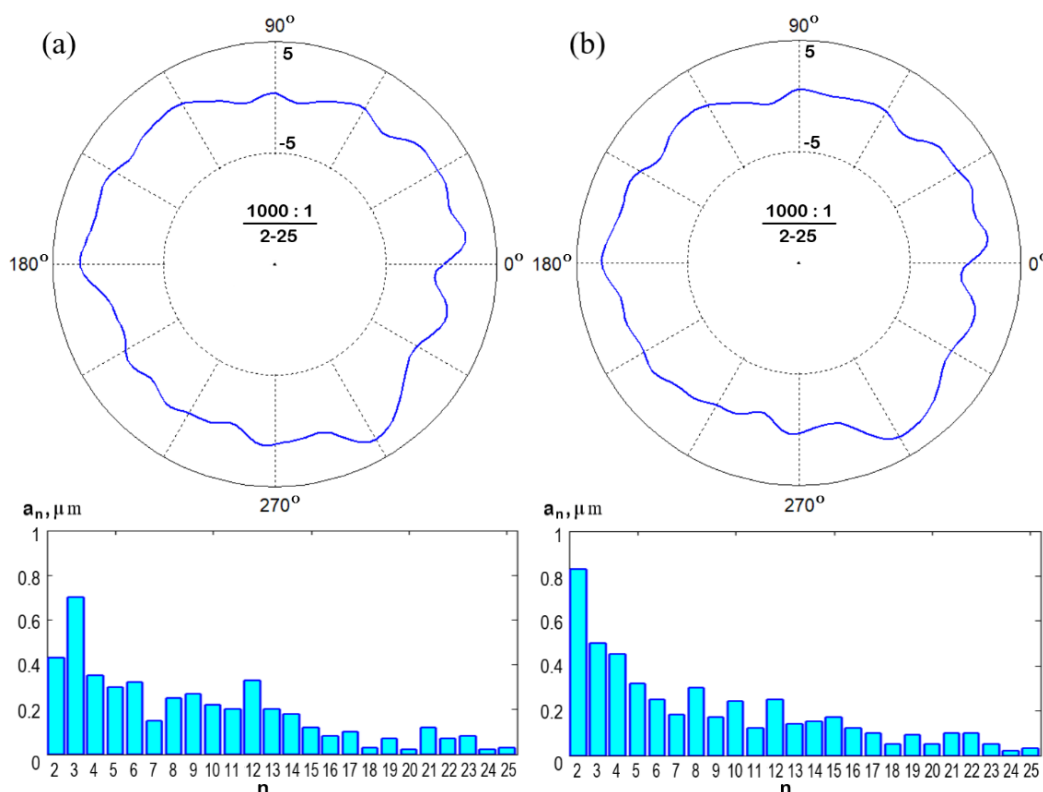


Рис. 1. Исходные круглограммы деталей: а – кольцо 1; б – кольцо 2

Исходные кольца 1, 2 обрабатывались с одинаковой стандартной наладкой угла между опорами станка $\alpha = 90^\circ$. Затем полученные детали обрабатывались с оптимальной наладкой по показателю $K1$, потом по показателю $K2$. По результатам моделирования и с учетом конструктивных ограничений станка установлены следующие оптимальные углы башмаков. Значения оптимального угла по показателю $K1$ составили: для $n = 2$ угол $\alpha = 75^\circ$, для $n = 3$ угол $\alpha = 80^\circ$. Значения оптимального угла по показателю $K2$ составили: для $n = 2$ угол $\alpha = 105^\circ$, для $n = 3$ угол $\alpha = 115^\circ$.

Во всех вариантах наладки применялись следующие режимы резания. Скорость шлифовального круга – 35 м/с, скорость заготовки – 35 м/мин (шлифование попутное). Подача круга: черновая – 0,45 мм/мин; чистовая – 0,17 мм/мин; время выхаживания – 3 с. Шлифовальный круг – 375×6×305 24А 10 СМ1 К 58. Обработку осуществляли при обильном поливе водной СОЖ. Круглограммы деталей после

обработки при стандартной наладке даны на рис. 2, при оптимальной наладке с ограничениями на рис. 3.

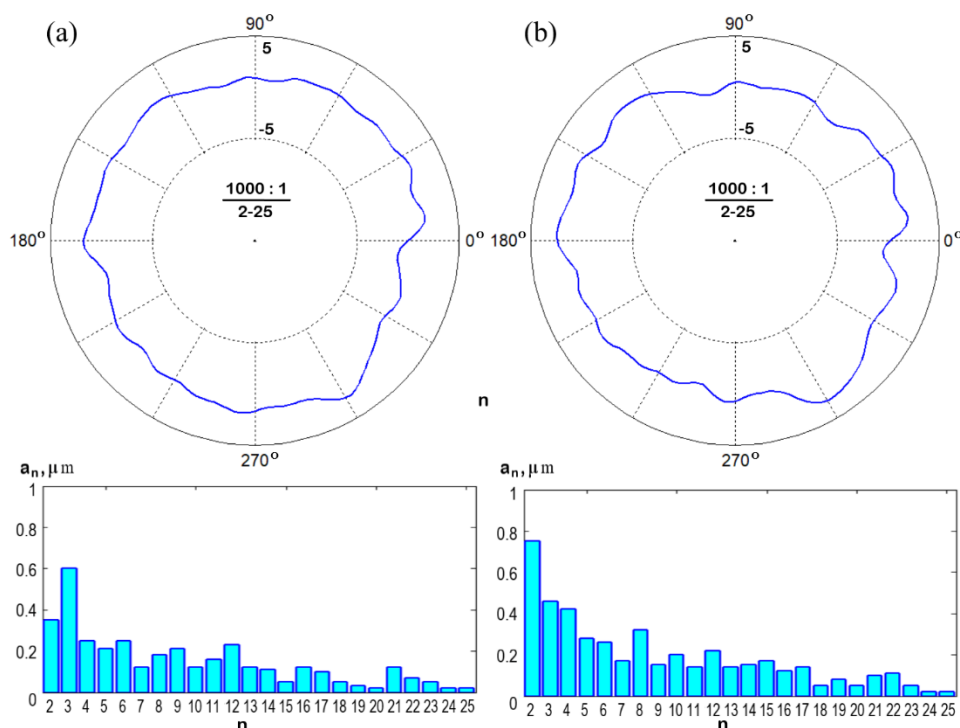


Рис. 2. Круглограммы после обработки по стандартной наладке:
а – кольцо 1; б – кольцо 2

На рисунке 3 показаны круглограммы, полученные при наладке по показателю $K1$: кольцо 1 (а), кольцо 2 (б); при наладке по показателю $K2$: кольцо 1 (в), кольцо 2 (г). После обработки со стандартной наладкой значения круглости составили 3,7 мкм у кольца 1 и 3,8 мкм у кольца 2. После обработки со оптимальной наладкой по показателю $K1$ значения круглости составили 3,2 мкм у кольца 1 и 3,5 мкм у кольца 2. После обработки со оптимальной наладкой по показателю $K2$ значения круглости составили 2,5 мкм у кольца 1 и 2,6 мкм у кольца 2.

Экспериментальная проверка показала, что стандартная наладка башмаков бесцентрового шлифовального станка обеспечивает незначительное уменьшение круглости. У кольца 1 с доминирующей 3-й гармоникой круглость уменьшилась на 0,1 мкм. У кольца 2 с доминирующей 2-й гармоникой круглость уменьшилась на 0,4 мкм. Характерные формы профиля с доминированием 2-й и 3-й гармоники после обработки сохранились. Оптимальная наладка башмаков по разработанной модели способствует более эффективному снижению круглости. При установке башмаков по показателю $K1$ круглость уменьшилась у кольца 1 на 0,5 мкм, у кольца 2 на 0,3 мкм. При установке башмаков

по показателю $K2$ круглость уменьшилась у кольца 1 на 0,7 мкм, у кольца 2 на 0,9 мкм. Анализ гармоник показал, что в наибольшей степени уменьшилась 3-я гармоника у кольца 1 и 2-я гармоника у кольца 2. Оптимальная наладка углов башмаков была рассчитана именно для указанных гармоник. Наилучший результат показал оценочный показатель $K2$ и его рекомендуется использовать в практике бесцентрового шлифования.

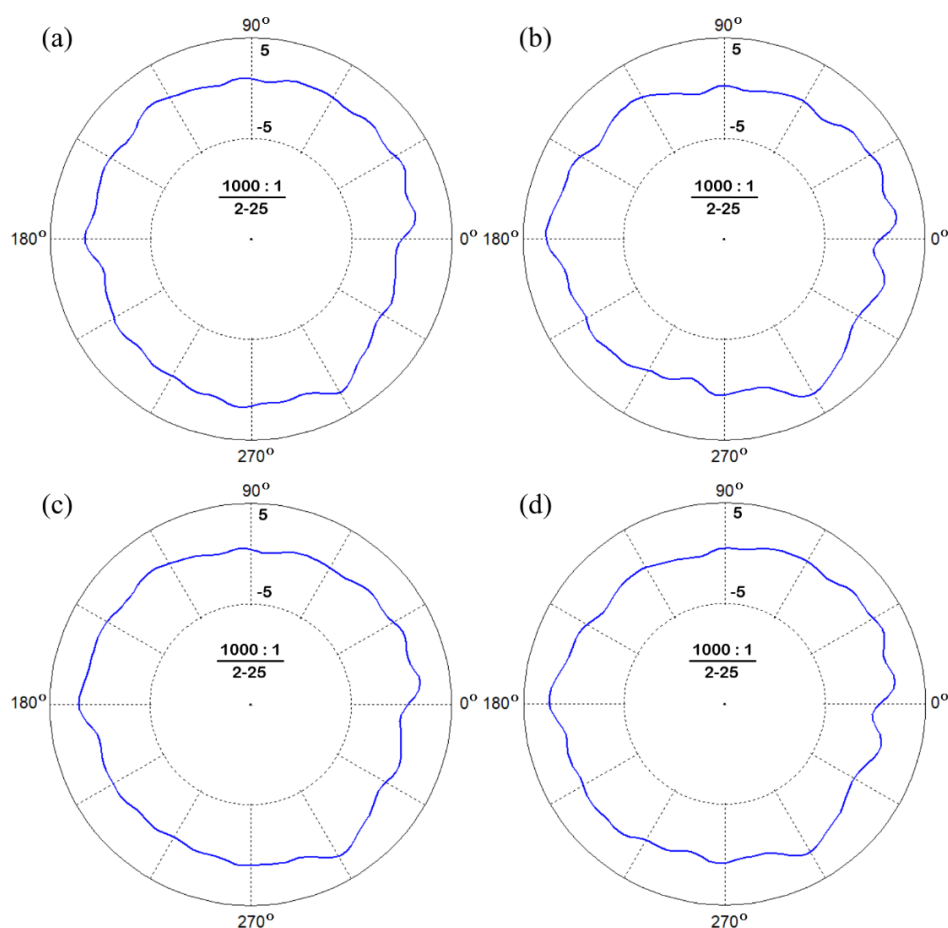


Рис. 3. Круглограммы деталей после обработки по оптимальной наладке:
по критерию $K1$ кольцо 1 (а), кольцо 2 (б),
по критерию $K2$ кольцо 1 (в), кольцо 2 (г)

Таким образом, предложен эффективный критерий для оптимальной настройки бесцентрового шлифовального станка, который прошел экспериментальную проверку.

Список литературы

1. Салов П. М., Салова Д. П. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов. Чебоксары : Чебоксарский политехн. ин-т (филиал) МГОУ, 2010. 332 с.

2. Захаров О. В. Бесцентровое шлифование конических поверхностей на станках с продольной подачей // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 7. С. 14–16.

3. Хуртасенко А. В., Шрубченко И. В., Воронкова М. Н., Маслова И. В. Технологическая схема эффективной обработки крупногабаритных деталей // СТИН. 2022. № 3. С. 13–15.

4. Захаров О. В., Погораздов В. В., Бржозовский Б. М. Проектирование формообразующих систем бесцентровых суперфинишных станков. Саратов : СГТУ, 2004. 140 с.

5. Захаров О. В. Стабильность силового замыкания контакта при бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах // СТИН. 2011. № 7. С. 8–10.

6. Захаров О. В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 32–35.

7. Захаров О. В., Пугин К. Г. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21.

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Владимирович Захаров

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры
«Высокоэффективные технологии
и обработка», Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, Вадковский пер., 3А)
e-mail: zov20@mail.ru

Oleg V. Zakharov

Doctor of technical sciences,
associate professor, professor of
the department of high-efficiency
technologies and processing,
Moscow State University of
Technology "STANKIN"
(3A Vadkovsky lane, Moscow,
Russia)

УДК 621.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ И РЕЖИМАХ

**Александр Николаевич Унянин¹,
Александр Владимирович Чуднов²**

^{1,2}Ульяновский государственный технический университет,
Ульяновск, Россия

Аннотация. Установлено, что начальный период времени процесса фрезерования происходит при переменных значениях силы резания и температурного поля. Цель исследования – выявление влияния условий и режима фрезерования на продолжи-

тельность неустановившегося теплового процесса и изменение силы резания и температур в течение этого периода. Установлено, что до момента наступления установившегося теплового состояния процесса фрезерования может быть обработан участок заготовки размером 3...10 мм. При обработке этого участка на 4...12 % выше сила резания. Поэтому при назначении режима резания следует учитывать необходимость обеспечения одинаковой теплосиловой напряженности процесса обработки в различные периоды времени наработки инструмента.

Ключевые слова: фрезерование, силы резания, температура

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>.

RESEARCH OF THE UNSTEADY THERMAL STATE OF THE MILLING PROCESS UNDER VARIOUS CONDITIONS AND MODES

Alexandr N. Unyanin¹, Alexandr V. Chudnov²

^{1,2}Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Abstract. It is established that the initial time period of the milling process occurs at variable values of the cutting force and temperature field. The purpose of the study is to identify the influence of milling conditions and mode on the duration of the unsteady thermal process and the change in cutting strength and temperatures during this period. It has been established that before the onset of the steady-state thermal state of the milling process, a section of the workpiece measuring 3...10 mm can be processed. When processing this area, the cutting force is 4...12 % higher. Therefore, when assigning a cutting mode, it is necessary to take into account the need to ensure the same thermal strength of the machining process during different periods of tool life.

Keywords: milling, cutting forces, temperature

Financing: the study was funded by the Russian Science Foundation grant № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

Исследование силовых и тепловых параметров процесса фрезерования показало, что в начальный период времени реализации процесса температурное поле и сила резания изменяются [1] из-за того, что первые из последовательно работающих зубьев фрезы вступают в контакт с материалом заготовки, температура которого незначительно отличается от температуры окружающей среды. Поэтому предел текучести материала заготовки, а также зависящая от него сила резания, мощности и плотности источников тепловыделения имеют большее значение, чем при работе последующих зубьев. С увеличением номера последовательно работающего зуба возрастает температура в зоне деформирования материала заготовки (стружкообразования), а предел текучести материала заготовки уменьшается. Это обуславливает уменьшение силы резания и мощностей источников тепловыделения. Через некоторый период времени тепловой режим процесса становится

установившимся и параметры процесса стабилизируются. Следовательно, в начальный период процесса обработки сила резания имеет переменное и большее значение, чем в последующие моменты времени. Сила оказывает существенное влияние на мощности источников тепловыделения, следовательно, температуру в зоне резания, а также на высотные параметры микрогеометрии обработанной поверхности [2].

Цель исследования – установление влияния условий и режима фрезерования на продолжительность неуставившегося состояния процесса фрезерования и изменение силы резания и температур в течение этого периода.

Моделировали процесс встречного фрезерования периферией концевой фрезы заготовок, имеющих различные теплофизические свойства: из титанового сплава ВТ6, стали 40Х и сплава Д16. Моделирование выполнено для «массивных» заготовок толщиной 10 мм и тонкостенных толщиной 0,7 мм. При обработке тонкостенных заготовок толщиной 0,7 мм (после обработки) формируется температурное поле, заметно отличающееся от формирующегося при обработке массивных заготовок [3]. При обработке заготовок из сплава Д 16 варьировали подачей на зуб фрезы, приняв ее равной $S_z = 0,21$ и $0,42$ мм/зуб. Процесс считали установившимся, если за период времени последовательной работы 5-и зубьев фрезы температура в контактных зонах изменяется не более чем на 2°C .

Температурное поле моделировали полагая, что мощность источника тепловыделения в зоне стружкообразования распределяется по закону, скомбинированном на основе равномерного и экспоненциального [4].

В таблице 1 приведены значения числа зубьев, после последовательной работы которых тепловой режим фрезерования можно считать установившемся и значения размеров поверхностей заготовок l_n , которые будут обработаны при неуставившемся режиме.

Таблица 1

Материал	Количество зубьев	Размер обрабатываемой поверхности заготовки l_n , мм	Разность значений главной составляющей силы резания P_z , %
ВТ6*	$\frac{31}{40}$	$\frac{3,4}{4,4}$	$\frac{4}{5}$
	$\frac{36}{26}$	$\frac{7,56}{10,9}$	$\frac{7}{6}$
40Х*	$\frac{45}{50}$	$\frac{3,15}{3,5}$	$\frac{7}{12}$
* – в числителе приведены параметры для массивной заготовки, в знаменателе – тонкостенной; ** – в числителе подача на зуб $0,21$ мм/зуб, в знаменателе – $0,42$ мм/зуб			

Максимальное значение параметра l_n зафиксировано при обработке заготовок из сплава Д16: 7,56 и 10,9 мм при обработке с подачами $S_z = 0,21$ и 0,42 мм/зуб. Заготовки из этого сплава обрабатываются при больших значениях подачи S_z , чем заготовки из других исследованных материалов. При обработке заготовок из сплава ВТ6 сила резания на участке размером l_n незначительно превышает силу, зафиксированную при установившемся тепловом состоянии – на 4...5 %. При обработке заготовок из стали 40Х размер поверхности l_n меньше, чем при обработке заготовок из других материалов, однако сила резания при обработке этой поверхности выше на 7...12 %.

При обработке тонкостенных заготовок из ВТ6 и 40Х размер l_n , а также разность значений сил резания на участках с неустановившемся и установившемся режимом больше, чем при обработке массивных заготовок.

Температуры в зоне контакта инструмента со стружкой и заготовкой и на вершине зуба T_E при работе первого зуба несколько ниже, чем при работе последующих зубьев. Однако, поскольку первые зубья вступают в контакт с заготовкой, имеющей меньшую температуру деформируемого слоя T_d , то скорость нагрева их поверхностей будет более высокой.

Скорость нагрева вершины зуба: $V_E = (T_E - T_d) / DT$, где DT – период времени нагрева, с.

Максимальная скорость нагрева будет иметь место в начальном периоде контакта зуба с заготовкой. При обработке массивной заготовки из стали 40Х первый зуб вступает в контакт с заготовкой, имеющей температуру $T_d = 293$ К, а через период времени, равный $DT = 6,97 \cdot 10^{-6}$ с температура вершины зуба становится равной $T_E = 700$ К.

Скорости нагрева вершин 1-го, 6-го и 40-го последовательно работающих зубьев составят $59 \cdot 10^6$, $48,7 \cdot 10^6$, $37,6 \cdot 10^6$ град./с соответственно.

С такими же скоростями будут нагреваться и поверхностные слои заготовки, контактирующие с вершиной зуба. При резании 40-м из последовательно работающих зубьев, когда наступает установившееся тепловое состояние, скорость нагрева V_E ниже, чем при обработке 1-м зубом, на 36 %.

Скорости протекания термических процессов в значительной степени определяют характер структурных превращений в поверхностном слое заготовки [5].

Увеличение сил резания на начальном участке приводит к увеличению погрешности выдерживаемого размера, причем в большей степени это проявляется при обработке заготовок тонкостенных деталей

[4]. Большая скорость нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности отразится на протекании структурных превращений в материале заготовки. Поэтому, чтобы получить требуемые параметры качества детали, необходимо обеспечить одинаковую теплосиловую напряженность процесса обработки в условиях его неустановившегося и установившегося состояния, например, за счет коррекции элементов режима на начальном участке.

Список литературы

1. Унянин А. Н., Чуднов А. В. Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 23–29. doi:10.30987/2223-4608-2024-23-29
2. Сулов А. Г., Безъязычный В. Ф., Панфилов Ю. В. [и др.]. Инженерия поверхности деталей / под ред. А. Г. Сулова. М. : Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Unyanin A. N., Chudnov A. V. The influence of cutting mode elements on the technological parameters of the process of milling blanks of titanium alloy thin-walled parts // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 3. P. 99–107.
4. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. М. : Машиностроение, 1990. 288 с.
5. Евсеев Д. Г., Сальников А. Н. Модели шлифования. Теория и эксперимент : монография. М. : Известия, 2019. 312 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Унянин
доктор технических наук, профессор,
доцент кафедры «Инновационные
технологии в машиностроении»,
Ульяновский государственный
технический университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
e-mail: a_un@mail.ru

Alexandr N. Unyanin
Doctor of technical sciences,
professor, associate professor
of the department of innovative
technologies in mechanical
engineering, Ulyanovsk State
Technical University (32 Severny
Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Александр Владимирович Чуднов
аспирант, Ульяновский государственный
технический университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
e-mail: chudnov73ru@gmail.com

Alexandr V. Chudnov
Postgraduate student, Ulyanovsk
State Technical University
(32 Severny Venets street,
Ulyanovsk, Russia)

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Сергей Николаевич Казанцев¹,
Татьяна Анатольевна Дурина²,
Артем Сергеевич Юрасов³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Исследуется влияние процесса кристаллизации серого чугуна в литейной форме при различных условиях затвердевания на качество отливки.

Ключевые слова: литейная форма, чугунный расплав, кристаллизация, скорость охлаждения сплава, структура сплава, жидкотекучесть, объемная усадка, твердость сплава

PRODUCING HIGH-QUALITY CAST IRON CASTINGS FOR MACHINE-TOOL BUILDING

Sergey N. Kazantsev¹, Tatyana A. Durina², Artem S. Yurasov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. A study of the influence of the crystallization process of gray cast iron in a casting mold under different solidification conditions on the quality of the casting.

Keywords: casting mold, cast iron melt, crystallization, alloy cooling rate, alloy structure, fluidity, volumetric shrinkage, alloy hardness

Литейное производство остается основной заготовительной базой в современном машиностроении, так как позволяет получить изделия необходимой конфигурации, размеров и свойств непосредственно из расплава при минимальных затратах энергии, материалов и труда. Перед литейным производством стоят следующие задачи: увеличение производительности труда и снижения трудоемкости на всех переделах литейного производства; повышение качества отливок; увеличение выпуска отливок из сплавов высоких марок. Повышение точности размеров отливки с максимальным приближением к размерам детали позволит повысить эффективность производства в механообрабатывающих цехах, а также с получением оптимальных показателей по структуре, механическим свойствам, способствующим повышению работоспособности и надежности литых деталей и машин [1].

В настоящее время наблюдается тенденция в развитии литейных предприятия в направлении выпуска большего количества специфических литых деталей, особенно в таких отраслях, как станкостроение, автомобилестроение, атомная промышленность и другие, где предъявляются повышенные требования к качеству литья. Поэтому для получения высокого качества необходимо создавать нужные условия и научиться управлять процессом формирования отливки. Одним из универсальных методов управления качеством отливки является создания оптимальной скорости кристаллизации расплава, который позволяет при минимальных затратах получить структуру сплава с необходимыми механическими свойствами.

Для исследования процесса кристаллизации сплава в литейной форме при различных условиях затвердевания изготавливали литейную форму на формовочной машине модели 22111 чистым прессованием в опоках 400×350×120 мм. Использовали единую формовочную смесь, которая применяется в литейном производстве при получении чугунных отливок [2].

Состав единой формовочной смеси: кварцевый песок марки 2К1 ОЗ 02 4 %; бентонит ТУ 4191–001–5856178–02 2 %; отработанная смесь 94 %. Формовочная смесь имеет следующие свойства: прочность на сжатие в сыром состоянии 0,49 кг/см²; газопроницаемость больше 83 ед.; текучесть более 51 %; влажность 4,1 %.

Схема расположения моделей в литейной форме представлена на рис. 1. Отливки 1 полностью расположены в верхней полуформе. В образце № 2 установлен внешний холодильник 3 из стали марки Ст3, который размещен в нижней полуформе под образцом, а образец № 1 затвердевает при обычных условиях без дополнительных элементов. В полость формы обоих образцов установлены термопары T_1 и T_2 для фиксации температуры сплава после его заливки в форму во время кристаллизации. T_1 для образца №1 и T_2 для образца № 2.

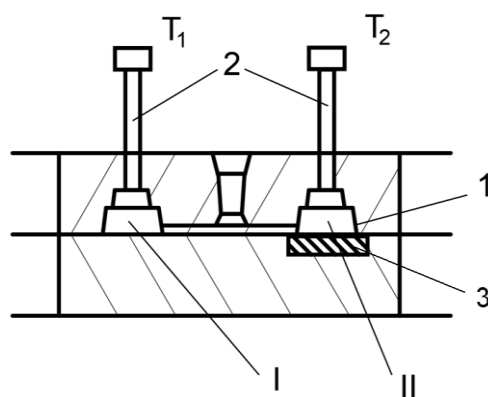


Рис. 1. Схема размещения отливок в литейной форме:
1 – отливка (I, II); 2 – термопара; 3 – внешний холодильник

В собранную литейную форму заливали сплав СЧ 20. В процессе кристаллизации с помощью потенциометра фиксировали изменения температуры сплава через каждые 50 секунд (рис. 2).



Рис. 2. Литейная форма

Результаты замеров показали, что температура сплава в образце №1 в процессе охлаждения равномерно изменяется, постепенно уменьшаясь (рис. 3). В образце № 2 температура резко снижается, особенно в начальный период, так как происходит интенсивный отвод тепла с помощью холодильника, но постепенно происходит ее выравнивание, с последующим плавным уменьшением. Очевидно, охлаждающий элемент, забрав тепло от сплава и набрав соответствующую температуру, в дальнейшем стабилизирует тепловой отвод. В результате этого процесс затвердевания сплава осуществляется с разными скоростями. Средняя скорость снижения температуры в начале процесса кристаллизации в первом случае составила 0,18 град/с, а во втором – 0,08 град/с. Однако в течение всего периода затвердевания скорость снижения температуры сплава постоянно изменяется и чем ниже температура, тем меньше скорость. В образце №1 скорость охлаждения сплава равномерно уменьшается в течение процесса кристаллизации, а в образце № 2 скорость охлаждения выше в начальный период, но в последующем скорость падает и становится даже меньше, чем в первом образце. Что свидетельствует о более коротком периоде кристаллизации образца отливки.

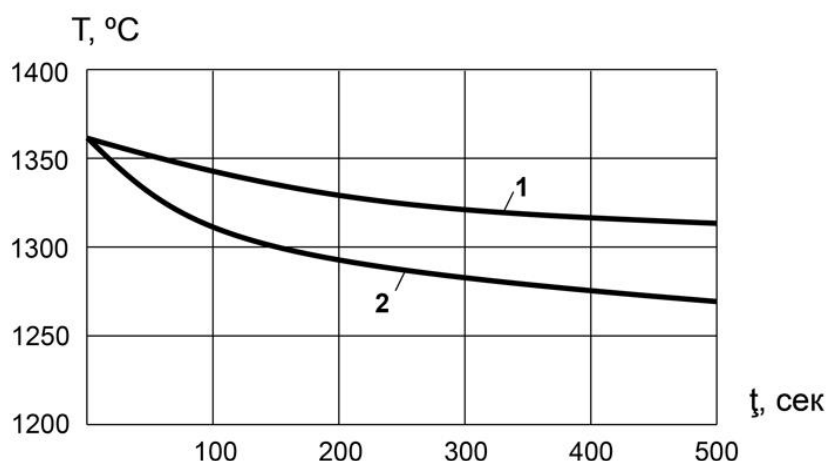


Рис. 3. Изменение температуры чугунного сплава в процессе кристаллизации: 1 – изменение температуры в образце № 1; 2 – изменение температуры в образце № 2

Полученные отливки подвергались визуальному внешнему обследованию, определению структуры сплава, твердости чугуна, склонности к образованию усадочных пустот.

На рисунке 4 представлены структуры сплава образцов отливок, полученных при скорости охлаждения 0,08 град/с (рис. 4,а), при скорости охлаждения 0,18 град/с (рис. 4,б) с применением внешнего холодильника.

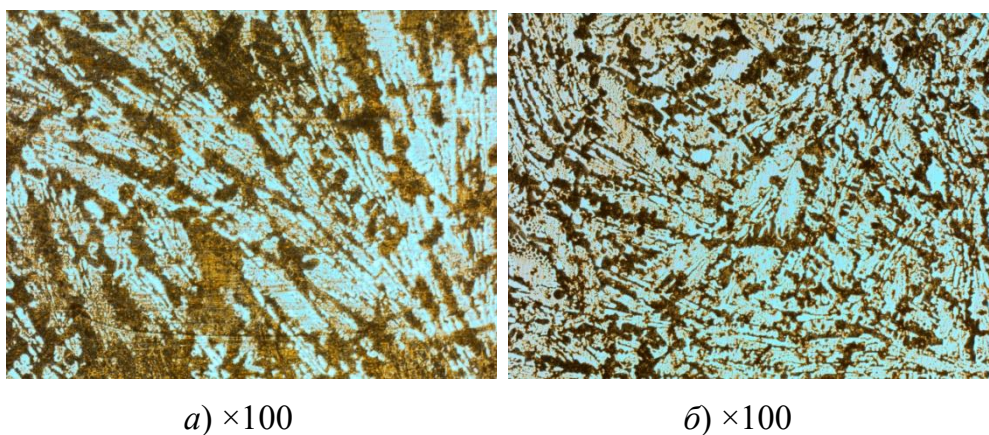


Рис. 4. Структура сплава образцов отливок:
а – образец № 1; б – образец № 2

В обоих образцах наблюдается ферритно-перлитная структура. Но при медленном охлаждении в структуре серого чугуна возрастает доля феррита – сплава железа с оксидами Fe_2O_3 и других металлов. Часть углерода находится в связанном состоянии, т.е. в виде Fe_2C , входящий в состав перлита. Образуется основа, состоящая из пластин-

чатого перлита и феррита (светлые зерна) и пластинчатого графита. Медленное охлаждение позволяет всем превращениям идти по стабильной диаграмме, начиная от образования эвтектического графита до графита третичного. Наличие феррита и свободного углерода в виде пластинок графита ухудшает механические свойства металла, снижает его прочность и сопротивляемость растяжению. В то же время графит повышает износоустойчивость сплава, действуя подобно смазке, улучшает обрабатываемость, снижает усадку в процессе литья. В образце № 2 охлаждающей с большей скоростью перлит находится в более измельченном состоянии и равномернее распределен по объему отливки наряду с тонкими пластинками графита (черные пластинки). В результате структура отличается более высокой твердостью и прочностью. Результаты замеров твердости сплава образцов показали, что твердость сплава образца № 1, полученного при медленном охлаждении со скоростью 0,08 град/с составляет HRB 85, образца № 2 с внешним холодильником – HRB 93. Повышенная твердость сплава обеспечит лучшие эксплуатационные свойства.

При кристаллизации отливки проходят процессы, которые могут привести к формированию пустот в ее теле. Результаты экспериментов показали, что в обоих образцах имеется усадочная раковина. Но размеры усадочной раковины в образце, полученный при скорости охлаждения 0,18 град/с меньше (9×8 мм), чем в образце, полученный со скоростью охлаждения 0,08 град/с (15×12 мм). Значит сплав, кристаллизующий при высокой скорости охлаждения, имеет меньшую склонность к образованию усадочных пустот.

Одним из важных характеристик расплава является его жидкотекучесть, которая характеризует способность металла и сплава в жидком состоянии течь в полости литейной формы, полностью и точно воспроизводя ее очертания, что очень важно при изготовлении сложных тонкостенных отливок. Результаты исследований показали, что проба, полученная с высокой скоростью охлаждения, имеет значение текучести меньше, чем с низкой скоростью охлаждения. Практическая текучесть сплава при скорости охлаждения 0,08 град/с составляет 875 мм, а при скоростях охлаждения 0,18 град/с – 798 мм. Очевидно, короткий промежуток времени кристаллизации уменьшает путь течения жидкого сплава. Поэтому при разработке технологического процесса изготовления отливки с высокой скоростью охлаждения (например, в металлическую форму) необходимо учитывать это и предусматривать увеличения гидравлического напора.

Список литературы

1. Дибров И. А. Качественное литье – прогресс машиностроения // Литейщик России. 2017. № 2. С. 24–28.
2. Трухов А. П., Сорокин Ю. А., Ершов М. Ю., Благоданов Б. П. Технология литейного производства. Литье в песчаные формы. М. : Академия, 2005. 528 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Николаевич Казанцев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Контроль
и испытание материалов»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: metal@pnzgu.ru

Sergey N. Kazantsev

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of materials control
and testing, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Татьяна Анатольевна Дурина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Сварочное,
литейное производство
и материаловедение», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tana23@rambler.ru

Tatyana A. Durina

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of welding, foundry
production and materials science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Артем Сергеевич Юрасов

студент, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: metal@pnzgu.ru

Artem S. Yurasov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.762.55

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОСТРОЕНИЯ

**Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Виталий Сергеевич Родионов²,
Иван Викторович Сакара³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема использования лазерного спекания для нанесения износостойких твердосплавных покрытий на высокоресурсные детали

станков. Несмотря на преимущества метода, такие как минимальные допуски и низкие отходы, его применение затруднено из-за высокой отражательной способности и тугоплавкости материалов, что приводит к дефектам. Проведен сравнительный анализ структуры образцов из карбида вольфрама (WC), полученных в ходе лазерного спекания твердосплавного порошка. Результаты могут быть использованы для получения твердосплавного покрытия для высокоресурсных деталей металлообрабатывающего оборудования.

Ключевые слова: карбид вольфрама, лазер, высокоресурсные детали, тугоплавкие материалы, твердосплавное покрытие

STUDY OF HARD-ALLOY COATING FORMATION FOR HIGH-RESOURCE MACHINE TOOL COMPONENTS

Alexander E. Zverovshchikov¹, Vitaly S. Rodionov²,
Ivan V. Sakara³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article addresses the problem of using laser sintering to apply wear-resistant hard-alloy coatings on high-resource machine tool components. Despite the advantages of the method, such as minimal tolerances and low waste, its application is challenging due to the high reflectivity and refractoriness of the materials, which leads to defects. A comparative analysis of the structure of tungsten carbide (WC) samples obtained during the laser sintering of hard-alloy powder was carried out. The results can be used to obtain a hard-alloy coating for high-resource components of metalworking equipment.

Keywords: tungsten carbide, laser, high-resource parts, refractory materials, hard-alloy coating

Аддитивные технологии, в частности лазерное спекание, позволяют создавать высокоресурсные детали станкостроения из твердых сплавов с минимальными допусками и малым количеством отходов, что повышает качество и снижает себестоимость [1]. Принципы лазерного спекания также позволяют рассмотреть нанесение твердосплавного слоя на изнашиваемые поверхности деталей станочных узлов при восстановлении и ремонте [2]. Однако материал для спекания лазером нетехнологичен, он обладает высокой отражательной способностью, что снижает эффективность поглощения лазерной энергии, а его высокие температура плавления и узкий интервал спекания приводят к пористости и дефектам из-за неравномерного нагрева и быстрого охлаждения.

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода лазерного спекания твердосплавного слоя на металлической основе, обеспечивающего приемлемый уровень дефектов.

Для эксперимента использовался волоконный лазер Raycus RFL-S1000 номинальной мощностью 1 кВт. Излучение фокусировалось с помощью ручной головки Raytools BT240S0003, которая перемещалась посредством малогабаритного ЧПУ-станка PAG. Порошковое сырье с дисперсностью 1–8 мкм размещалось на подложке из стали 40X [3].

Ключевым варьируемым параметром предложено считать энергию на единицу длины рабочего хода лазера (E_l , Дж/м), для ее определения разработана новая методика, результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры мощности воздействия лазерного луча на поверхность WC

Мощность (% от номинальной)	Фактическая мощность (P, Вт)	Эффективная мощность (P_{ef} , Вт)	Плотность мощности (I, Вт/см ²)	Время воздействия (t, с)	Энергия на единицу длины (E_l , Дж/м)
20 %	200	150	4775	0,4	30000
40 %	400	300	9549	0,4	60000
60 %	600	450	14324	0,4	90000
80 %	800	600	19099	0,4	120000
100 %	1000	750	23873	0,4	150000

Расчет пористости микрошлифов покрытия выполнялся в программном комплексе КОМПАС-3D путем анализа площади сечения пор на микрофотографиях шлифов. На рис. 1 представлен график зависимости пористости от фактической мощности.

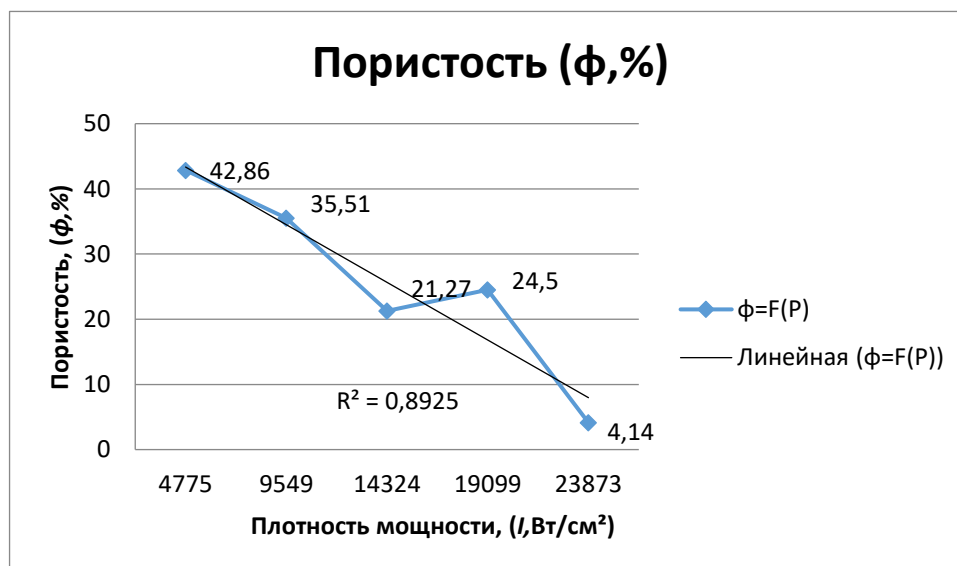


Рис. 1. Влияние плотности мощности лазера на пористость

Была проведена оценка дисперсии воспроизводимости. Критические ошибки и существенность изменения отклика оценивалась при помощи коэффициента Стьюдента.

Для доверительной вероятности $P = 0,95$ и рассчитанных коэффициентов Стьюдента [4–5] было установлено отсутствие статистически значимых ошибок эксперимента. В результате регрессионного анализа была получена следующая модель:

$$Y = 25,57 - 17,85X_1.$$

Затем была проведена проверка адекватности модели и рассчитан доверительный интервал, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Проверка адекватности модели

S_B^2	$t(P, mN)$	Δa_i
21,908	2,365	6,43874
		–6,43874

Так как параметр a_1 не меньше доверительного интервала. Это показывает то, что первый и единственный фактор является статистически значимым.

Адекватность модели проверена по коэффициенту Фишера с табличным значением [4–5]. Критическое значение критерия Фишера (F_K) при $P = 0,95$ составляет 9,28. Значение критерия Фишера, полученное в ходе расчетов (F_H), составляет 8,56. Это доказывает адекватность модели, так как $F_H < F_K$.

Выводы: Исследования показали, что плотность мощности лазерного излучения служит эффективным параметром для управления процессом спекания твердосплавных порошков. Установлено, что рост плотности мощности приводит к снижению пористости материала. Наблюдаемая зависимость свидетельствует об отсутствии парообразования при плотностях мощности до 24 кВт/см², что позволяет предположить наличие только твердой и жидкой фаз в материале в этом диапазоне. Увеличение доли жидкой фазы способствует уменьшению пористости спеченных образцов. В исследованном диапазоне мощностей выявлена линейная зависимость пористости от мощности лазерного излучения. Граничными условиями эксперимента, не позволяющими считать полученные данные универсальными, являются условия теплоотвода и количество твердосплавного материала на единице площади поверхности, подвергаемой воздействию излучения.

Список литературы

1. Панов В. С., Чувиллин А. М., Фальковский В. А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М. : МИСиС, 2004. 468 с.

2. Пекелис Г. Д., Гельберг Б. Т. Технология ремонта металлорежущих станков. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. 240 с.

3. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2007. 784 с.

4. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. Киев : Техника, 1987. 180 с.

5. Спиридонов А. А., Васильев Н. Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. Свердловск : Уральский политехнический институт, 1975. 260 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии
и оборудования машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov
Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Виталий Сергеевич Родионов
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: vitaliyrodionoff@yandex.ru

Vitaly S. Rodionov
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Иван Викторович Сакара
студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: Vaseckinvasa460@gmail.com

Ivan V. Sakara
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 62-94; 62-98

МОДЕРНИЗАЦИЯ КЛАПАНА ПОЖАРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

**Наталья Владимировна Сорокина¹,
Сергей Юрьевич Хренов²**

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования прохождения потоков рабочей среды в канале клапана на основе моделирования в САЕ-системе. Проведены

исследования влияния углов расположения поверхности уплотнения на динамику потока во внутренних каналах клапана методом однофакторного планирования эксперимента. Предложены меры по усовершенствованию конструкции клапана путем изменения углов наклона поверхности торца затвора, позволяющие снизить гидросопротивление в открытом положении.

Ключевые слова: клапан, моделирование, динамика потока, давление, скорость, гидросопротивление

MODERNIZATION OF A FIRE SYSTEM VALVE BASED ON FLOW DYNAMICS SIMULATION IN THE SOLIDWORKS FLOW SIMULATION SYSTEM

Natalia V. Sorokina¹, Sergey Yu. Khrenov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The article presents the results of a study of the flow of working medium in the valve channel based on modeling in the CAE system. The influence of the sealing surface angles on the flow dynamics in the internal channels of the valve was studied using a single-factor experimental design. Measures were proposed to improve the valve design by changing the angles of the gate end surface, which can reduce the hydrodynamic resistance in the open position.

Keywords: valve, modeling, flow dynamics, pressure, velocity, hydroresistance

В случае возгорания на станках с числовым программным управлением, используют специализированные автоматические системы. Данные системы обнаруживают возгорание и быстро ликвидируют огонь, не повреждая оборудование. Одним из основных элементов данной системы является дифференциальный клапан, который запускает в зону горения огнетушащее вещество.

Основным параметром запорной арматуры является динамическая характеристика прохождения продукта по системе каналов. Градиент скоростей и характер сечений обуславливает сопротивление на несущий элемент арматуры в частности в момент открытия и закрытия канала. Оценка совершенства формы каналов затруднительна, поскольку слишком высока погрешность и сложен математический расчет. Наиболее перспективным является моделирование в САЕ системах, предназначенных для анализа движения потока жидкости и газа [1, 2].

В данной работе на основе моделирования движения потока продукта проведен анализ конструкции клапана и предложено изменение запорного механизма.

Основным эксплуатационным параметром запорной арматуры является гидросопротивление. Определение этого параметра классическими расчетными методами весьма трудоемко и не дает высокой точности результатов. В свою очередь высокое сопротивление обусловлено неэффективным прохождением потоков жидкости в каналах арматуры. Перепады давлений и высокий уровень турбулентности ведут к снижению ресурса изделия, а также необходимости повышения входного давления в трубопроводе.

Задача заключается в исследовании прохождения потоков рабочей среды в канале клапана на основе моделирования в САЕ системе, а также разработка предложения по совершенствованию конструкции клапана на основе полученных результатов.

Расположение исследуемых сечений в клапане показано на рис. 1.

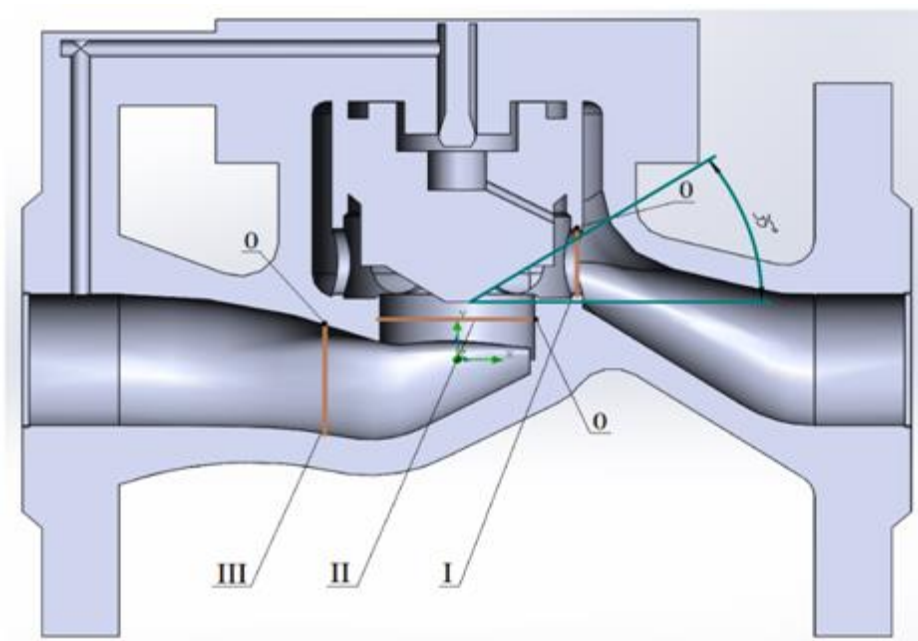


Рис. 1. Расположение исследуемых сечений в клапане

В качестве контрольных сечений были выбраны:

I – входное сечение стакана;

II – сечение, непосредственно прилегающее к уплотнению;

III – сечение выходного канала.

Прогнозирование поведения среды в каналах клапана для различных конструкций затворного узла целесообразно выполнять путем моделирования в системе SolidWorks Flow Simulation.

Принято решение провести виртуальный однофакторный план эксперимента. В качестве изменяемого параметра выбран угол наклона торца затвора. Шаг изменения входного фактора равен 5° .

На рис. 2–4 показаны графики распределения скоростей и давлений в I, II, III сечениях.

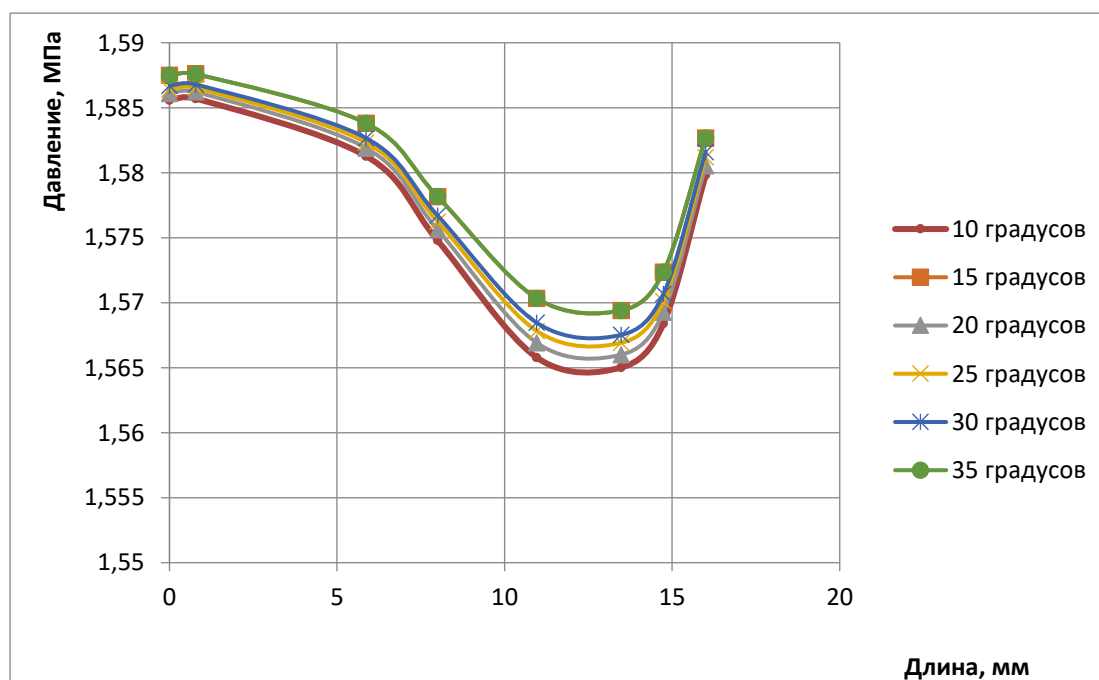
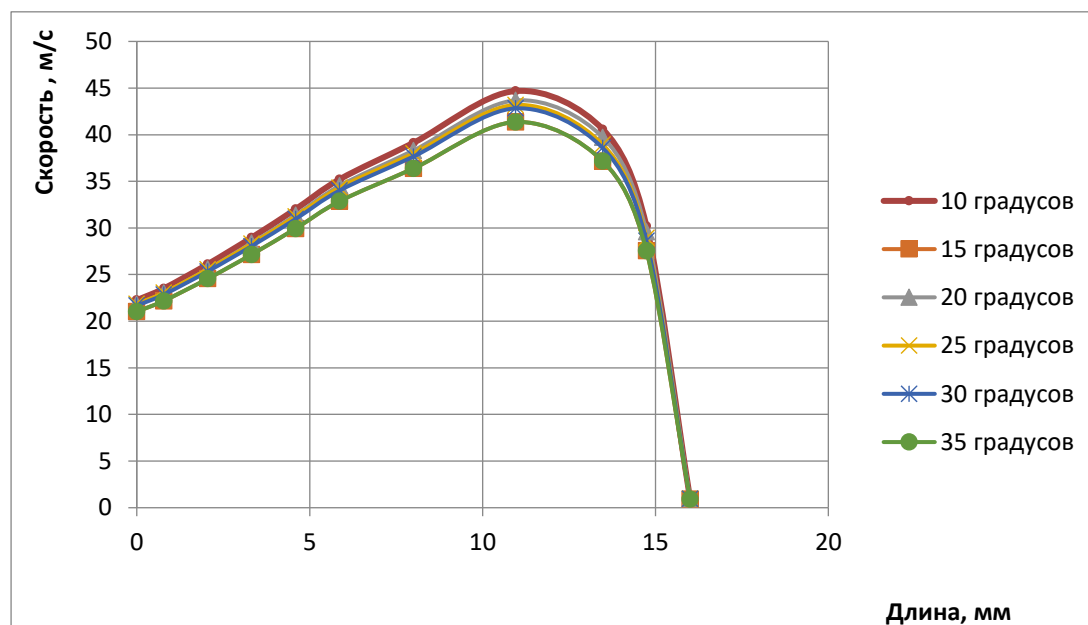


Рис. 2. Графики распределения скоростей и давлений в сечении I

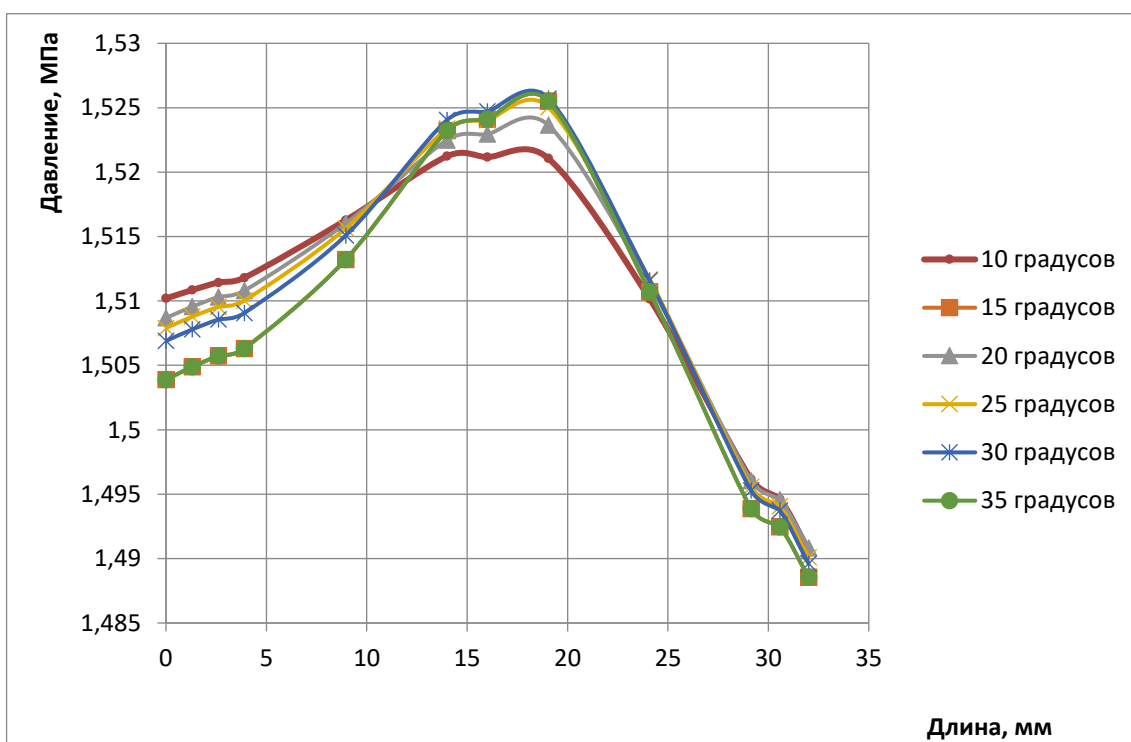
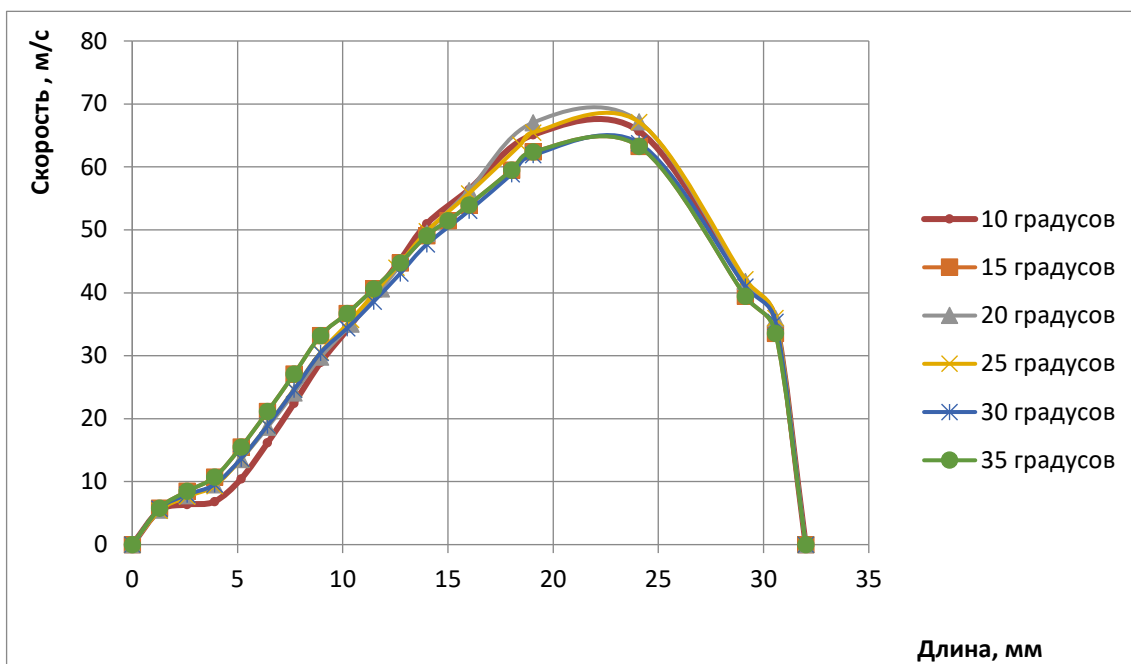


Рис. 3. Графики распределения скоростей и давлений в сечении II

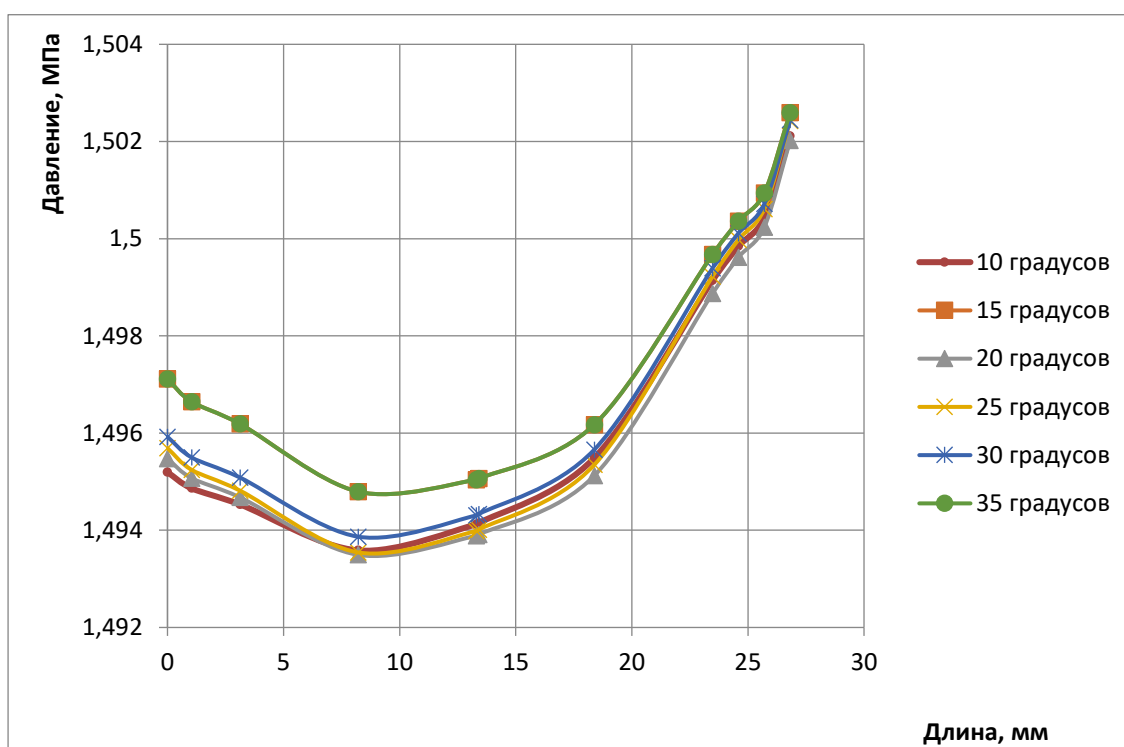
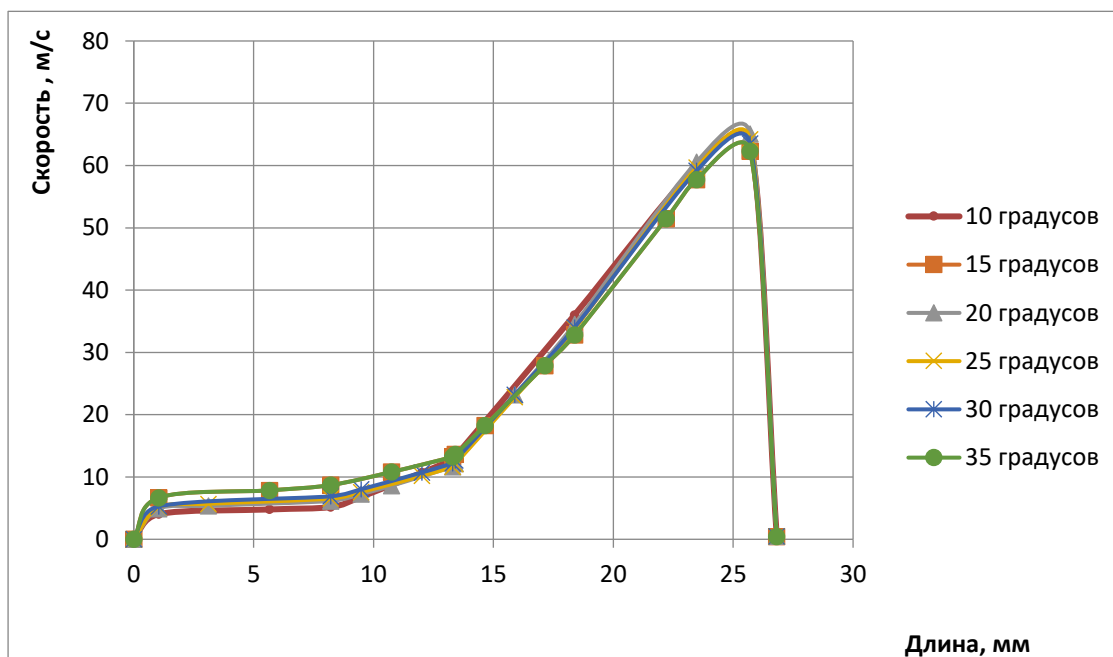


Рис. 4. Графики распределения скоростей и давлений в сечении III

На рисунке 5 показан график сравнения распределения скоростей потока по трем сечениям.

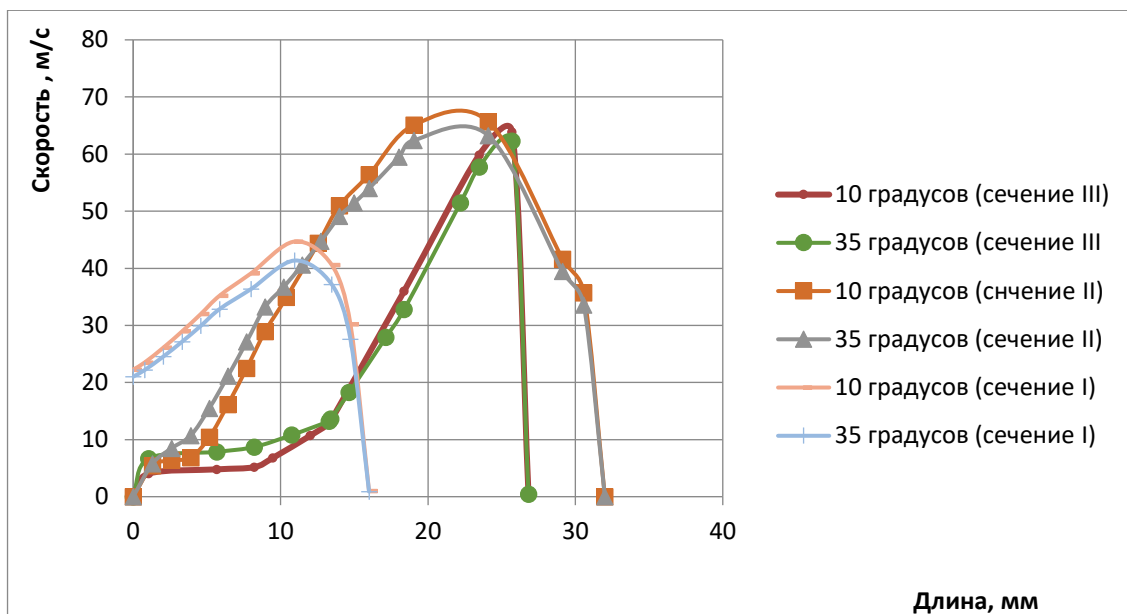


Рис. 5. График сравнения распределения скоростей потока по трем сечениям

На рис. 6 показан график сравнения распределения давления потока по трем сечениям.

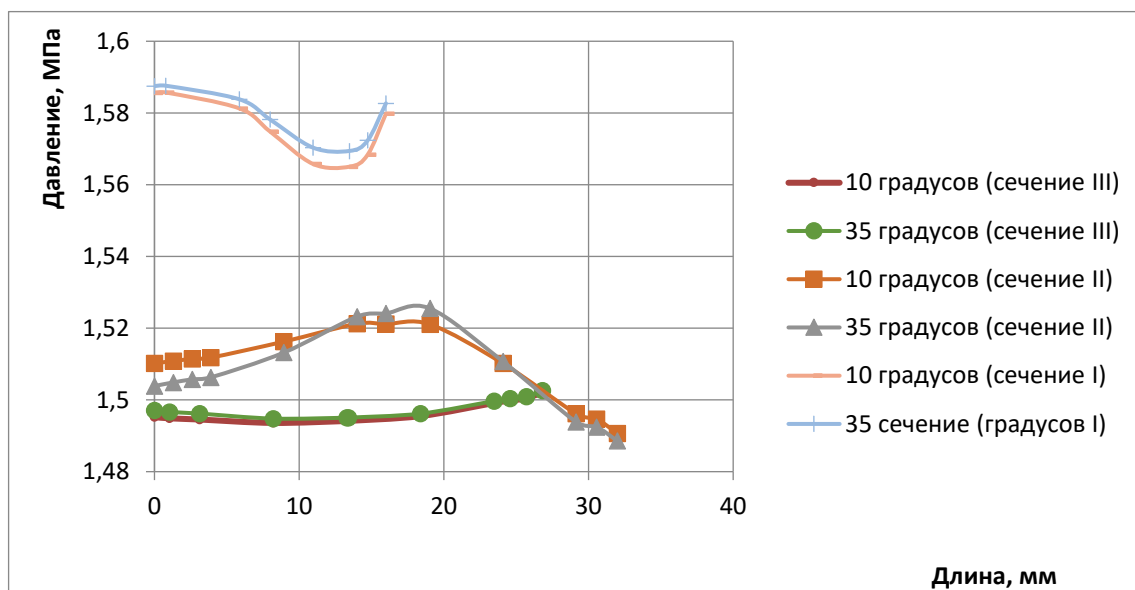


Рис. 6. График сравнения распределения давления потока по трем сечениям

При анализе считалось, что минимальная разница давлений I и III сечения обуславливает минимальное сопротивление клапана.

В сечении II оценивалась равномерность давления и скоростей по длине сечения.

Анализ показал, что при увеличении угла, давление в I сечении имеет тенденцию к росту, что говорит о меньшем падении давления по сравнению с входным трубопроводом. Так же в I сечении уменьшается размах давления по сечению, однако выходное давление в сечении III несколько падает.

Скорость потока при увеличении угла на входе существенно выравнивается и имеет несколько меньшее абсолютное значение на выходе. Наибольшие скорости наблюдаются при максимальном значении угла, так же угол 35° обеспечивает наименьший размах скоростей.

Максимальный размах наблюдается при угле 20° т.е. в районе этого значения наблюдается отрицательный экстремум.

На основе полученных аналитических результатов сделаны следующие выводы:

1. Рассматриваемое изделие имеет конструктивные недостатки, повышающие внутренние сопротивления клапана, сопротивление запорной арматуры зависит от способа конструктивной реализации внутренних каналов.
2. Разработана методика количественной оценки результатов моделирования движения потоков в САЕ-среде.
3. Проведены исследования влияния углов расположения поверхности уплотнения на динамику потока во внутренних каналах клапана методом однофакторного планирования эксперимента.
4. Предложены меры по усовершенствованию конструкции клапана путем изменения углов наклона поверхности торца затвора, позволяющее снизить гидросопротивление в открытом положении.

Список литературы

1. Zverovshchikov A. E., Bolshakov G. S. Simulation of the kinematics and gas dynamics of the centrifugal dispersion stand // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk, Russia : IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 2094. P. 42046. doi: 10.1088/1742-6596/2094/4/042046 EDN: BQOQFL
2. Зверовщиков А. Е., Воячек И. И., Уланов А. О. Модернизация конструкции запорно-пускового устройства на основе конечноэлементного моделирования истечения потока рабочей среды // Техника и технология современных производств : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 27–28 февраля 2019 г.). Пенза : Приволжский Дом знаний, 2019. С. 92–97. EDN: TQRZGD

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Владимировна Сорокина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудования машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nvsor@list.ru

Natalia V. Sorokina

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
technology and equipment for
mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Юрьевич Хренов

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: tom.94@inbox.ru

Sergey Y. Khrenov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.794

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ

**Валерий Евгеньевич Чуйков¹,
Николай Николаевич Меланин²,
Мария Семеновна Кудашева³,
Дмитрий Александрович Хохлов⁴,
Алексей Николаевич Золкин⁵**

^{1,2,3}ООО «Импульс-Атом», Заречный, Пензенская область, Россия

⁴ООО «НПП «Атом-Комплект», Заречный, Пензенская область, Россия

⁵Пензенский государственный технологический университет,
Пенза, Россия

Аннотация. Рассмотрено применение метода микродугового оксидирования для обработки алюминиевых корпусных деталей станков с формированием на их поверхностях керамикоподобных покрытий. Отмечено, что традиционные схемы микродугового оксидирования с использованием базового электролита плохо подходят для обработки деталей, имеющих относительно большие размеры и сложную форму, ввиду неравномерности и неоднородности формируемых на них покрытий. Показаны возможности повышения равномерности и однородности покрытий на различных деталях, включая корпусные детали станков, и описан успешный опыт реализации технологических процессов, основанных на использовании этих возможностей.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микродуговое оксидирование, корпусные детали, керамикоподобные покрытия, схемы реализации, растворы электролитов

APPLICATION OF THE MICROARC OXIDATION METHOD FOR PROCESSING CORPUS DETAILS OF METAL CUTTING MACHINES

Valery E. Chuikov¹, Nikolay N. Melanin², Maria S. Kudasheva³,
Dmitry A. Khokhlov⁴, Alexey N. Zolkin⁵

^{1,2,3}LLC «Impulse-Atom», Zarechny, Penza region, Russia

⁴LLC «SPE «Atom-Komplekt», Zarechny, Penza region, Russia

⁵Penza State Technological University, Penza, Russia

Abstract. The application of the microarc oxidation method for processing aluminum corpus details of metal cutting machines with the formation of ceramic-like coatings on their surfaces is considered. It is noted that traditional microarc oxidation schemes using a base electrolyte are poorly suited for processing details with relatively large dimensions and complex shapes, due to the unevenness and heterogeneity of the coatings formed on them. The possibilities of increasing the unevenness and heterogeneity of coatings on various details, including corpus details of metal cutting machines, are shown, and successful experience in implementing technological processes based on the use of these capabilities is described.

Keywords: aluminum alloys, microarc oxidation, corpus details, ceramic-like coating, implementation schemes, electrolyte solutions

Микродуговое оксидирование (МДО) является прогрессивным методом электроплазмохимической обработки, позволяющим преобразовывать естественные оксидные пленки на поверхностях деталей из алюминиевых сплавов в плотные керамикоподобные покрытия с высокими прочностными, защитными, электроизоляционными, адгезионными и другими полезными свойствами [1–3]. Формирование таких покрытий открывает большие возможности для комплексного повышения эксплуатационных свойств широкого спектра деталей из алюминиевых сплавов [4].

Благодаря малой плотности, высокой удельной прочности, хорошей коррозионной стойкости и исключительной технологичности алюминиевые сплавы с каждым годом находят все более широкое применение в разных отраслях машиностроения. Не является исключением и станкостроение, в этой отрасли алюминиевые сплавы, как литейные, так и деформируемые, все чаще применяются для изготовления различных изделий, к числу которых относятся и корпусные детали станков и других машин.

К сожалению, традиционные схемы реализации МДО в электролитической ванне с механической или пневматической мешалкой и использованием базового электролита, представляющим собой водный

раствор едкого кали жидкого стекла, не могут обеспечить формирования равномерных по толщине и однородных по микроструктуре и фазовому составу керамикоподобных покрытий на деталях, имеющих значительные размеры и непростую форму. Поэтому для обработки корпусных деталей станков, как правило, имеющих протяженные поверхности, сложные сопряжения, а также отверстия, полости, пазы, канавки, резьбы и т.п. необходимы оригинальные схемы реализации МДО и новые электролиты [5].

Сотрудниками предприятий ООО «Импульс-Атом» и ООО «НПП «Атом-Комплект» при поддержке ведущих отечественных специалистов в области МДО разработаны научно-практические основы реализации технологических процессов обработки корпусных деталей станков, обеспечивающие высокую равномерность и однородность формируемых керамикоподобных покрытий. Важнейшими отличительными сторонами данных технологических процессов являются применение различных устройств, обеспечивающих равномерную циркуляцию электролита на протяженных поверхностях деталей и улучшенную циркуляцию электролита около их нетехнологичных участков, а также использование электролитов, имеющих более сложный химический состав и более высокую рассеивающую способность относительно базового электролита.

Необходимая циркуляция электролита создается с помощью специальных диффузоров, а также рассеивателей и жиклеров, в которые электролит подается насосами через специальные трубопроводы. При этом с применением компьютерного моделирования заранее определяется вид и количество диффузоров, рассеивателей и жиклеров, их расположение относительно деталей, значения расхода электролита и других параметров, обеспечивающие примерно одинаковые условия взаимодействия электролита со всеми участками поверхностей обрабатываемых деталей [6].

В качестве электролитов для обработки корпусных деталей станков применяются растворы на основе базового электролита, но с добавками соединений вольфрама, ванадия, хрома и других элементов. Также при необходимости в электролиты добавляются нерастворимые микропорошки корунда, карбида кремния и т.п.

Разработанные технологические процессы характеризуются высокой производительностью и стабильностью, позволяют добиваться высокой равномерности толщины керамикоподобных покрытий, однородности их микроструктуры и фазового состава. Благодаря этому обеспечивается максимальная близость значений их свойств на разных поверхностях деталей и их различных участках, появляются различные

варианты обработки нетехнологичных поверхностей, в том числе внутренних полостей и глубоких отверстий. Вместе с тем, может быть обеспечено расширение цветовой гаммы керамикоподобных покрытий с получением серых и черных тонов с различными оттенками.

Также следует отметить, что разработанные технологические процессы защищены несколькими патентами РФ на изобретения и довольно успешно применяются в производственной деятельности предприятий ООО «Импульс-Атом» и ООО «НПП «Атом-Комплект» не только для обработки корпусных деталей станков, но при производстве других изделий машиностроения, в том числе и специального назначения.

Список литературы

1. Малышев В. Н. Оптимизация процесса формирования износостойких керамических покрытий методом микродугового оксидирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 9. С. 32–38.
2. Chufistov O. E., Chufistov E. A., Artemiev V. P. Technology, structure and properties of coatings, formed by anodic oxidation methods on aluminum and its alloys // Non-Ferrous Metals. 2010. № 2. С. 37–40.
3. Чуфистов О. Е., Чуфистов Е. А., Колодяжный М. В. Климкина О. А. К вопросу о возможности повышения равномерности структуры и фазового состава МДО-покрытий, получаемых на деталях из алюминиевых сплавов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 2 (24). С. 182–188.
4. Атрощенко Э. С., Казанцев И. А., Чуфистов О. Е. [и др.]. Технология получения покрытий различного функционального назначения микродуговым оксидированием // Практика противокоррозионной защиты. 1999. № 3 (13). С. 32–39.
5. Чуфистов О. Е., Чуфистов Е. А., Колодяжный М. В. Микродуговое оксидирование с дополнительной направленной циркуляцией раствора около труднообрабатываемых участков поверхностей деталей // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 2 (24). С. 188–194.
6. Chufistov O. E. Formation of coatings on details from valve metals alloys by micro-arc oxidation in internal cavities of counter electrodes // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 833–838.

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Евгеньевич Чуйков
генеральный директор,
ООО «Импульс-Атом» (Россия,
Пензенская обл., г. Заречный,
ул. Транспортная, 31)
e-mail: mail@atom58.ru

Valery E. Chuikov
General director, LLC
«Impulse-Atom» (31 Transportnaya
street, Zarechny, Penza region,
Russia)

Николай Николаевич Меланин
исполнительный директор,
ООО «Импульс-Атом» (Россия,
Пензенская обл., г. Заречный,
ул. Транспортная, 31)
e-mail: mail@atom58.ru

Nikolay N. Melanin
Executive director, LLC
«Impulse-Atom» (31 Transportnaya
street, Zarechny, Penza region,
Russia)

Мария Семеновна Кудашева
заместитель генерального директора по
маркетингу, ООО «Импульс-Атом»
(Россия, Пензенская обл., г. Заречный,
ул. Транспортная, 31)
e-mail: mail@atom58.ru

Maria S. Kudasheva
Deputy general director for
marketing, LLC «Impulse-Atom»
(31 Transportnaya street, Zarechny,
Penza region, Russia)

Дмитрий Александрович Хохлов
генеральный директор, ООО «НПП
«Атом-Комплект» (Россия,
Пензенская обл., г. Заречный,
пр-д Демакова, 5)
e-mail: atom-komplekt@yandex.ru

Dmitry A. Khokhlov
General director, LLC «SPE
«Atom-Komplekt» (5 Demakov
passage, Zarechny, Penza region,
Russia)

Алексей Николаевич Золкин
аспирант, Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, ул. Гагарина /
пр-д Байдукова, 1А / 11)
e-mail: bornone@mail.ru

Alexey N. Zolkin
Postgraduate student, Penza State
Technological University (1A / 11
Gagarina street / Baydukova passage,
Penza, Russia)

УДК 621.91

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ МНОГОКООРДИНАТНОГО ПЯТИОСЕВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

**Владимир Федорович Макаров¹,
Михаил Владимирович Песин²,
Александр Олегович Норин³**

^{1,2,3}Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема повышения производительности, качества
и точности изготовления деталей и узлов газотурбинных двигателей для совре-

менного растущего пассажирского авиационного транспорта на основе использования технических возможностей современных многоосевых многокоординатных шлифовальных обрабатывающих центров с ЧПУ. Приведены результаты успешного применения многокоординатного пятиосевого профишлифовального обрабатывающего центра с ЧПУ модели MFP-050.65.65 фирмы Magerle (Швейцария), который позволил сократить в пять раз число операций, универсальных станков, специальных приспособлений и режущих инструментов путем увеличения количества обрабатываемых поверхностей с одной установки обрабатываемых сопловых лопаток авиационного газотурбинного двигателя. Одновременно со значительным повышением производительности обработки различных разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток за счет применения новых высокопористых шлифовальных кругов и рациональных режимов глубинного шлифования обеспечено более высокое безприжоговое качество прошлифованных поверхностей и решена важная задача по повышению точности проходных сечений соплового аппарата турбины при совместном использовании системы ЧПУ станка и специального программного обеспечения для коррекции погрешностей литейных поверхностей деталей в процессе их установки, разворота и глубинного шлифования базовых поверхностей. Разработанная новая технология обработки сопловых лопаток впервые в РФ внедрена на предприятии АО «Авиадвигатель» при изготовлении сопловых лопаток современных вновь выпускаемых газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: сопловые лопатки турбины, проходное сечение, глубинное шлифование, обрабатываемые поверхности, шлифовальные круги, количество проходов, погрешности литья лопаток

USING THE ADVANTAGES OF A MULTI-COORDINATE FIVE-AXIS CNC GRINDING MACHINE TO CORRECT THE GEOMETRY OF GAS TURBOCHARGE BLADES DURING DEEP GRINDING

Vladimir F. Makarov¹, Mikhail V. Pesin²,
Alexander I. Norin³

^{1,2,3}Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The work is aimed at improving the productivity, quality and accuracy of manufacturing parts and assemblies of gas turbine engines for modern and growing passenger aviation transport by using the technical capabilities of modern multi-axis multi-axis CNC grinding centers. The article presents the results of the successful application of a multi-axis five-axis profiled CNC machining center model MFP-050.65.65 from Magerle (Switzerland), which made it possible to reduce by five times the number of operations, universal machines, special devices and cutting tools by increasing the number of surfaces to be processed from one installation of machined nozzle blades of an aircraft gas turbine engine. Simultaneously with a significant increase in the processing performance of various multidirectional surfaces of the nozzle blades due to the use of new highly porous grinding wheels and rational deep grinding modes, a higher burn-free quality of the

ground surfaces was ensured and an important task was solved to increase the accuracy of the flow sections of the turbine nozzle while using the machine's CNC system and special software to correct errors in the casting surfaces of parts in the process their installations, turning and deep grinding of the base surfaces. The developed new technology for processing nozzle blades was introduced for the first time in the Russian Federation at Aviadvigatel JSC in the manufacture of nozzle blades for modern newly manufactured gas turbine engines.

Keywords: turbine nozzle blades, cross-section, deep grinding, surfaces to be treated, grinding wheels, number of passes, blade casting errors

Введение. В настоящее время в нашей стране в связи с санкциями резко возросла потребность в изготовлении большого парка отечественных магистральных пассажирских самолетов на замену импортных. Правительством РФ поставлены задачи изготовить к 2030 году не менее 339 современных отечественных гражданских самолетов, таких как ТУ-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310. В свою очередь это потребует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1].

Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентноспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых лопаток, входящих в сопловые аппараты из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе [2]. Из всех деталей газовой турбины наиболее сложными по геометрии и конструкции являются лопатки сопловых аппаратов (рис.1), предназначенных для правильного направления газового потока на рабочие лопатки турбины для создания необходимого крутящего момента и вращения ротора газотурбинного двигателя. Обработка разнонаправленных поверхностей таких сложных деталей проводится обычно методом шлифования на различных универсальных плоскошлифовальных станках типа 3Г72 Ф или на модернизированных токарно-лобовых станках типа МК163 М с применением различных шлифовальных кругов из электрокорунда белого на керамической или бакелитовой связке зачастую без применения СОЖ. При этом, помимо низкой производительности обработки, зачастую не обеспечивается требуемая точность и шероховатость, появляются трещины и шлифовочные прижоги обработанных поверхностей.



Рис. 1. Общий вид расположения различных разнонаправленных обрабатываемых поверхностей сопловой лопатки турбины (а), предназначенных для точного расположения в сопловом аппарате турбины при сборке (б)

Кроме того, установка сопловых лопаток на универсальных станках для шлифования различных поверхностей проводится в специальных сложных дорогостоящих приспособлениях по 6 базовым литейным точкам. При таком варианте базирования сопловых лопаток и последующем шлифовании возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с часто возникающей погрешностью геометрии отливок лопаток при их остывании после литья. При сборке прошлифованных лопаток в сопловой аппарат не выполняется требование по обеспечению необходимой площади проходных сечений между лопатками для рассчитанного прохождения газового потока. Это приводит к изменению рабочих режимов ГТД, к увеличению расхода топлива, снижению мощности, тяги и КПД газотурбинного двигателя.

Разработка новой высокопроизводительной технологии обработки сопловых лопаток турбин. Для решения проблем повышения производительности, точности и качества обработки разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток проведен анализ существующих технологических процессов профилишлифовальной обработки рабочих и сопловых лопаток турбин современных газотурбинных

двигателей на моторостроительных предприятиях страны и за рубежом [3,4,]. В результате разработан новый наиболее эффективный технологический процесс по пятиосевой профилировальной многокоординатной обработке всех поверхностей сопловой лопатки с одной установки на шлифовальном обрабатывающем центре модели MFP-050.65.65 с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D фирмы «Magerle AG» (Швейцария) (рис. 2).

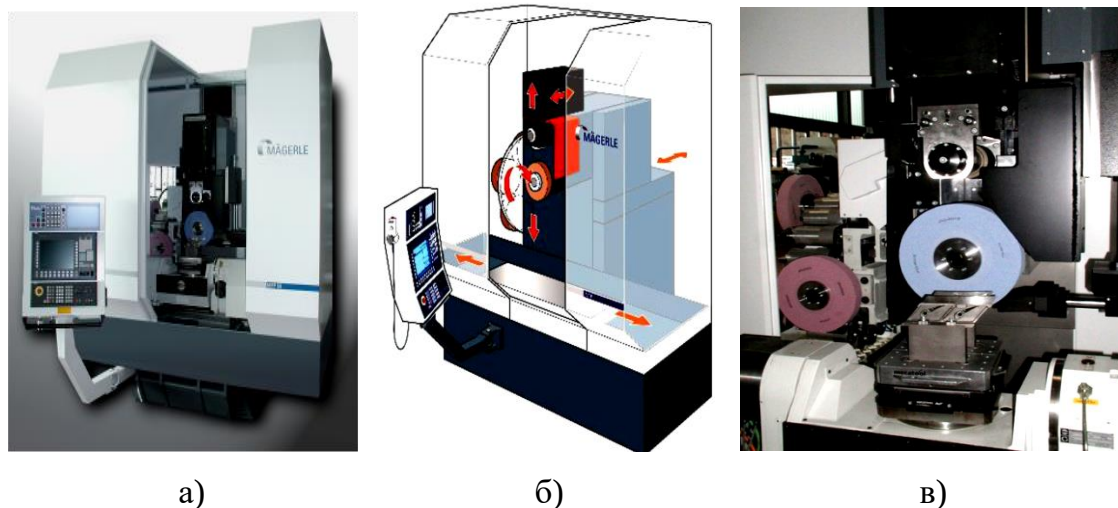


Рис. 2. Общий вид профилировального станка MFP-050.65.65(а), схемы 5-ти осевой обработки и зоны шлифования, непрерывной правки алмазным роликом и автоматической смены шлифовальных кругов для профильного глубинного шлифования лопаток турбины

Этот станок (рис. 2,а) имеет горизонтальное расположение шпинделя и поворотный глобусный стол (рис. 2,б). Разработанная технология предусматривает проводить комплексную обработку шлифованием сложных поверхностей лопаток с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат, с непрерывной правкой и автоматической сменой шлифовальных кругов (рис. 2,в). Современная конструкция станка и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки.

Многократное повышение производительности, качества и точности на станке обеспечивается выполнением обработки всех плоских и круговых разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток методом высокопроизводительного глубинного шлифования с применением высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки алмазными роликами и обильной высоконапорной подачи СОЖ [5, 6].

Общая схема глубинного шлифования плоских поверхностей сопловых лопаток на станке MFP-050.65.65 фирмы Мегерле (Швей-

пария) с применением высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки алмазными роликами и обильной высоконапорной подачи СОЖ для охлаждения зоны шлифования, зоны правки и вымывания стружки представлена на рис. 3. Кроме того, СОЖ используется для автоматической балансировки шлифовальных кругов на станке. Система ЧПУ станка увеличивает число оборотов круга по мере уменьшения его диаметра при непрерывной правке с целью поддержания постоянной скорости резания.

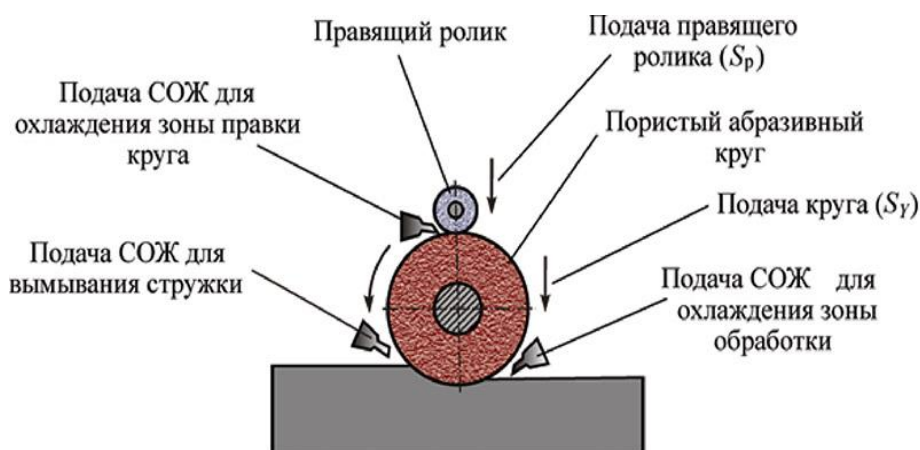


Рис. 3. Схема глубокого шлифования плоских поверхностей сопловых лопаток на станке MFP-050.65.65 фирмы Мегерле (Швейцария)

Для глубокого шлифования выбраны вместо импортных шлифовальных кругов фирмы «Tyrolit» (Австрия) отечественные высокопористые керамические круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1 300x30x76,2 25A F60 G14V, не уступающие по стойкости и производительности, но дешевле в 5 раз. Предварительно были определены рациональные режимы глубокого шлифования, обеспечивающих требуемую шероховатость $Ra = 0,32–0,63$ мкм, благоприятные сжимающие напряжения и отсутствие шлифовочных прижогов и трещин: скорость круга $V=20$ м/с, подача $S = 150–200$ мм/мин, непрерывная правка $0,4–0,8$ мкм/об., СОЖ 6–8 % Blaser 4000CF под давлением 6 бар.

Обработка базовых поверхностей с припуском 1–2 мм выполняется за 5 проходов с уменьшением глубины резания от 1 до 0,02 мм с режимами шлифования, представленными в табл. 1.

Контроль точности геометрии сопловых лопаток осуществляется бесконтактной оптической измерительной системой ATOS III, которая позволяет получать оцифрованные модели сопловых лопаток в формате *.stl с точностью $\pm 0,02$ мм.

**Режимы глубинного шлифования базовых поверхностей
сопловых лопаток**

№ про- хода	Глубина t , мм	Подача S , мм/мин.	Скорость V , м/с	Непрерывная правка ролика мкм/об	Соотношение скоростей, круг/ролик
1	1	150	20	0,8	0,8
2	0,5	150	20	0,8	0,8
3	0,4	150	20	0,6	0,8
4	0,08	200	20	0,4	0,8
5	0,02	200	20	0	0

В результате анализа технических характеристик и возможностей этого станка и системы ЧПУ принято решение, что неизбежное искажение геометрии отливок лопаток, полученных в процессе литья по выплавляемым моделям, можно уменьшить за счет коррекции геометрии установочных базовых поверхностей сопловых лопаток турбин ГТД при их обработке методом глубинного шлифования. Для того чтобы провести корректирующую механическую обработку, необходимо правильно установить и развернуть вместе с приспособлением сопловую лопатку на предварительно рассчитанный угол, т.е. придать сопловой лопатке правильное положение относительно выбранной системы координат [7, 8].

Для получения величин этой коррекции разработано специальное программное обеспечение (СПО). Данное СПО позволяет с помощью оцифровки учесть величину отклонения фактических литейных поверхностей профиля пера лопаток от конструкторской модели и рассчитать угол разворота и смещения лопатки с приспособлением и окончательно получившуюся площадь проходного сечения. Для разворота лопатки с приспособлением на расчетный угол из СПО выбирается файл и вводится в стойку ЧПУ станка MFP-050.65.65 фирмы Magerle AG. Введя коррекцию, после установки лопатки в станочное приспособление (рис.4) и разворота ее на рассчитанный угол специальным программным обеспечением, в процессе последующего глубинного шлифования базовых установочных поверхностей искажение положения профиля лопатки в пространстве уменьшается и при сборке обработанных лопаток в корпусе соплового аппарата турбины обеспечивается требуемое значение площади проходного сечения турбины

газотурбинного двигателя [9]. Ниже представлена схема расположения поворотного приспособления для шлифования лопатки (рис.3). Приспособление расположено на паллете, которая устанавливается на стол станка по посадочным местам.

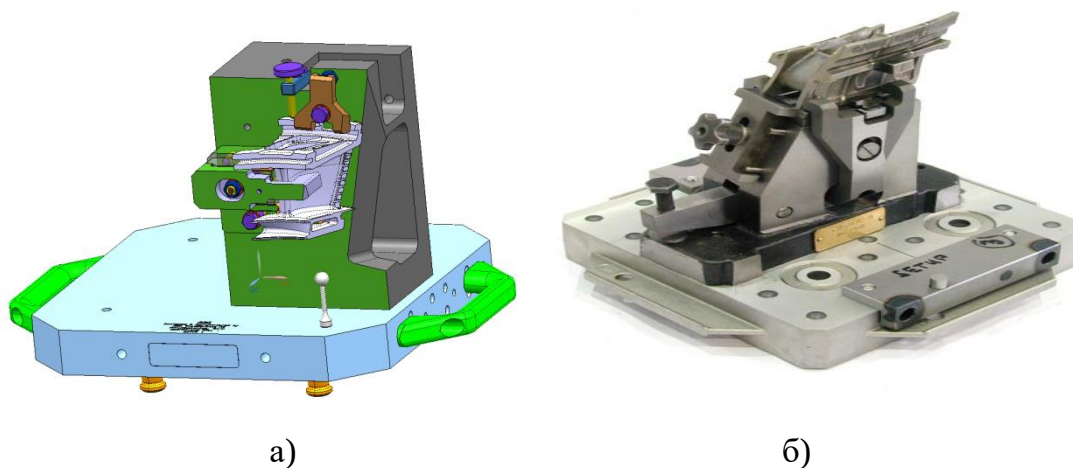


Рис. 4. 3-D модель (а) и общий вид (б) станочного поворотного приспособления для установки, разворота и обработки базовых установочных поверхностей сопловых лопаток методом глубинного шлифования на станке фирмы «Magerle AG» MFP-050.65.65

Экспериментальные исследования применения новой технологии обработки сопловых лопаток на станке фирмы «Magerle AG показали, что, после обработки площадь проходного сечения соплового аппарата значительно приблизилось к номинальному значению [10,11].

Результаты работы внедрены и применяются при изготовлении 7 различных наименований сопловых лопаток ТВД из жаропрочного литейного сплава на основе никеля на 5-ти координатном профилешлифовальном станке с ЧПУ MFP-050.65.65 фирмы Mägerle в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь). В результате внедрения новой технологии изготовления сопловых лопаток с применением многокоординатных профилешлифовальных станков и последующей более эффективной сборки сопловых аппаратов производительность изготовления этих деталей и узлов газотурбинных двигателей увеличилась в 3 раза. При этом обеспечено более высокое по сравнению с серийным производством качество поверхностного слоя лопаток: шероховатость поверхности снизилась до $Ra = 0,3-0,4$ мкм, получены благоприятные сжимающие остаточные напряжения, обеспечена микротвердость в пределах нормы, создана благоприятная без прижогов и трещин микроструктура поверхностного слоя. Кроме того, исключены дополнительные переборки лопаток при селективной сборке сопловых аппаратов, что значительно сократило время простоя сборочных участков для подгонки

площади проходного сечения соплового аппарата до требуемого значения. В результате внедрения обработки сопловых лопаток на 5-ти осевом многокоординатном шлифовальном станке MFP-050.65.65 фирмы Mägerle с ЧПУ сокращены затраты (около 4 млн. руб. в год) на ежегодное изготовление не менее четырех дополнительных стапелей и барабанов, необходимых для шлифования плоских и круговых поверхностей сопловых лопаток по старой серийной технологии на плоскошлифовальных и модернизированных токарнолобовых станках. По новой технологии обработано 26 комплектов сопловых аппаратов и более 1000 сопловых лопаток с внесением в систему ЧПУ станка коррекции найденных при оцифровке отклонений профиля пера сопловых лопаток путем разворотов и смещений лопаток в приспособлении на рассчитанную величину и последующим глубинным шлифованием базовых поверхностей, что позволило гарантировано обеспечивать требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата в пределах заданного допуска. По результатам исследований оформлен патент на изобретение [12].

Список литературы

1. Козлов Д. А. ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России. URL: <http://www.aviaport.ru/news /2012/04/16/233024.html> (дата обращения: 15.10.2014).
2. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М. : Машиностроение, 2008. Т. 2. 365 с.
3. Макаров В. Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2013. 320.
4. Noichl H. CBN Grinding of Nickel Alloys in the Aerospace Industry // Intertech. 2000. P. 17–21.
5. Полетаев В. А., Цветков Е. В., Волков Д. И. Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М. : Инновационное машиностроение, 2016. 262 с.
6. Макаров В. Ф., Никитин С. П. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Научные технологии машиностроения. 2018. № 4 (82). С. 21–28.
7. Макаров В. Ф., Туранский Р. А., Григорьева А. В. Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин // Актуальные проблемы современного машиностроения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2015. С. 291–293.

8. Макаров, В. Ф., Норин А. О. Автоматизированный расчет величин смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Москва : МАДИ, 2016.

9. Макаров В. Ф., Норин А. О., Туранский Р. А. Разработка метода корректирующего управления процессом глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток на многоосевом станке с ЧПУ // МНТК «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016) (6–8 октября 2016 г.) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. СПб. : Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-т Петра Великого, 2016. С. 23–27.

10. Макаров В. Ф., Никитин С. П., Норин А. О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 5 (59). С. 29–31.

11. Макаров В. Ф., Никитин С. П. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии машиностроения. 2016. № 5 (59). С. 17–24.

12. Патент 2648174 С1 Российская Федерация, МПК В23С 3/28, В24В 5/00, F01D 25/00. Способ обработки радиальной торцевой канавки на детали газотурбинного двигателя (варианты) / Кобелев С. В., Тукачев Д. В., Норин А. О. № 2017119813 ; заявл. 06.06.2017 ; опубл. 22.03.2018.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Федорович Макаров

доктор технических наук, профессор,
академик РАН, заместитель
заведующего кафедрой
«Инновационные технологии
машиностроения», Пермский
национальный исследовательский
политехнический университет
(Россия, г. Пермь, Комсомольский
пр-кт, 29)
e-mail: makarovv@pstu.ru

Vladimir F. Makarov

Doctor of technical sciences,
professor, academician of the Russian
Academy of Science, deputy head of
the department innovative engineering
technologies, Perm National Research
Polytechnic University
(29 Komsomolsky avenue, Perm,
Russia)

Михаил Владимирович Песин

доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН, декан
механико-технологического факультета,
Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет (Россия, г. Пермь,
Комсомольский пр-кт, 29)
e-mail: m.pesin@mail.ru

Mikhail V. Pesin

Doctor of technical sciences,
professor, corresponding member
of the Russian Academy of Natural
Sciences, dean of the faculty
of mechanics and technology, Perm
National Research Polytechnic
University (29 Komsomolsky avenue,
Perm, Russia)

Александр Игоревич Норин
аспирант, Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет (Россия, г. Пермь,
Комсомольский пр-кт, 29)
e-mail: m.pesin@mail.ru

Alexander I. Norin
Postgraduate student, Perm National
Research Polytechnic University
(29 Komsomolsky avenue, Perm,
Russia)

УДК 621.9.025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Игорь Иосифович Артёмов¹,
Сергей Александрович Нестеров²,
Сергей Вячеславович Кочкин³,
Наталья Владимировна Сорокина⁴,
Дмитрий Александрович Акимов⁵**

^{1,2,3,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Приведены экспериментальные исследования возникновения кавитации в зоне резания при шлифовании.

Ключевые слова: шлифование, смазочно-охлаждающая жидкость, кавитация

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FORMATION OF CAVITATION PHENOMENA DURING GRINDING

**Igor I. Artemov¹, Sergey A. Nesterov², Sergey V. Kochkin³,
Natalia V. Sorokina⁴, Dmitry A. Akimov⁵**

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

Abstract. Experimental studies of the occurrence of cavitation in the cutting zone during grinding are presented.

Keywords: grinding, coolant, cavitation

Согласно исследованиями ряда авторов [1–7] при классическом шлифовании возникают условия, при которых происходит формирование ультразвуковых колебаний в зоне резания. Это способствует

возникновению кавитационных эффектов при подаче смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки.

Использование при шлифовании СОЖ позволяет оптимизировать температурные режимы работы, уменьшить воздействие сил трения в зоне контакта [1]. Кроме того СОЖ позволяет вводить в зону обработки добавки, меняющие структуру как обрабатываемой поверхности, так и уже обработанной [2, 3, 10]. В этом случае за счет изменения состава СОЖ создаются условия для формирования условий повышения качества поверхностных слоёв обрабатываемого материала [4]. Основным фактором, определяющим дополнительное воздействие СОЖ на обрабатываемую поверхность, являются ультразвуковые колебания и связанные с ними кавитационные эффекты.

Возникновение кавитации в зоне резания может быть реализовано как дополнительными кавитаторами в зоне подготовки СОЖ к подаче в зону резания, так и за счет самого процесса шлифования и формирования высокочастотных колебаний в межзерновом пространстве в момент упругого сжатия СОЖ находящейся в промежутке между межзерновым пространством и обрабатываемой поверхностью [7].

Эффект кавитации, сопровождаемый возникновением в жидкости разрывов – пузырьков с низким давлением, возникает либо в результате резкого местного понижения давления в жидкости, которое может происходить или при увеличении скорости ее течения (гидродинамическая кавитация), либо при прохождении через жидкость акустической волны большой интенсивности и высокой частоты во время полупериода разрежения (акустическая кавитация). Возникшие кавитационные пузырьки быстро схлопываются, излучая при этом сверхзвуковую ударную волну. В момент взрыва кавитационного пузырька, давление и температура достигают больших величин (до 100 МПа и 10000 °C) [5].

Известно [4], что в жидкости процент растворенного кислорода может быть выше, чем процентное содержание его в воздухе. Доказано, что при возникновении эффекта кавитации в кавитационные пузырьки начинают активно выделяться газы, растворенные в жидкости, в частности кислород. В связи с этим при возникновении кавитации повышается химическая активность жидкостей.

Явление кавитации совершенно одинаково и для потока, обтекающего неподвижное тело, и для среды, в которой движется тело. Кавитация возникает при достижении потоком граничной скорости, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Акустическая кавитация возникает тогда, когда в фазе разрежения акустической волны в жидкости образовывается разрыв в виде полости низкого давления, которая заполняется паром и газами, а в фазе сжатия акустической волны полость захлопывается.

В ряде работ изучается положительное влияние эффекта кавитации в условиях поведения шлифования с использованием СОЖ металлических заготовок абразивными шлифовальными кругами [5–7].

Частоту вибраций при прохождении зерен по обрабатываемой поверхности можно оценить по классической формуле

$$\omega = V_{\text{ш}}/l, \quad (1)$$

где $V_{\text{ш}}$ – окружная скорость шлифовального круга, l – расстояние между зернами.

Среднее расстояние между зернами в абразивном круге основной зернистости можно рассчитать по зависимости:

$$l = \sqrt[3]{\frac{1000}{g \cdot n}} = \sqrt[3]{\frac{100\,000}{(62-2) \cdot N \cdot \gamma \cdot n}}, \quad (2)$$

где N – номер структуры шлифовального круга; γ – удельный вес абразивного материала определяется экспериментально [7]. Для электрокорунда $g = 3,85$, а для карбида кремния $g = 3,10 \dots 3,20$ – карбид кремния; g – масса абразивных зерен в 1 см^3 круга можно определить по следующему уравнению: $g = (62 - 2N) \cdot \gamma / 100$; n – количество зерен в 1 г зерна.

С учетом реальных величин скоростей шлифовального круга на уровне 35 м/с получим величины частот вибраций ω для крайних рассматриваемых случаев на уровне 71 кГц и 146 кГц. Эти значения соответствуют условиям возбуждения акустической кавитации в жидкости при нормальном атмосферном давлении.

Для расчета времени схлопывания кавитационного пузырька t_c используется аналитическая формула [7]:

$$t_c = \frac{1}{\omega} \arcsin \left[\frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0}{p_m} \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2} + \sin \varphi \right] - \frac{\varphi}{\omega}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости; p_m – амплитуда колебаний давления в жидкости; R_0 – радиус пузырька; ω – частота вибраций; ω_0 – резонансная частота

$\omega_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_0}}$; p_0 – атмосферное давление; $\Omega = \omega/\omega_0$; δ – декремент затухания;

$\text{tg} \varphi = -\delta \cdot \Omega / (1 - \Omega^2)$.

Величины t_c при следующих значениях параметров $R_0 = 10^{-6} \text{ м}$, $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\gamma = 1,4$, $\delta = 0,1$, дает $t_c \approx 10^{-8}$ с, при этом параметры связаны ограничением вида

$$\left| \frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0 \delta}{p_m} \Omega + \sin \varphi \right| \leq 1. \quad (4)$$

Проверяя условие для времени схлопывания пузырька t_c сверху: $\omega t_c < 1$, можно оценить, что величины рассчитанных частот вибраций укладываются в предельные параметры с многократным запасом. Всё это подтверждает теоретическое обоснование наличия кавитации в зоне шлифования с СОЖ.

Все предыдущие исследования по оценке наличия кавитационных эффектов в зоне шлифования строились на основе либо теоретических предпосылок, либо косвенного увеличения производительности [4, 5] либо повышения качественных характеристик поверхностей обработанных деталей после шлифования [1, 6, 8, 9]. Прямых исследований процесса формирования кавитационных явлений в зоне шлифования не проводилось.

Известно, что экспериментально определить наличие кавитационных явлений можно несколькими способами, которые разделяются на прямые и косвенные. К прямым методам можно отнести:

- а) наблюдение и фиксация кавитационных пузырьков;
- б) акустический способ (измерение давления в ударной волне, излучаемой одним или совокупностью кавитационных пузырьков при пульсациях и схлопывании).

Косвенные методы могут включать в себя:

- в) регистрация сонолюминесценции в жидкости под влиянием кавитации;
- г) измерение изменений концентраций химических веществ в жидкости, происходящих из-за наличие в ней кавитации;
- д) измерение изменений гидродинамических параметров потока жидкости, значения которых связаны с интенсивностью кавитации;
- е) измерение величины кавитационной эрозии, которая возникает на контрольных образцах;

Прямые способы для анализа данного процесса, происходящего в зоне шлифования, реализовать достаточно сложно. Наибольший интерес вызывает косвенный метод, основанный на анализе возникающей кавитационной эрозии металла. Этот способ требует кропотливой работы по подготовке эксперимента и тщательного анализа обработанной поверхности материала, но технически возможен для реализации.

В работе [10] было проведено исследование влияния материалов поверхностей подводных крыльев судов на кавитационное обтекание. В частности было установлено, что при применении алюминиевых сплавов в качестве материала подводных крыльев, их кавитационная эрозия возникает очень быстро. Поэтому в качестве материала, который выступил индикатором выявления кавитационных процессов, происходящих в СОЖ при шлифовании был выбран алюминиевый сплав.

После проведения ряда тестовых экспериментов была выбрана следующая схема проведения эксперимента, приведенная на рис. 1.

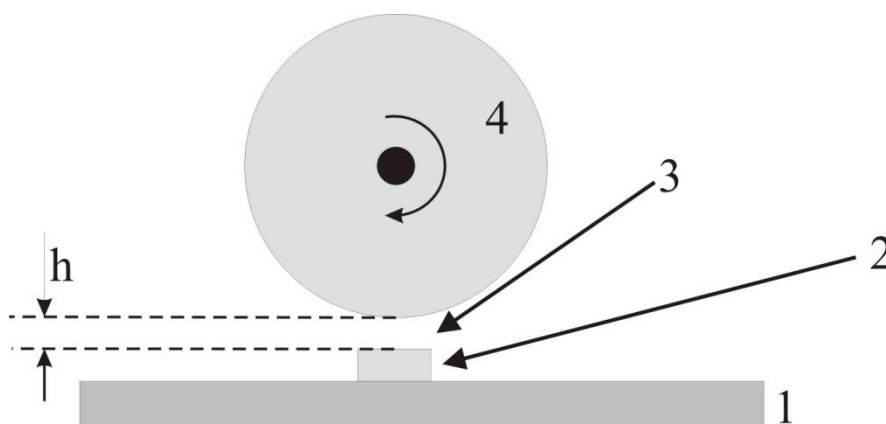


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

- 1 – стол шлифовального станка; 2 – испытуемый образец;
3 – направление подачи СОЖ; 4 – шлифовальный круг

В качестве испытуемого образца выступал брусок из алюминиевого сплава Д16Т полированного с рабочей стороны, обращенной к шлифовальному кругу.

В качестве шлифовального круга 4 использовался абразивный круг 1 250 32 76 25А 40К 6 V 50, производства ОАО «Лужский абразивный завод» (ГОСТ 52588-2012), который перед обработкой плоско-профилировался алмазным карандашом. Частота вращения круга – 3850 об/мин. СОЖ изготовлена на основе концентрата СОЖ ТЭХМОЛ Экстра, производства ООО «Техгрант» ТУ 2422-003-13092819-2002 изм. 1,2 в виде 2-х % водного раствора. Смазочно-охлаждающая жидкость перед подачей в зону шлифования подвергалась тонкой очистке на тканевом фильтре серии ДЕТЕКС 200. Эксперименты проводились на шлифовальном станке 3Л741В(А)Ф2.

На рис. 2 приведена фотография, сделанная во время проведения эксперимента.

Порядок проведения эксперимента:

1. Проведена фотосъемка отполированной рабочей поверхности испытуемого образца (образца) с использованием микроскопа с увеличением $\times 200$ в отраженном свете.
2. Проведен прогрев подшипников шпинделя станка.
3. После установки образца 2 на стол 1 шлифовального станка между ним и шлифовальным кругом с помощью металлического щупа установлен зазор $h = 50$ мкм.



Рис. 2. Фотография эксперимента

4. После извлечения шупа, с помощью органов управления станка установлен зазор $h = 20$ мкм.

5. Включена подача СОЖ, включено вращение шпинделя станка. Время проведения эксперимента – 20 мин. Эксперимент повторен несколько раз на разных местах образца.

6. Образец отмыт сначала в проточной воде, а затем в водяной ванне в ультразвуковом поле.

7. Проведена съемка отполированной рабочей поверхности образца с использованием микроскопа с увеличением $\times 200$ в отраженном свете.

На рис. 3 приведены типичные виды поверхности образца до проведения эксперимента.

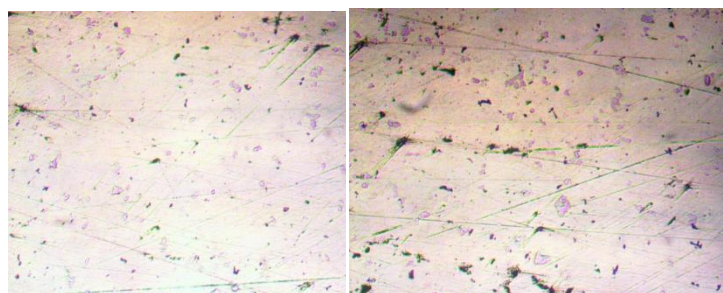


Рис. 3. Виды поверхности образца до проведения эксперимента

На рис. 4 приведены типичные виды поверхности образца после проведения эксперимента.

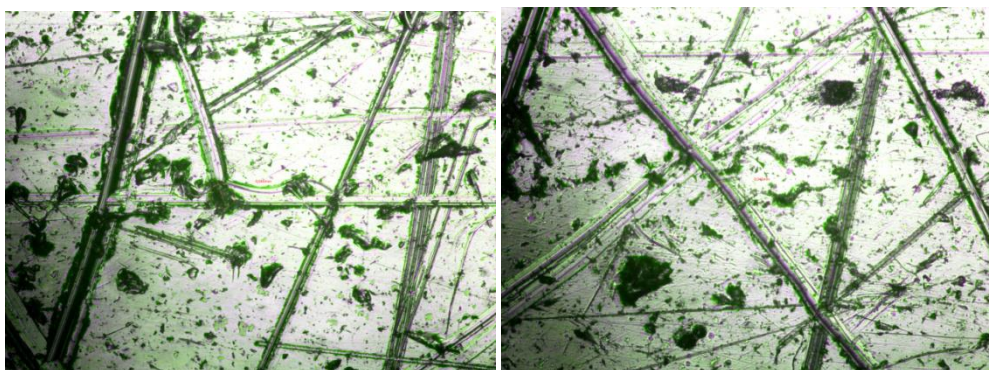


Рис. 4. Виды поверхности образца после проведения эксперимента

Глубокие поперечные царапины на образце (рис. 4) – это царапины, нанесенные щупом при установке рабочего зазора. Черные крупные пятна – это каверны на поверхности образца, появившиеся в результате воздействия кавитации. Средний их диаметр составляет около 3 мкм.

Основываясь на результатах экспериментов можно сделать вывод о том, что при проведении шлифования абразивными кругами в СОЖ возбуждается кавитация, влияющая на качество поверхности обрабатываемого материала.

Список литературы

1. Ящерицын П. И., Зайцев А. Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск : Наука и техника, 1972. 480 с.
2. Shen Bin, Malshe Ajay P., Kalita Parash, Shih Albert J. Performance of novel MoS nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding // Transactions of NAMRI/SME. 2008. Vol. 36. P. 357–364.
3. Yang Min, Changhe Li, Zhang Y. B., Wenfeng Ding. Thermodynamic Mechanism of Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Cooling Grinding and Temperature Field Models // Microfluidics and Nanofluidics. 2018.
4. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 14, № 4. С. 861–869.
5. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2003. 186 с.
6. Бутенко В. И., Фоменко Е. С., Кулинский А. Д. Технологические средства, устройства и конструкции инструментов для бездефектного шлифования деталей машин // Металлообработка. 2008. № 3 (45). С. 2–8.

7. Артёмов И. И., Нестеров С. А., Кочкин С. В., Акимов Д. А. Повышение качества поверхностей деталей при шлифовании за счет кавитационного эффекта // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 237–246.

8. Artemov, I. I., Krevchik V. D., Kochkin S. V. [et al.]. Measurement and quality control of a nanomodified surface layer of machine parts // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies". 2020. P. 184–187. doi: 10.1109/ITQMIS51053.2020.9322802

9. Artemov I. I., Krevchik V. D., Nesterov S. A. [et al.] Features of the Grinding Technology with the Use of Nanomodified Coolant // Materials Research Proceedings (Temryuk, 6–10 of September 2021). Temryuk, 2022. P. 443–449. doi: 10.21741/9781644901755-73

10. Хао Дж., Чжан М., Хуан Х. Экспериментальное исследование влияния кавитации на поверхность подводных крыльев судов, выполненных из разных материалов // Механик. 2019. Vol. 326 № 45. doi: 10.1186/s10033-019-0355-5

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иосифович Артёмов

доктор технических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: artemov@edu.ru

Igor I. Artemov

Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of research institute of fundamental
and applied study, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Александрович Нестеров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nesterserg@ya.ru

Sergei A. Nesterov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor, of the department of the
technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сергей Вячеславович Кочкин

кандидат технических наук,
заведующий испытательной
лабораторией Научно-
исследовательского института
фундаментальных и прикладных
исследований, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: ksvp@rambler.ru

Sergey V. Kochkin

Candidate of technical sciences,
head of the testing laboratory
of research institute of fundamental
and applied study, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Наталья Владимировна Сорокина
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: nvsor@mail.ru

Natalia V. Sorokina
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of the
technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Дмитрий Александрович Акимов
соискатель, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: tmshpu@mail.ru

Dmitry A. Akimov
Applicant, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ГРАНУЛ С ОБРАБАТЫВАЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
ДЕТАЛИ В СИСТЕМЕ «ROCKY DEM»
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ANSYS»**

**Евгений Валерьевич Зотов¹,
Александр Сергеевич Кузнецов²,
Владислав Игоревич Рожков³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Представлен подход к численному моделированию процесса контактного соударения абразивных гранул с обрабатываемыми поверхностями детали в контейнерах с планетарным вращением. Моделирование выполнено с использованием метода дискретных элементов в программной среде Rocky DEM комплекса ANSYS. Рассмотрено влияние частоты вращения контейнера на интенсивность контактных взаимодействий гранул с поверхностью детали. В качестве количественного критерия оценки интенсивности обработки использовано число контактных соударений за единицу времени. По результатам численного эксперимента установлено наличие оптимального диапазона частот вращения, при котором достигается максимальная плотность контактов. Показано, что дальнейшее увеличение частоты вращения приводит к снижению интенсивности контактов вследствие формирования застойных зон рабочей загрузки. Полученные результаты могут быть использованы при назначении технологических режимов в процессе отделочно-зачистной обработки широкой номенклатуры деталей на центробежно-планетарных станках.

Ключевые слова: моделирование, центробежно-планетарная обработка, абразивные гранулы, контактные соударения, метод дискретных элементов, ANSYS Rocky DEM

MODELING OF CONTACT INTERACTION BETWEEN GRANULES AND MACHINED PART SURFACES USING THE ANSYS ROCKY DEM SYSTEM

Evgeny V. Zotov¹, Alexander S. Kuznetsov²,
Vladislav I. Rozhkov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. The paper presents an approach to numerical modeling of the contact interaction between abrasive granules and machined part surfaces in containers with planetary motion. The modeling is performed using the discrete element method implemented in the ANSYS Rocky DEM software. The influence of the container rotational speed on the intensity of contact interactions between the granules and the part surface is investigated. The number of contact collisions per unit time is used as a quantitative criterion for evaluating the processing intensity. The results of the numerical experiment reveal the existence of an optimal range of rotational speeds at which the maximum contact density is achieved. It is shown that a further increase in the rotational speed leads to a decrease in contact intensity due to the formation of stagnant zones within the granules. The obtained results can be used for selecting technological parameters in finishing and deburring processes for a wide range of parts processed on centrifugal–planetary machines.

Keywords: modeling, centrifugal planetary processing, abrasive granules, contact collisions, discrete element method, ANSYS Rocky DEM

Центробежно-планетарная обработка (ЦПО) широко применяется для финишной обработки деталей машиностроения, обеспечивая снижение шероховатости поверхности, упрочнение поверхностного слоя и удаление заусенцев [1]. Эффективность данного вида обработки в значительной степени определяется интенсивностью контактного взаимодействия абразивных гранул или стальных шаров (при отделочно-упрочняющей обработке) с поверхностью обрабатываемой детали, которая, в свою очередь, зависит от конструктивных и кинематических параметров технологической системы.

В практике технологической подготовки производства подбор режимов центробежно-планетарной обработки, как правило, осуществляется на основе эмпирических данных и экспериментальных зависимостей, полученных для конкретных условий. При этом традиционные расчетные подходы [2] и специализированные программные средства, разработанные ранее, часто не полностью учитывают сложный характер движения гранулированной рабочей среды (ГРС) и контактных взаимодействий, а также не позволяют в достаточной мере анализировать пространственное распределение контактов.

Современные численные методы, в частности метод дискретных элементов (DEM), позволяют моделировать движение и взаимодей-

ствие отдельных частиц гранулированной рабочей среды в процессе обработки. Что, в свою очередь, открывает новые возможности для анализа процессов отделочно-зачистной абразивной обработки. А использование специализированных программных комплексов на основе DEM дает возможность исследовать влияние технологических параметров на интенсивность контактных соударений и выявлять закономерности, недоступные при традиционном эксперименте.

Целью настоящей работы является численное исследование процесса контактного соударения абразивных гранул с обрабатываемыми поверхностями детали в условиях центробежно-планетарной обработки с использованием программной среды ANSYS Rocky DEM.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- построение численной модели процесса взаимодействия абразивных гранул с деталью в контейнере при ЦПО в ANSYS Rocky DEM;
- задание и варьирование кинематических параметров процесса, в частности частоты вращения контейнера;
- анализ интенсивности контактных соударений гранул с поверхностью детали;
- определение диапазона технологических параметров, обеспечивающего максимальную интенсивность обработки в пределах выбранного диапазона технологических факторов.

Для исследования процесса контактного взаимодействия абразивных гранул с обрабатываемой деталью в условиях центробежно-планетарной обработки применен метод дискретных элементов (DEM), реализованный в программной среде ANSYS Rocky DEM.

При этом, численная модель включает следующие основные элементы: контейнер с планетарным вращением, обрабатываемую деталь и абразивные гранулы. Геометрические модели контейнера и детали разработаны в CAD-программе «КОМПАС-3D» и импортированы в расчетную среду в формате STL. В качестве формы абразивных гранул использована призматическая модель, соответствующая геометрии реальных абразивных тел, применяемых в процессах центробежно-планетарной обработки.

Геометрические параметры контейнера, его движения в составе центробежно-планетарной установки, а также детали и гранул заданы на основе известных справочных и экспериментальных данных [1].

Для исследования моделировались образцы (рис. 1), изготовленные из алюминиевого сплава 6060 в виде полых цилиндров.

Для исследования производительности ЦПО в качестве ГРС использовались абразивные гранулы в виде призмы (аналог гранул фирмы Rosler). В программе «Ansys Rocky» в качестве ГРС используется модель абразивных гранул призматической формы (рис. 2).

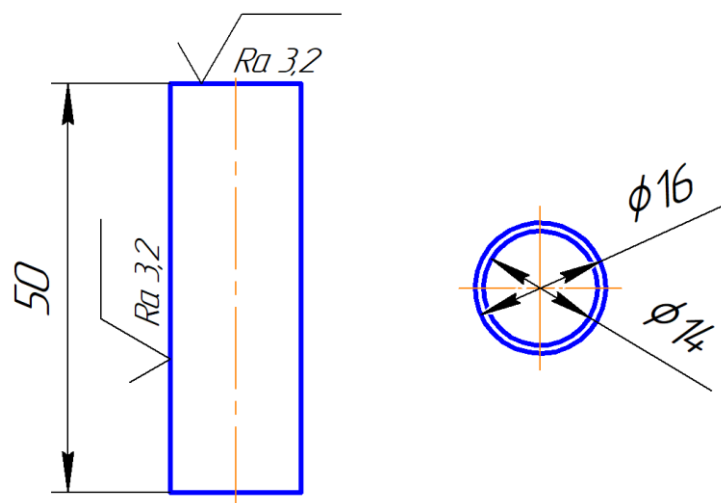


Рис. 1. Чертеж образца для исследований

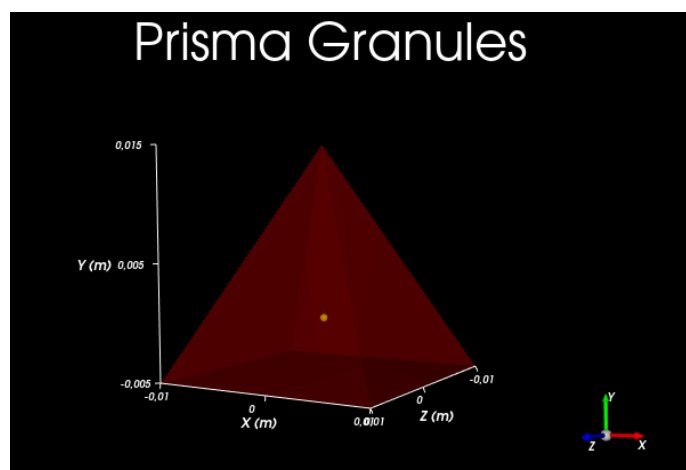
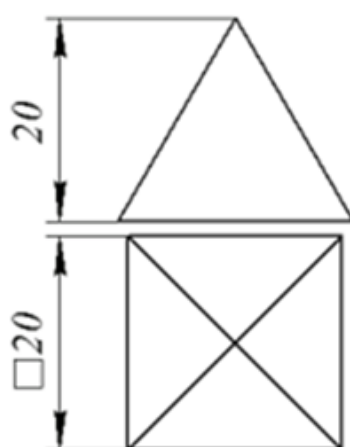


Рис. 2. Размеры и 3D-модель гранулы, мм

Кинематика процесса [2] моделировалась путем задания вращательного движения контейнера (рис. 3) и образца детали, что соответствует характеру движения рабочих тел в центробежно-планетарных установках. В рамках численного эксперимента варьировалась частота вращения в диапазоне от 100 до 240 мин⁻¹, что позволяет оценить влияние кинематических параметров на интенсивность контактных взаимодействий.

В качестве основного количественного показателя интенсивности процесса обработки принято число контактных соударений абразивных гранул с поверхностью детали за единицу времени. Дополнительно анализировались параметры нормальной и тангенциальной составляющих скорости соударения, а также распределение контактов по поверхности детали.

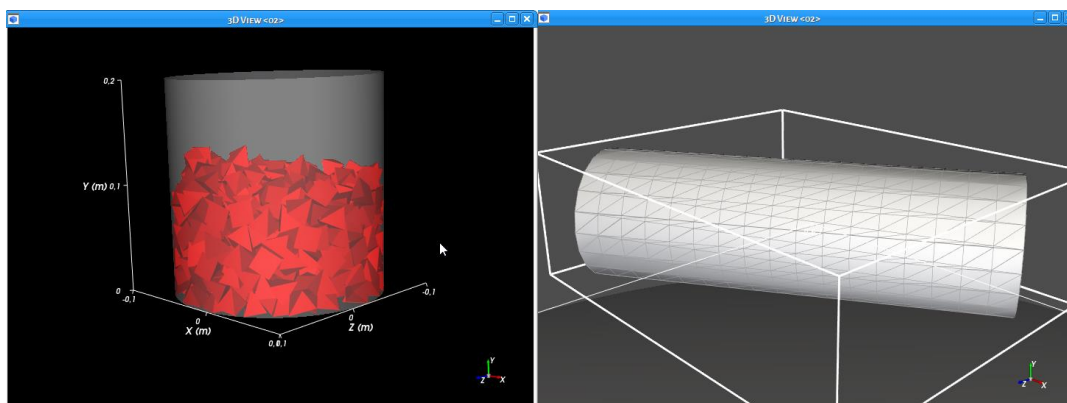


Рис. 3. 3D-модели геометрии контейнера с гранулами и детали (для детали была создана сетка для более качественного отображения действующих сил после расчета симуляции)

Расчет выполнялся в нестационарной постановке. Длительность моделирования на этапе численного эксперимента составляла 1 секунду, что позволило зафиксировать установившийся характер движения ГРС и оценить динамику изменения числа контактов в процессе обработки. Сбор статистических данных о контактах осуществлялся с использованием встроенных модулей анализа контактных взаимодействий в программе Rocky DEM.

Принятая методика численного эксперимента позволяет выявить закономерности изменения интенсивности контактных соударений в зависимости от частоты вращения и определить рациональные режимы центробежно-планетарной обработки.

В результате численного моделирования процесса движения контейнера получены данные о характере контактного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью обрабатываемой детали при различных значениях частоты вращения контейнера.

Анализ динамики числа контактных соударений показал, что интенсивность взаимодействия ГРС с поверхностью детали существенно зависит от кинематических параметров процесса. При частоте вращения 100 об/мин максимальное число контактов наблюдается в интервале времени от 0,4 до 0,6 с и составляет 1786 соударений. При увеличении частоты вращения до 170 об/мин максимальное значение числа контактов возрастает до 1880 соударений в интервале времени от 0,6 до 0,8 с. Дальнейшее увеличение частоты вращения до 240 об/мин приводит к снижению максимального числа контактов до 1782 (рис. 4).

Таким образом, по результатам численного эксперимента установлено наличие зависимости интенсивности контактных соударений от частоты вращения контейнера. Максимальная плотность контактов абразивных гранул с поверхностью детали достигается при частоте вращения 170 об/мин.

Property	Value	Property	Value	Property	Value
General		General		General	
Type	Unstructured	Type	Unstructured	Type	Unstructured
Topology		Topology		Topology	
Dimension	0D	Dimension	0D	Dimension	0D
Number of Cells	1786	Number of Cells	1880	Number of Cells	1782
Number of Vertices	1786	Number of Vertices	1880	Number of Vertices	1782
Cells		Cells		Cells	
Point	1786	Point	1880	Point	1782

Рис. 4. Окно с информацией о контактах в программе Rocky DEM

Снижение интенсивности контактных взаимодействий при дальнейшем увеличении частоты вращения объясняется изменением характера движения ГРС. При высоких частотах вращения наблюдается формирование зон разрежения (пустот) или застойных зон в объеме контейнера, что приводит к уменьшению количества гранул, непосредственно взаимодействующих с поверхностью детали. Данный эффект подтверждается визуальным анализом трехмерной картины распределения гранул в объеме контейнера (рис. 5).

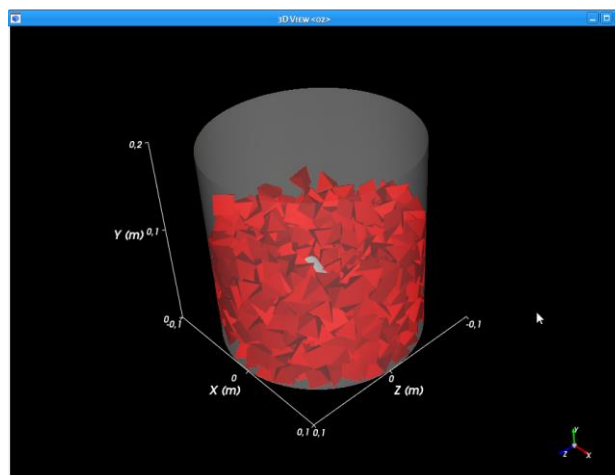


Рис. 5. Вид образования застойной зоны в объеме контейнера

Дополнительный анализ временных зависимостей числа контактов (рис. 6) показал, что после кратковременного переходного процесса система выходит на квазистационарный режим, что позволяет использовать максимальные значения числа контактов в качестве информативного показателя интенсивности обработки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение частоты вращения сверх определенного значения не приводит к росту эффективности обработки, а напротив, может вызывать ее снижение.

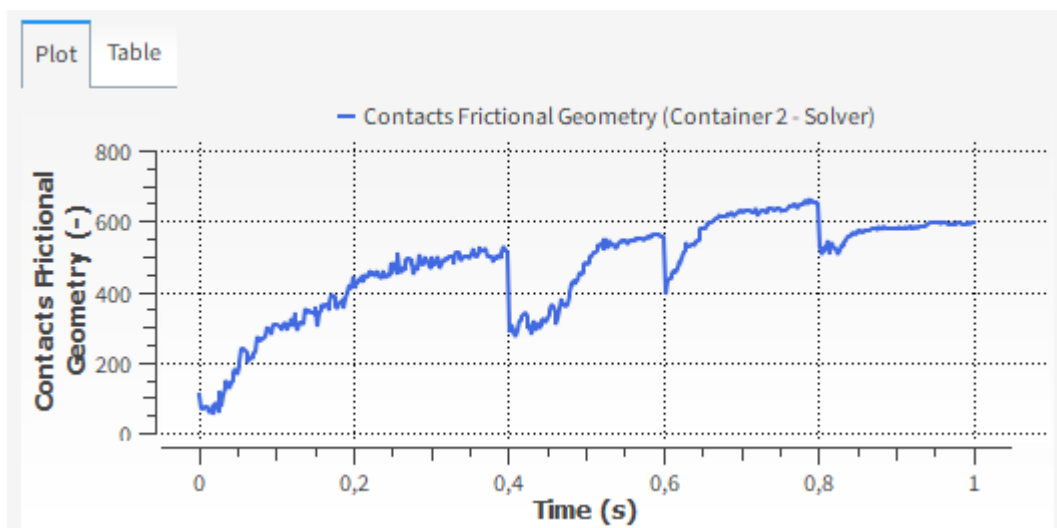


Рис. 6. Зависимость количества контактных соударений с обрабатываемой поверхностью деталей в процессе обработки

Следовательно, применение численного моделирования методом дискретных элементов позволяет не только визуализировать процесс центробежно-планетарной обработки, но и количественно оценить влияние технологических параметров на интенсивность контактного взаимодействия абразивных гранул с деталью.

Выводы:

С использованием метода дискретных элементов в программной среде ANSYS Rocky DEM разработана численная модель процесса контактного взаимодействия абразивных гранул с обрабатываемыми поверхностями детали в условиях центробежно-планетарной обработки.

Установлено, что интенсивность контактных соударений абразивных гранул с поверхностью детали существенно зависит от частоты вращения контейнера и носит экстремальный характер.

Показано, что при увеличении частоты вращения до 170 об/мин достигается максимальное число контактных соударений, что соответствует наибольшей интенсивности обработки (при принятой кинематической схеме движения контейнеров и диаметре контейнера, равным 200 мм).

Выявлено, что дальнейшее увеличение частоты вращения контейнера приводит к снижению интенсивности контактов вследствие формирования застойных зон в объеме контейнере.

Полученные результаты подтверждают возможность применения численного моделирования для обоснованного выбора рациональных режимов центробежно-планетарной обработки и могут быть использованы при технологической подготовке производства.

Список литературы

1. Зверовщиков В. З., Нестеров С. А., Зверовщиков А. В. [и др.]. Технологическое обеспечение центробежной отделочно-упрочняющей и зачистной обработки поверхностей деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2 (62). С. 117–133. doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-10 EDN: TDHVXG

2. Зверовщиков В. З., Зотов Е. В. Новый способ объемной центробежно-планетарной обработки деталей // Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 2 (8). С. 209–213. EDN: KWWREJ

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Валерьевич Зотов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: zotovpgu@gmail.com

Evgeny V. Zotov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department
of technologies and equipment of
mechanical engineering, Penza State
University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Сергеевич Кузнецов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: quemlinka@mail.ru

Alexander S. Kuznetsov

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Владислав Игоревич Рожков

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: rozhkov.w0rk@yandex.ru

Vladislav I. Rozhkov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛУЖИВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И РЕМОНТ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТАНКОВ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ»

УДК 62-50

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ КИНЕМАТИКОЙ

**Борис Максович Бржозовский¹,
Марина Борисовна Бровкова²,
Глеб Сергеевич Филиппов³**

^{1,2,3}Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН,
Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются подходы искусственного интеллекта, применяемые для мониторинга сложных станков. Описаны методы машинного обучения для классификации и прогнозирования состояний, возможности глубокого обучения при работе с временными рядами и изображениями, а также гибридные модели, сочетающие физико-математическое моделирование с алгоритмами искусственного интеллекта. Уделено внимание обучению с подкреплением, позволяющему реализовать адаптивное управление в реальном времени, и распределённым вычислительным технологиям, включая федеративное и периферийное обучение, которые обеспечивают низкую задержку и конфиденциальность данных.

Ключевые слова: искусственный интеллект, сложные станочные системы, переменная кинематика, мониторинг, машинное и глубокое обучение

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MONITORING COMPLEX MACHINE TOOL S YSTEMS WITH VARIABLE KINEMATICS

Boris M. Brzhozovskii¹, Marina B. Brovkova², Gleb S. Filippov³

^{1,2,3}Mechanical Engineering Research Institute of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This study examines artificial intelligence (AI) approaches applied to the monitoring of complex machine tool systems. It outlines machine learning methods for state

classification and prediction, highlights the potential of deep learning for processing time series and image data, and discusses hybrid models that integrate physical–mathematical modeling with AI algorithms. Special attention is given to reinforcement learning, which enables adaptive real-time control, as well as to distributed computing technologies, including federated and edge learning, which provide low latency and ensure data privacy. **Keywords:** artificial intelligence, complex machine tool systems, variable kinematics, monitoring, machine and deep learning

Введение

Современное развитие машиностроения и станкостроения определяется тенденциями перехода к высокоавтоматизированному и интеллектуальному производству. Ключевую роль в этих процессах играет обеспечение надежности, точности и адаптивности металлорежущего оборудования, включая станки с изменяемой кинематикой, многоосевые обрабатывающие центры и гибридные роботизированные комплексы. Отличительной особенностью данного класса оборудования является сложность кинематической структуры, наличие нелинейных динамических взаимодействий и высокая вариативность режимов функционирования. Эти факторы существенно осложняют задачи диагностики и мониторинга, требующие комплексного анализа состояния оборудования и технологического процесса в реальном времени.

Главная трудность динамического мониторинга многоцелевых станков с переменной кинематикой заключается в резкой смене физических характеристик процесса резания (сигналы, силы, кинематика) при переходе между операциями. При смене операции меняется принцип движения: при фрезеровании – вращается инструмент, перемещается стол/деталь; при токарной обработке – вращается деталь, инструмент чаще неподвижен или движется по другим осям. Сенсоры, настроенные на один тип кинематики, могут давать некорректные данные при другой схеме движения. Вибрации и силы резания при фрезеровании носят периодический, импульсный характер (зубья фрезы). При токарной обработке – сигнал более стационарный, с низкочастотными компонентами. Нужны разные алгоритмы фильтрации и анализа сигналов, чтобы не было ложных срабатываний. Возникает проблема универсальности датчиков. Из-за смены режимов резания резко меняются силы, температура, нагрузка на шпиндель. Система мониторинга должна быстро перестраиваться на новые диапазоны измерений. Возможны ошибки распознавания перегрузки или износа инструмента. Таким образом, динамический мониторинг многоцелевых станков – это не просто «сбор данных», а интеллектуальная система,

которая умеет переключать модели анализа под текущий технологический процесс, обеспечивая надёжный контроль при многооперационной обработке.

Применение искусственного интеллекта к мониторингу сложных станочных систем

Современные подходы к мониторингу сложных станков с изменяемой кинематикой основаны на применении методов искусственного интеллекта, которые обеспечивают возможность анализа больших потоков многоканальных данных и выявления скрытых закономерностей в поведении технологической системы. Основное внимание уделяется машинному обучению, позволяющему классифицировать состояния оборудования, диагностировать неисправности и прогнозировать остаточный ресурс инструмента. При этом используются как алгоритмы традиционного машинного обучения, основанные на построении моделей регрессии и классификации, так и более сложные методы ансамблевого анализа, повышающие устойчивость и достоверность получаемых результатов.

Значительный прогресс достигнут в применении методов глубокого обучения. Сверточные нейронные сети продемонстрировали высокую эффективность при анализе изображений рабочих поверхностей инструмента и диагностике дефектов на заготовках, тогда как рекуррентные архитектуры, такие как LSTM и GRU, позволяют обрабатывать временные ряды вибрационных и акустических сигналов, выявлять долговременные зависимости и предсказывать развитие деградиационных процессов. Важным направлением является формирование гибридных моделей, в которых математическое описание динамики технологического оборудования сочетается с методами искусственного интеллекта. Такой синтез позволяет учитывать физическую природу процессов и одновременно использовать преимущества статистического анализа больших массивов данных.

Особое место занимает обучение с подкреплением, ориентированное на выработку оптимальных стратегий управления в условиях изменяющихся производственных параметров. В рамках мониторинга это направление открывает возможности для создания систем, способных адаптивно изменять режимы резания и корректировать параметры обработки в реальном времени. Дополнительное развитие получают технологии распределённого обучения, включая федеративные и периферийные вычисления, что обеспечивает обработку данных непосредственно на уровне оборудования и позволяет сократить задержки при принятии решений.

Сравнительный анализ подходов ИИ к мониторингу станков

Метод ИИ	Применение	Преимущества	Недостатки
Классическое МО (SVM, RF, GBDT, kNN) [1]–[2]	Диагностика состояний по признакам из вибраций/токов/АЭ; оценка износа инструмента и класса дефектов	Небольшие требования к данным; высокая скорость; интерпретируемость	Зависимость от качества признаков; чувствительность к дрейфу данных
Глубокое обучение (CNN, LSTM/GRU, трансформеры) [3]–[5]	Прямая работа с временными рядами и изображениями (акустика/вибрации, карты CWT/STFT, снимки кромки)	Автоматическое извлечение признаков; высокая точность; устойчивость к шумам	Требует больших данных и ресурсов; риск переобучения; переносимость ограничена
Гибридные/физически-информированные модели (PIML) [6]–[7]	Ситуации с ограниченными данными, но богатой физикой процесса; интеграция с цифровым двойником	Лучшее обобщение; интерпретируемость; меньше данных	Сложность интеграции; настройка потерь; вычислительные издержки
Обучение с подкреплением (RL/DRL) [8]	Адаптивная настройка режимов резания и траекторий; оптимизация управления при переменной кинематике	Оптимизация последовательных решений; потенциал самообучения	Необходима безопасная симуляция; высокая сложность обучения; вопросы стабильности
Распределённое/федеративное и Edge-обучение [9–10]	Онлайновая диагностика на станке; конфиденциальность данных; масштабирование на парк станков	Низкая латентность; приватность; масштабируемость	Гетерогенность устройств; вопросы безопасности; сложный MLOps

Таким образом, подходы искусственного интеллекта к мониторингу станков характеризуются многоуровневостью и комплексностью. Их применение обеспечивает повышение точности диагностики, ускорение процесса принятия решений и переход от реактивных к предиктивным стратегиям обслуживания, что является ключевым условием развития интеллектуальных производственных систем нового поколения.

Список литературы

1. Surucu Onur, Gadsden Stephen Andrew, Yawney John. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 221. P. 119738.

2. Kuntoğlu M., Aslan A., Pimenov D. Y. [et al.]. Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 1. P. 108.
3. Zhang Y., Qi X., Wang T., He Y. Tool Wear Condition Monitoring Method Based on Deep Learning with Force Signals // *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 10. P. 4595.
4. Николенко С., Кадури́н А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб. : Питер, 2018. 480 с
5. Guo Hao, Zhang Yu, Zhu Kunpeng. Interpretable deep learning approach for tool wear monitoring in high-speed milling // *Computers in Industry*. 2022. Vol. 138. P. 103638.
6. Wu Yuandi, Sicard Brett, Gadsden Stephen Andrew. Physics-informed machine learning: A comprehensive review on applications in anomaly detection and condition monitoring // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255, Part C. P. 124678.
7. Du Y., Mukherjee T., DebRoy T. Physics-informed machine learning and mechanistic modeling of additive manufacturing to reduce defects // *Applied Materials Today*. 2021. Vol. 24. P. 101123.
8. Faria R., Capron B., Secchi A., de Souza M. Where Reinforcement Learning Meets Process Control: Review and Guidelines // *Processes*. 2022. Vol. 10, № 11. P. 2311.
9. Nguyen Truong, Kai Sun, Siyao Wang [et. al.]. Privacy preservation in federated learning: An insightful survey from the GDPR perspective // *Computers & Security*. 2021. Vol. 110. P. 102402.
10. Singh Raghubir, Gill Sukhpal Singh, AI Edge. A survey // *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 3. P. 71–92.

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Максович Бржозовский

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: bmbsar85@mail.ru

Boris M. Brzhozovskii

Doctor of technical sciences, professor,
chief researcher, Mechanical
Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences
(4 Maly Kharitonyevsky lane, Moscow,
Russia)

Марина Борисовна Бровкова

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: bmbsar@mail.ru

Marina B. Brovkova

Doctor of technical sciences, professor,
chief researcher, Mechanical
Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences
(4 Maly Kharitonyevsky lane, Moscow,
Russia)

Глеб Сергеевич Филиппов

доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по науке,
Институт машиноведения
имени А. А. Благонравова РАН
(Россия, г. Москва, Малый
Харитоньевский пер., 4)
e-mail: filippov.gleb@gmail.com

Gleb S. Filippov

Doctor of technical sciences, professor,
deputy director for research,
Mechanical Engineering Research
Institute of the Russian Academy of
Sciences (4 Maly Kharitonyevsky lane,
Moscow, Russia)

УДК 621.9

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГРАФОВ

Петр Юрьевич Бочкарев

Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета,
Камышин, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке методических принципов формирования унифицированного подхода к информационному обеспечению технологической подготовки механообрабатывающих производств в условиях динамичной среды многономенклатурного производства. Создана система классификации и группирования информации, предназначенная для универсальных методов сбора и обработки данных о технологических возможностях оборудования. Предложенный подход обеспечивает интеграцию современных методов анализа данных, что позволяет точно отображать объекты технологической системы с использованием аппарата теории графов. Структурирование базы данных позволяет в условиях реального времени выполнять все этапы технологической подготовки и выработать обоснованные предложения по разработке нормативно-методических материалов. Предложенный подход способствует повышению эффективности и гибкости технологических процессов в условиях многономенклатурного производства, спроектированных с учетом реального состояния станочного оборудования.

Ключевые слова: машиностроительные производства, станочное оборудование, технологическая подготовка производства, информационное обеспечение

DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE MACHINING EQUIPMENT THE GRAPH METHOD

Peter Y. Bochkarev

Kamyshin Technological Institute (branch) of the Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

Abstract. The results of research on the development of methodological principles for the formation of a unified approach to information support for technological training of machining industries in a dynamic environment of multi-nomenclature production are presented. A system of classification and grouping of information has been created, designed for universal methods of collecting and processing data on the technological capabilities of equipment. The proposed approach ensures the integration of modern data analysis methods, which makes it possible to accurately display the objects of the technological system using the graph theory apparatus. Structuring the database allows you to perform all stages of technological preparation in real time and develop sound proposals for the development of regulatory and methodological materials. The proposed approach helps to increase the efficiency and flexibility of technological processes in a multi-range production environment, designed taking into account the actual condition of machine tools.

Keywords: machine-building industries, machine tools, technological preparation of production, information support

Формирование технологических маршрутов (ТП) при механической обработке сопряжено со значительными методологическими трудностями в организации машиностроительного производства. Эффективность спроектированных ТП непосредственным образом детерминирует общую производительность и рентабельность производственного цикла [1]. Критически важным аспектом обеспечения конкурентоспособности предприятия выступает рационализация эксплуатации временных и материальных ресурсов, что напрямую коррелирует со снижением себестоимости выпускаемой продукции. В условиях высокодинамичной производственной среды, для которой свойственны неопределенность и вариабельность управляющих параметров, достижение указанных целей невозможно без создания адаптивных систем САПР. Подобные системы должны обладать функциональной возможностью бесшовной интеграции в действующие производственные условия, обеспечивая тем самым гибкость технологических операций [2, 3].

Выработка аргументированных проектных решений на всех этапах конструирования ТП детерминирует необходимость детального анализа обширных массивов нормативно-справочных данных. Парал-

тельно требуется учет информации о производственном потенциале, актуальном техническом состоянии оборудования и оснастки, а также о специфике операционной деятельности конкретной производственной системы.

Достижение максимальной производительности механообрабатывающих комплексов и обеспечение гарантированного выпуска продукции, соответствующей регламентированным техническим условиям, обуславливают использование достоверных и актуальных данных о состоянии технологического оборудования. Глубокий анализ систем оперативного мониторинга и технической диагностики оборудования с процессами технологической подготовки производства (ТПП) трансформируется в краеугольный элемент корпоративной стратегии управления качеством [4].

В рамках проведенного исследования разработаны методологические основания для унификации информационной поддержки ТПП в механообрабатывающих производствах. Данные основания базируются на комплексном анализе задач, связанных с взаимовлиянием геометрических и технологических параметров обрабатываемых деталей и конструктивных особенностей применяемого оборудования и оснащения. Произведена формализация информационного поля, описывающего конструкторско-технологические атрибуты изделий, а также технологические ограничения и возможности станочного парка и оснастки. Кроме того, идентифицированы и систематизированы взаимосвязи между информационными объектами в процессе принятия проектных решений [5]. Сформированная в результате структурированная информационно-логическая база открывает возможность для сквозной автоматизации всех этапов ТПП и создает фундамент для систематизации процессов применения нормативно-методических материалов.

Предлагаемый в работе методологический подход к организации данных о конструкторско-технологических характеристиках деталей в ТПП отличается дополнительной информацией, которая зачастую не находит явного отражения в составе конструкторской документации. Стратегической целью при этом является создание целостной системы управления данными, обеспечивающей эффективную обработку и структурирование информации на всех стадиях жизненного цикла ТП в условиях диверсифицированного, многономенклатурного производства. Построение реляционной базы данных по обрабатываемым деталям реализовано с привлечением аппарата теории графов, что позволяет задействовать обоснованный математический инструментарий и современные программные среды для конструирования формализованных моделей.

Выполнена детализированная параметризация моделей металло-режущего оборудования и технологической оснастки, нацеленная на установление соответствия между производственным потенциалом оборудования и характеристиками деталей и заготовок. Разработана архитектурная схема, обеспечивающая исчерпывающую полноту информационного сопровождения на этапе планирования многономенклатурных ТП [6]. Внедренные информационные зависимости предусматривают проведение многокритериального анализа, включающего оценку влияния избранного технологического метода на: эксплуатационно-качественные характеристики формируемых поверхностей; предельные размеры и параметры базовых поверхностей детали; пространственные границы рабочей зоны обработки с учетом геометрии поверхностей как самой детали, так и технологической оснастки.

Апробированные графовые модели деталей, оборудования и оснастки верифицируют практическую возможность развертывания специализированной базы данных для планирования многономенклатурных процессов, адаптированной под уникальные условия конкретного производства.

В процессе проектирования созданной системы информационной поддержки была успешно решена задача унификации форматов данных и обеспечения их однотипности с существующими корпоративными информационными системами. Полученные результаты создают расширенную методологическую платформу для углубленного анализа установочных, операционных и межоперационных связей в рамках разрабатываемых технологических процессов, что интенсифицирует автоматизацию проектно-технологической деятельности. Применяемый подход обеспечивает оперативный учет текущего состояния производственного потенциала механообрабатывающего предприятия и способствует эффективному решению задач, ассоциированных с функционированием наукоемких машиностроительных комплексов.

Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Базров Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства : монография. М. : КУРС, 2023. 324 с.
3. Ингеманссон А. Р. Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1. С. 15–18.

4. Бочкарев П. Ю. Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 9. С. 25–32.

5. Бочкарев П. Ю., Решетникова Е. П. Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 12. С. 30–36.

6. Бочкарев П. Ю. Метод отображения технологических возможностей механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 1. С. 38–48.

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения», Камышинский
технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного
технического университета (Россия,
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)
e-mail: bpy@mail.ru

Petr Y. Bochkarev

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
engineering technology and applied
mechanics, Kamyshin Technological
Institute (branch) of the Volgograd
State Technical University (6A Lenina
street, Kamyshin, Russia)

УДК 621.923

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАЛАДКИ БЕСЦЕНТРОВО- ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

**Петр Юрьевич Бочкарев¹,
Павел Витальевич Малинин²**

^{1,2}Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского
государственного технического университета, Камышин, Россия

Аннотация. Среди наиболее эффективных способов обработки поверхностей, имеющих форму тел вращения, с точки зрения повышения производительности и обеспечения стабильности заданных параметров, можно выделить бесцентровое шлифование. Бесцентровое шлифование, несмотря на свои очевидные преимущества, демонстрирует ограниченную область применения, что обусловлено рядом объективных факторов. Ключевым фактором, ограничивающим использование методов бесцентрового шлифования, является сложность настройки и доводки оборудования, обусловленная отсутствием стандартизированных процедур и формализованных методик. Для оценки качества выполнения процесса настройки оборудования предлагается использовать разработанные зависимости, которые позволяют

анализировать точки соприкосновения обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы. В ходе исследования была подтверждена важность учета силового замыкания как одного из ключевых критериев качества работы. Созданные алгоритмы и программы расширяют научно-методическую основу для разработки системы автоматизированного проектирования процессов, которые выполняются на бесцентрово-шлифовальных станках.

Ключевые слова: механообрабатывающие производства, технологическая подготовка, бесцентровое шлифование, проектные процедуры, наладка оборудования

IMPROVING THE ADJUSTMENT OF CENTERLESS GRINDING MACHINES

Peter Y. Bochkarev¹, Pavel V. Malinin²

^{1,2}Kamyshin Technological Institute (branch) Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

Abstract. From the point of view of increasing productivity and ensuring stability of the set parameters, centerless grinding can be distinguished among the most effective methods of surface treatment having the shape of bodies of rotation. Despite its obvious advantages, centerless grinding demonstrates a limited scope of application due to a number of objective factors. The key factor limiting the use of centerless grinding methods is the complexity of setting up and fine-tuning equipment due to the lack of standardized procedures and formalized techniques. To assess the quality of the equipment configuration process, it is proposed to use the developed dependencies that allow analyzing the points of contact of the treated surface with the elements of the technological system. The study confirmed the importance of taking into account the short circuit as one of the key criteria for the quality of work. The created algorithms and programs expand the scientific and methodological basis for the development of a system for computer-aided design of processes that are performed on centerless grinding machines.

Keywords: machining industries, technological preparation, centerless grinding, design procedures, equipment adjustment

Современные тенденции в области производственных систем направлены на значительное повышение производительности и обеспечение стабильности заданных параметров качества, определённых конструктором. Это зависит от выбора методов обработки поверхностей, составляющих технологический процесс изготовления деталей [1,2]. Среди методов обработки цилиндрических поверхностей особое место занимает бесцентрово-шлифовальная обработка, представляющая собой наиболее перспективный подход в данной области. Этот метод продемонстрировал свою эффективность в определённых отраслях и условиях машиностроительного производства, в частности, в подшипниковой промышленности. Исследование причин, препятствующ-

щих широкому применению бесцентрового шлифования, выявило, что они обусловлены недостаточной научной и методической проработкой вопросов технологической подготовки [3, 4].

Методы бесцентрового шлифования, в отличие от других способов механической обработки, обладают рядом специфических характеристик, среди которых наиболее значимыми являются: силовое замыкание контакта; серьезное влияние геометрии заготовок с предшествующих операций, что значительно усиливает внимание к вопросам технологической наследственности при проектировании технологических процессов; съем материала (припуска), которое одновременно зависит от ряда факторов: траектории движения заготовки; величины скорости продольной подачи; стабильности значений скоростей вращения; значительное влияние стохастических факторов, которые во многом связаны и обусловлены субъективным влиянием исполнителей при наладке и подналадке технологического оборудования [5, 6].

Выведенные зависимости [7–9], позволяющие формализовать назначение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования, учитывающих реальное состояние технологической системы и характеристик обрабатываемой заготовки. Разработанные модели обеспечивают полное соответствие всем необходимым параметрам настройки оборудования для бесцентрового шлифования. Они учитывают особенности конструкции конкретного станка, что делает их использование удобным.

Определены пространственно-размерные параметры, которые, принимая во внимание конструктивные характеристики рассматриваемого оборудования и используемой технологической оснастки, позволяют для каждого поперечного сечения в зоне обработки вычислить: углы наклона прямых, связывающих центр обрабатываемой детали с центрами шлифовального и ведущего кругов; угол между этими прямыми; расстояние между горизонтальными осями шлифовального и ведущего круга в вертикальной плоскости; расстояния в вертикальной плоскости между центром обрабатываемой детали и горизонтальными линиями, проходящими через центры шлифовального и ведущего круга; расстояния в вертикальной плоскости между центром обрабатываемой детали и линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего круга; координаты места контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа.

Полученные зависимости позволяют рассчитать значения координат точек контакта в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Выполнение условия силового замыкания является одной из определяющих количественных характеристик при контроле правильности

принимаемых технологических решений. Разработаны модель, алгоритм и программное обеспечение, позволяющие оценить данное требование на основе анализа расположения точек контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки при наладке.

Разработан подход, который позволяет сформировать комплексную модель, учитывающую взаимное влияние сил [10], действующих в зонах контакта обрабатываемой поверхности с компонентами технологического оборудования. Этот метод включает в себя анализ составляющих сил в каждой точке соприкосновения и их интенсивности.

Предлагаемый метод, позволил разработать принципиально новую универсальную математическую модель для комплексного анализа сил резания и динамики взаимодействия обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы в процессе бесцентрового шлифования, которая позволяет по сравнению с известными работами других авторов обеспечить полную формализацию технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования. Модели, благодаря своей универсальности, применимы для детального исследования всех поперечных сечений зоны обработки деталей, обеспечивая высокую точность и надежность результатов.

Данный подход включает детальный анализ сложных взаимосвязанных динамических процессов, возникающих в ходе обработки. Особое внимание уделяется многофакторному моделированию, учитывающему влияние различных параметров, таких как геометрия режущего инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала, параметры резания и условия эксплуатации технологической системы. Такой многоуровневый анализ позволяет не только количественно оценить силы резания, но и выявить их качественную природу, а также определить оптимальные режимы обработки для достижения максимальной эффективности и качества поверхности.

Ключевым моментом отличным от известных ранее выполненных исследований является установление формализованных зависимостей между различными факторами, которые возникают в ходе обработки, а также расширением количества факторов, оказывающих влияние на эти воздействия: размерные характеристики обрабатываемой поверхности и элементов технологической системы во всем пространстве рабочей зоны; структура и материал абразивного зерна шлифовального круга; материал ведущего круга; частоты вращения, ведущего и шлифовальных кругов; наладочные размеры; форма ведущего круга; использование технологических жидкостей; материал и величина припусков обрабатываемой детали.

Результаты теоретических исследований и их практическая проверка способствуют более глубокому пониманию процесса и направлены на создание систем автоматизированного проектирования операций, выполняемых на бесцентровых шлифовальных станках.

Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. М. : Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1952. 283 с.
3. Филькин В. П., Колтунов И. Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М. : Машиностроение, 1971. 204 с.
4. Черпаков Б. И., Годович Г. М., Волков Л. П., Прохоров А. Ф. Бесцентровые шлифовальные станки. М. : Машиностроение, 1973. 168 с.
5. Бржозовский Б. М., Захаров О. В. Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке : монография / под ред. З. И. Шевченко. Саратов : СГТУ, 2010. 207 с.
6. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
9. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1. С. 61–69.
10. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159.

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения», Камышинский
технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного
технического университета (Россия,
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)
e-mail: bpy@mail.ru

Petr Y. Bochkarev

Doctor of technical sciences,
professor, professor of department
of engineering technology and applied
mechanics, Kamyshin Technological
Institute (branch) of Volgograd State
Technical University (6A Lenina
street, Kamyshin, Russia)

Павел Витальевич Малинин
аспирант кафедры «Технология
машиностроения»,
Камышинский технологический
институт (филиал) Волгоградского
государственного технического
университета (Россия, г. Камышин,
ул. Ленина, 6А)
e-mail: mpv92@yandex.ru

Pavel V. Malinin
Postgraduate student, Kamyshev
Technological Institute (branch)
of Volgograd State
Technical University (6A Lenina
street, Kamyshev, Russia)

УДК 681.5

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

**Александр Викторович Рогачев¹,
Евгений Михайлович Фролов²**

^{1,2}Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Россия

Аннотация. Описываются аппаратная и программная части системы адаптивного управления режимами лезвийной обработки на токарных станках с ЧПУ.

Ключевые слова: метод пробного прохода, сигнал ЭДС резания, оптимизация режимов точения, ЧПУ, адаптивная система

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR CUTTING MODES BLADE MACHINING

Aleksandr V. Rogachev¹, Evgeniy M. Frolov²

^{1, 2}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. The hardware and software parts of the adaptive control system for blade machining modes on CNC lathes are described.

Keywords: trial pass method, cutting EMF signal, optimization of turning modes, CNC, adaptive system

Функционирование машиностроительного предприятия предполагает высокую надежность выполнения технологических процессов механической обработки в части исключения, в крайнем случае минимизации аварийных ситуаций при соблюдении всех технологических ограничений, накладываемых на процесс обработки. Процесс механической обработки сталей и сплавов, кроме того, что имеет сложную

трудно анализируемую природу, сосредоточен в так называемой «зоне резания», из которой сложно получить информацию, а затем адекватно ее оценить. В настоящее время существуют различные методики как анализа процесса резания, так и управления им и его результатами [1, 2]. Здесь следует уточнить, что методики, доведённые до промышленной реализации, позволяют фиксировать момент выхода в аварийные режимы, что имеет важное для надежности автоматизированного производства значение. Но если мы говорим о повышении надежности процесса резания, то возникает необходимость предсказывать поведение процесса резания для адаптивного управления параметрами обработки, чтобы минимизировать аварийные ситуации. Также существенным ограничением является использование на машиностроительных предприятиях серийного оборудования с ЧПУ, на которое в большинстве случаев производителем накладывается запрет изменения конструкции и программного кода. Таким образом, разработка системы адаптивного управления режимами лезвийной обработки, использующей информацию из зоны резания и способной работать на серийном металлорежущем оборудовании с числовым программным управлением, является актуальной задачей.

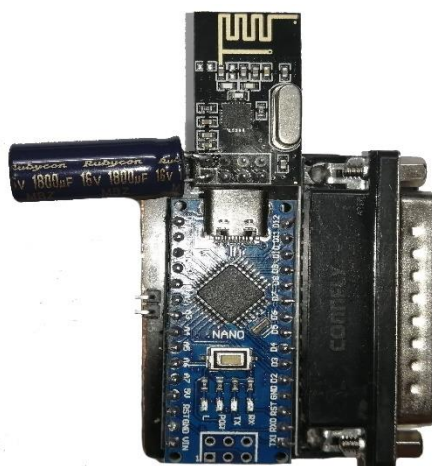
Для решения поставленной задачи необходимо, во-первых, определить сигнал, который легко регистрируется в зоне резания и позволяет оценить условия обработки [3, 4], во-вторых, перенести этап назначения режимов резания на уровень систем числового программного управления (ЧПУ) металлорежущим оборудованием, в-третьих, спроектировать и разработать систему, способную на основе сигнала из зоны резания назначить оптимальные режимы обработки.

Результатом проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ является система адаптивного управления режимами лезвийной обработки, предназначенная для использования на металлорежущем оборудовании с числовым программным управлением [5, 6]. Конструктивно система состоит из двух частей (рис. 1), одна из которых является управляющей и отвечает за управление процессом, оптимизацию режимов обработки. Измерительная часть служит для измерения ЭДС резания в процессе пробного прохода.

Принцип работы устройства состоит в следующем. Управляющее устройство служит для управления алгоритмом работы, а также связи УЧПУ и измерительного устройства. Подключение к УЧПУ при помощи RJ45 кабеля и двух проводников: цифровые вход и выход. При включении устройства запускается сервер веб-интерфейса, служащий для ввода оператором начальных параметров обработки таких, как сечение державки, физико-механические свойства материала, технологические ограничения станка и другие.



управляющее устройство



измерительное устройство

Рис. 1. Составные части системы адаптивного управления режимами обработки

Измерительное устройство устанавливается в свободное место revolverной головы токарного станка с ЧПУ, и подключается при помощи двух проводников, один из которых электрически соединен с модифицированной державкой, которая изолирована от корпуса станка, а второй проводник подключен к корпусу станка, тем самым образуя измерительную цепь [7].

Последовательность работы с системой: в УЧПУ станка оператор вносит коды управляющих программ основной обработки и пробного прохода. После запуска программы управление осуществляется в автоматическом режиме управляющим устройством. Первым этапом совершается пробный проход, в ходе которого на заранее заданных скорости резания, подачи и глубине резания выполняется обработка небольшого участка заготовки (10...20 мм), во время обработки осуществляется измерение ЭДС резания пары заготовка-инструмент аналого-цифровым преобразователем, полученные значения отправляются в управляющее устройство. Управляющее устройство на основе заранее внесенных параметров обработки и полученных значениях ЭДС выполняет расчет оптимальных режимов обработки с учетом заданных ограничений. Для определения оптимальных режимов резания в устройстве используется алгоритм решения задач оптимизации симплекс методом. Среди основных ограничений при расчете являются: технологические возможности станка, заданное качество поверхности, прочность и жесткость инструмента. Результатом расчета являются численные значения скорости резания (м/мин) и подачи (мм/об), которые вносятся в область пользовательских переменных УЧПУ станка. В теле основной управляющей программы считываются оптимальные значения режимов резания и выполняется обработка детали.

Следует отметить, что положенный в основу представленной системы принцип работы реализуем на токарных станках с различными системами ЧПУ.

Так, в работе [8] описана реализация подобной системы для токарного обрабатывающего центра с устройством ЧПУ Okuma OSP-P300. Разработана реализация для токарного станка под управлением системы Siemens 808D [5].

С целью проверки работоспособности устройства был проведен эксперимент по получению поверхности заданной шероховатости при точении на автоматически назначенных режимах резания, определенных на основе информации из зоны резания [8]. В результате было доказано, что при автоматическом назначении оптимальных режимов точения посредством дополнительно подключаемого к УЧПУ станка системы адаптивного управления режимами обработки возможно получение поверхности заданного качества со стабильным профилем микронеровностей при соблюдении накладываемых на обработку технологических ограничений.

Список литературы

1. Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Фролов Е. М., Крылов Е. Г. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29, № 5. P. 512–517.
2. Krainev D. V., Sergeev A. S., Tikhonova J. S., Kuang Chongyu Ngo. The reliability improvement of CNC machining centers due to on-line diagnostics of the cutting process // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (St. Petersburg, Russia, 24–26 May 2017) : Conference Proceeding / ed. by S. Shaposhnikov. Publisher : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2017. P. 627–629. doi: 10.1109/SCM.2017.7970670
3. Тихонова Ж. С., Крайнев Д. В., Фролов Е. М. [и др.]. The ThermoEMF as a Tool for Increasing the Autonomy of Technological Machines // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science : 5th International Conference CIT&DS 2023 (Volgograd, Russia, September 11–15, 2023) : Proceedings / eds.: A. G. Kravets, M. V. Shcherbakov, P. P. Groumpos. Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2023. P. 143–154. doi: 10.1007/978-3-031-44615-3_10
4. Плотников А. Л., Фролов Е. М. Способ получения оперативной информации о свойствах контактной пары деталь-инструмент с использованием предварительного пробного прохода // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 3. С. 39–47.
5. Frolov E. M., Rogachov A. V., Kraynev D. V. [et al.]. Automatic Turning Modes Assignment System // Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2024) (Sochi, Russian Federation, May 19–24, 2024) / eds.: A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, 2024. P. 582–591. doi: 10.1007/978-3-031-65870-9_53

6. Фролов Е. М., Рогачев А. В. Интеллектуальное устройство автоматического назначения режимов резания при точении // Научные технологии в машиностроении : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 1–3 ноября 2023 г.) : в 2 т. Т. 2 / отв. ред. В. Ю. Лавриненко. М., 2024. С. 337–339.

7. Патент 201938 Российская Федерация, МПК В23В25/06. Автономный модуль для измерения ЭДС резания / Фролов Е. М., Рогачев А. В. № 2020126791 ; заявл. 11.08.2020 ; опубл. 21.01.2021.

8. Фролов Е. М., Рогачев А. В., Полянчикова М. Ю., Стражев В. В. Исследование качества формируемой при точении на автоматически определяемых режимах поверхности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 1 (272). С. 32–34.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Викторович Рогачев
аспирант, Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-кт имени Ленина, 28)
e-mail: alexsandrogachev@ya.ru

Aleksandr V. Rogachev
Postgraduate student, Volgograd State
Technical University (28 Lenin
avenue, Volgograd, Russia)

Евгений Михайлович Фролов
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
машиностроения», Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-кт имени Ленина, 28)
e-mail: eltar1983@yandex.ru

Evgeniy M. Frolov
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
technology of machine building,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

УДК 681.58

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ЦИЛИНДРОМ ПОДАЧИ СИЛОВОЙ ГОЛОВКИ АГРЕГАТНОГО СТАНКА

**Татьяна Васильевна Мирошина¹,
Виталий Вадимович Голубовский²**

^{1,2}Пензенский государственный технологический университет,
Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается общий подход к разработке адаптивных систем автоматического управления подачей силовой головки агрегатного станка, имеющего гидравлический привод.

Ключевые слова: адаптивная система управления, агрегатный станок, силовая головка, гидравлический привод

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE HYDRAULIC FEED CYLINDER OF THE POWER HEAD OF A GRADUATE MACHINE

Tatyana V. Miroshina¹, Vitaly V. Golubovsky²

^{1,2}Penza State Technological University, Penza, Russia

Abstract. The article discusses a general approach to developing adaptive automatic feed control systems for the power head of a hydraulically driven modular machine tool.

Keywords: adaptive control system, modular machine tool, power head, hydraulic drive

Адаптивная система управления (АСУ) предназначена для автоматического изменения параметров технологического процесса в зависимости от изменяющихся условий работы агрегатного станка. Такие системы позволяют автоматически адаптироваться к изменениям условий обработки, таким как износ инструмента, колебания припуска и твердости обрабатываемой заготовки и другие факторы, влияющие на процесс резания [1].

Применение АСУ позволяет:

- обеспечить требуемые режимы и качество обработки за счет корректировки режимов резания;
- стабилизировать силовой режим и исключить перегрузки во время обработки деталей, особенно на автоматических линиях;
- предотвратить аварийные ситуации (например, поломка инструмента, выход из строя отдельных узлов станка и т.д.).

Гидравлические приводы нашли широкое применение в металлообрабатывающих станках благодаря своей способности обеспечивать высокую мощность и точность движений. Для эффективного функционирования гидравлических приводов необходимы адаптивные системы управления, которые работают на одном виде энергии, минеральном масле. В таких системах отпадает необходимость в многократном преобразовании сигналов управления из одного вида в другой, что повышает чувствительность и быстродействие систем управления.

Таким образом, адаптивные системы управления гидравлическими приводами являются важным элементом современных металлообрабатывающих станков, обеспечивающим высокую производительность и качество обработки деталей.

На рисунке 1 показана конструктивная схема силовой головки агрегатного станка для механической обработки с адаптивной системой управления гидравлическим цилиндром подачи [2].

Адаптивная система управления гидравлическим цилиндром 1 подачи силовой головки агрегатного станка содержит измерительный преобразователь 2 вращающего момента, выполненный с возможностью соединения с электродвигателем 3 привода вращения шпинделя 4 головки и связанный с осевым регулирующим дросселем 5. Дроссель выполнен с управляющими 6, 7 и управляемой 8 полостями с возможностью соответствующего соединения управляемой полости с гидравлическим цилиндром подачи и через панель 9 управления с насосной станцией 10 с возможностью управления скоростью гидравлического цилиндра подачи.

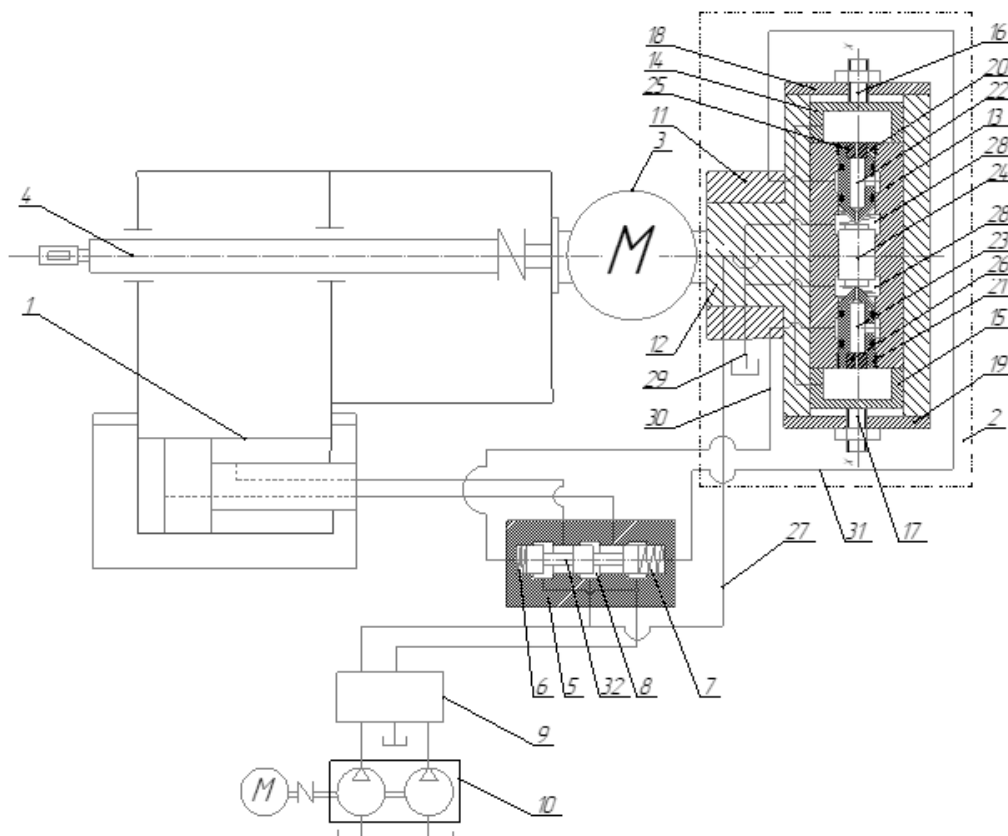


Рис. 1. Адаптивная система управления гидравлическим цилиндром подачи силовой головки агрегатного станка

Измерительный преобразователь вращающего момента выполнен в виде расположенного в неподвижном коллекторе 11 ротора 12, выполненного с возможностью соосного соединения с вращающейся частью электродвигателя. В сквозной радиальной расточке ротора размещены корпус 13 и подвижные упоры 14 и 15, установленные с воз-

возможностью регулировки заданного положения корпуса в расточке посредством винтов 16 и 17, расположенных в крышках 18 и 19 радиальной расточки ротора. В корпусе расположены соосно навстречу друг другу с возможностью регулировки осевого положения сопла 20 и 21 с измерительными камерами 22 и 23, между которыми размещена подпружиненная с двух сторон подвижная инерционная заслонка 24, а с другой стороны сопел установлены постоянные дроссели 25 и 26. Сопла и постоянные дроссели соединены по мостовой схеме, в которой полости корпуса перед постоянными дросселями соединены линией 27 подвода рабочей среды с панелью управления, полость 28 корпуса между соплами соединена с линией 29 отвода рабочей среды, а измерительные камеры сопел соединены управляющими линиями 30 и 31 с управляющими полостями, расположенными под торцами подвижного элемента 32 осевого регулирующего дросселя.

Измерительный преобразователь вращающего момента имеет радиальную ось чувствительности $X - X$.

Адаптивная система управления гидравлическим цилиндром подачи силовой головки агрегатного станка работает следующим образом.

Цикл работы силовой головки настраивают установкой в заданное положение упоров и конечных выключателей, управляющих работой направляющих гидравлических аппаратов (на рис. 1 не показаны), размещенных в панели 9, реализуется управление «по пути».

Частота вращения шпинделя 4 головки определяется частотой вращения вала электродвигателя 3. При увеличении момента сопротивления на шпинделе угловая скорость ротора электродвигателя уменьшается.

Скорости холостых ходов силовой головки при подводе инструмента к заготовке и при отводе инструмента в исходное положение настраивают путем регулирования расхода рабочей среды, подводимого к гидравлическому цилиндру 1 подачи и отводимого от него на слив через осевой регулирующей дроссель 5.

Давление рабочей среды в линии питания цилиндра от насосной станции 10 ограничивают настройкой предохранительного клапана, размещенного в панели 9 управления.

Предварительная настройка измерительного преобразователя вращающего момента включает в себя два этапа.

Первый этап предусматривает установку подвижной инерционной заслонки 24 в геометрическом центре корпуса 13, для чего одновременно регулируют положение сопел 20 и 21 вдоль оси чувствительности $X - X$ и предварительный натяг центрирующих пружин. Зазоры между торцами сопел и заслонки должны быть одинаковыми.

Масса заслонки и силы пружин определяют чувствительность измерительного преобразователя. Эту настройку можно производить вне ротора 12.

Второй этап предусматривает установку геометрического центра корпуса 13 в радиальной расточке ротора преобразователя на некотором заданном расстоянии от оси вращения (эксцентриситете), для чего винтами 16 и 17 устанавливаются и контргайками фиксируют положение подвижных упоров 14 и 15. Величина настроенного эксцентриситета определяет чувствительность измерительного преобразователя. Изменяя эксцентриситет, можно настраивать преобразователь на различные диапазоны измерения вращающего момента.

При работе головки рабочая среда от насосной станции через панель управления поступает в поршневую (левую) полость гидравлического цилиндра подачи, а из штоковой (правой) полости отводится на слив в бак. Подвижная силовая головка вместе с корпусом цилиндра перемещается справа налево.

Для работы измерительного преобразователя рабочая среда из линии 27 подвода через коллектор 11 поступает через постоянные дроссели 25 и 26 в измерительные камеры 22 и 23 сопел, а затем, пройдя сопротивления в виде зазоров между торцами сопел и инерционной заслонки, из полости 28 корпуса по линии 29 отвода рабочей среды сливается в бак.

При вращении ротора преобразователя, соединенного с вращающейся частью электродвигателя возникает центробежная сила инерции, направленная вдоль оси чувствительности $X - X$. Центробежная сила инерции пропорциональна массе заслонки, величине настроенного эксцентриситета и квадрату угловой скорости ротора преобразователя.

Под действием этой силы инерционная заслонка смещается и изменяет гидравлические сопротивления зазоров между ее торцами и торцами сопел.

Если сопротивление истечению рабочей среды из сопла 20 увеличивается, а из сопла 21 уменьшается, то давление в измерительной камере 22 возрастает, а давление в камере 23 уменьшается. Возникающая разность давлений используется как управляющий сигнал в управляющих полостях 6 и 7 под торцами подвижного элемента 32 осевого регулирующего дросселя.

В предлагаемой системе управления осевой регулирующей дроссель может быть выполнен в виде четырехщелевого золотникового распределителя с пружинным центрированием, как это показано на рис. 1.

Под действием разности давлений в управляющих линиях 30 и 31 и в управляющих полостях 6 и 7 подвижный элемент осевого регулирующего дросселя смещается влево, устанавливая проходные сечения щелей подвода и отвода рабочей среды, соответствующие скорости холостых ходов силовой агрегатной головки.

При увеличении момента сопротивления вращению на шпинделе частота вращения ротора и сила инерции уменьшаются, заслонка смещается в сторону сопла 21. Это нарушает равновесие сил на подвижном элементе осевого регулирующего дросселя, он смещается вправо, устанавливая проходные сечения щелей, соответствующие скорости рабочей подачи.

В дальнейшем любое изменение момента сопротивления вращению шпинделя силовой агрегатной головки будет приводить к соответствующему изменению подачи (увеличение момента сопротивления будет приводить к уменьшению подачи, а уменьшение момента сопротивления – к увеличению подачи), то есть будет происходить адаптация работы гидравлического цилиндра подачи к изменениям условий обработки материала на станке.

После завершения обработки детали на станке рабочая среда от насосной станции через панель управления подается в штоковую (правую) полость гидравлического цилиндра, а из поршневой (левой) полости отводится на слив в бак. Силовая головка возвращается в исходное положение. Далее цикл работы повторяется.

Повышение точности настройки адаптивной системы управления гидравлическим цилиндром подачи силовой головки агрегатного станка на заданный режим работы управления достигается за счет использования величины вращающего момента электродвигателя привода вращения шпинделя головки для управления гидравлическим цилиндром подачи, что осуществляется посредством измерительного преобразователя типа сопло-заслонка и осевого регулирующего дросселя.

Список литературы

1. Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Протопопов С. П. [и др.]. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках). М. : Машиностроение 1980. 536 с.
2. Патент 199898 Российская Федерация, МПК В23Q 15/12 (2006.01), В23Q 5/06 (2006.01). Адаптивная система управления гидравлическим цилиндром подачи силовой агрегатной головки станка для механической обработки / Симанин Н. А., Голубовский В. В. № 2020110298 ; заявитель и патентообладатель ПензГТУ ; заявл. 10.03.2020 ; опубл. 24.09.2020, Бюл. № 27.

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Васильевна Мирошина
магистрант, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр-д Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
e-mail: m1roshina.t@yandex.ru

Tatyana V. Miroshina
Master degree student, Penza State
Technological University
(1a/11 Baidukova passage /
Gagarina street, Penza, Russia)

Виталий Вадимович Голубовский
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технология
машиностроения», Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр-д Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
e-mail: golubovskyvv@penzgtu.ru

Vitaly V. Golubovsky
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
mechanical engineering technology,
Penza State Technological
University
(1a/11 Baidukova passage /
Gagarina street, Penza, Russia)

УДК 621.9

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ КИТАЙСКИХ КОМПОНЕНТОВ В СТАНКОСТРОЕНИИ И ПУТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В РАМКАХ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА

Николай Евгеньевич Демиденко

Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются проблемы интеграции китайских комплектующих в станкостроении на примере предприятий России и Беларуси. Особое внимание уделено вопросам недостатка технической документации на русском языке, логистическим трудностям и гарантийному обслуживанию. Показано, что данные факторы увеличивают время ввода оборудования в эксплуатацию. Также освещены перспективы импортозамещения и реализуемые проекты Союзного государства по созданию отечественных комплектующих и систем управления, обладающих более широкой поддержкой и документацией. Отдельное внимание уделено опыту автора в пуско-наладочных работах вертикального консольно-фрезерного станка SGM450CNC-01-10-04 предприятия ОАО «СтанкоГомель».

Ключевые слова: станкостроение, ЧПУ, импортозамещение, Союзное государство

PROBLEMS AND PROSPECTS OF INTEGRATION OF CHINESE COMPONENTS IN MACHINE TOOL BUILDING AND WAYS OF IMPORT SUBSTITUTION WITHIN THE UNION STATE

Nikolay E. Demidenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

Abstract. This article examines the challenges of integrating Chinese components into the machine tool industry, using Russian and Belarusian companies as examples. Particular attention is paid to the lack of technical documentation in Russian, logistical difficulties, and warranty service. It is shown that these factors increase the time it takes to commission equipment. The article also highlights prospects for import substitution and ongoing Union State projects to develop domestic components and control systems with more comprehensive support and documentation. Special attention is given to the author's experience in commissioning the SGM450CNC-01-10-04 vertical knee milling machine at StankoGomel JSC.

Keywords: machine tool manufacturing, CNC, import substitution, Union State

Станкостроительная отрасль России и Беларуси в последние годы испытывает повышенное давление, связанное с необходимостью обновления парка оборудования и снижением зависимости от зарубежных поставщиков. Китайские комплектующие заняли значительную долю на рынке, обеспечивая доступные цены и широкий ассортимент, однако их интеграция сопровождается целым рядом трудностей. В частности, проблемы касаются документации, логистики, сервисного и гарантийного обслуживания. Данные аспекты особенно критичны для предприятий, работающих в условиях высокой загрузки и жестких сроков поставки продукции.

Одной из наиболее острых проблем является дефицит русскоязычной документации. Большинство инструкций, схем подключения и программного обеспечения предоставляются на китайском или английском языках, что значительно усложняет ввод в эксплуатацию. Ошибки в интерпретации технических терминов приводят к сбоям при наладке и увеличивают сроки ввода оборудования.

Дополнительные трудности связаны с логистикой: доставка комплектующих из Китая занимает от нескольких недель до месяцев, а гарантийная замена дефектных узлов затягивается из-за сложных процедур пересылки и таможенного оформления. В результате предприятия сталкиваются с вынужденными простоями, которые снижают их конкурентоспособность.

Автор принимал участие в пуско-наладочных работах вертикальных и горизонтальных обрабатывающих центров, где использовались китайские комплектующие. В случае применения компонентов не массового назначения (например, электрошпиндели) были выявлены

задержки, связанные с отсутствием актуальных схем подключения, документации и ограниченной поддержкой со стороны производителей, особенно в условиях отсутствия официального представительства на территории СНГ. Это подтверждает необходимость создания локальных сервисных центров и базы переводов документации.

В условиях санкционного давления особую роль играют союзные проекты России и Беларуси. Программа «Союзное машиностроение» предусматривает создание высокоточных станков, разработку отечественных систем ЧПУ и локализацию производства комплектующих. Такие решения позволяют обеспечить предприятия документацией на русском языке, оперативной поддержкой, соответствием стандартам СНГ и понизить зависимость от зарубежных производителей.

Характерным примером является участие автора в пуско-наладке вертикального консольно-фрезерного станка SGM450CNC-01-10-04 производства ОАО «СтанкоГомель» с ЧПУ FMS-3300 ModMash. Данный станок разработан в кооперации РФ и РБ и оснащён отечественными компонентами: система ЧПУ, преобразователи, электродвигатели и др. В отличие от китайских аналогов, оборудование сопровождалось подробной русскоязычной документацией, что позволило значительно сократить сроки наладки и исключить ошибки.

Интеграция китайских комплектующих остаётся важным направлением, позволяющим закрыть дефицит оборудования на рынке. Однако стратегическим решением для России и Беларуси являются союзные проекты, которые обеспечивают более высокую степень поддержки, полное соответствие требованиям ГОСТ и наличие сервисных центров. Опыт эксплуатации станка SGM450CNC-01-10-04 с ЧПУ ModMash подтверждает, что союзные разработки имеют перспективу заменить китайские аналоги, обеспечивая предприятиям надёжность, оперативность обслуживания и технологическую независимость.

Список литературы

1. FMS-3300. Техническое описание. 2020. URL: <https://modmash.ru/wp-content/uploads/2023/01/%D0%A2%D0%9E-%D0%A4%D0%9C%D0%A13300-05.pdf> (дата обращения: 29.09.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Евгеньевич Демиденко
магистрант, Гомельский
государственный технический
университет имени П. О. Сухого
(Республика Беларусь, г. Гомель,
пр-кт Октября, 48)
e-mail: kolia.demidenko@yandex.ru

Nikolay E. Demidenko
Master degree student, Sukhoi State
Technical University of Gomel
(48 Oktyabrsky avenue, Gomel,
Republic of Belarus)

МЕТАСИСТЕМНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ РЕСУРСОВ В ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ

Александр Михайлович Пищухин¹,
Гульнара Фазульяновна Ахмедьянова²,
Игорь Валерьевич Кулешов³

^{1,2,3}Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Гибкая производственная система (ГПС) является сложным техническим комплексом с множеством функций, реализация которых обеспечивается использованием соответствующих ресурсов. Главная функция в этом множестве – выполнение некоторого ассортимента технологий изготовления продукции, а главным ресурсом для ее обеспечения является технологическое оборудование, входящее в состав ГПС. Аналогичные рассуждения применимы к транспортным средствам, местам складирования, инструментам и приспособлениям, относящимся к другим ресурсам ГПС и требующим гибкого переключения. Как результат исследования можно предложить двухуровневый метасистемный механизм переключения ресурсов.

Ключевые слова: метасистемные переключения, распределения ресурсов, агентная модель, двухуровневая метасистема, гибкая производственная система

METASYSTEM RESOURCE SWITCHING IN A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM

Alexander M. Pishukhin¹, Gulnara A. Akhmedyanova²,
Igor V. Kuleshov³

^{1,2,3}Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. Flexible manufacturing system (FMS) is a complex technical complex with many functions, the implementation of which is ensured by the use of appropriate resources. The main function in this set is the implementation of a certain range of production technologies, and the main resource for its provision is the technological equipment included in the FMS. Similar reasoning is applicable to vehicles, storage areas, tools and devices related to other FMS resources and requiring flexible switching. As a result of the study, a two-level metasystem mechanism for resource switching can be proposed.

Keywords: metasystem switching, resource allocation, agent model, two-level metasystem, flexible manufacturing system

Гибкая производственная система (ГПС) является сложным техническим комплексом с множеством реализуемых функций, реализа-

ция которых обеспечивается использованием соответствующих ресурсов [1, 2]. Главная функция в этом множестве – реализация некоторого ассортимента технологий изготовления продукции, а главным ресурсом для ее обеспечения является технологическое оборудование, входящее в состав ГПС. При этом, технологическое оборудование становится ресурсом, требующим согласованного с технологией назначения и гибкого *переключения*, санкционированного этой технологией, возникшей нештатной ситуацией или появлением более приоритетного задания. Аналогичные рассуждения применимы к транспортным средствам и загрузочным роботам [3], местам складирования, инструментам, приспособлениям и оснастке [4], относящимся к ресурсам ГПС и требующим гибкого переключения [5, 6]. В результате можно предложить двухуровневый метасистемный механизм переключения ресурсов, изображенный на рис. 1.

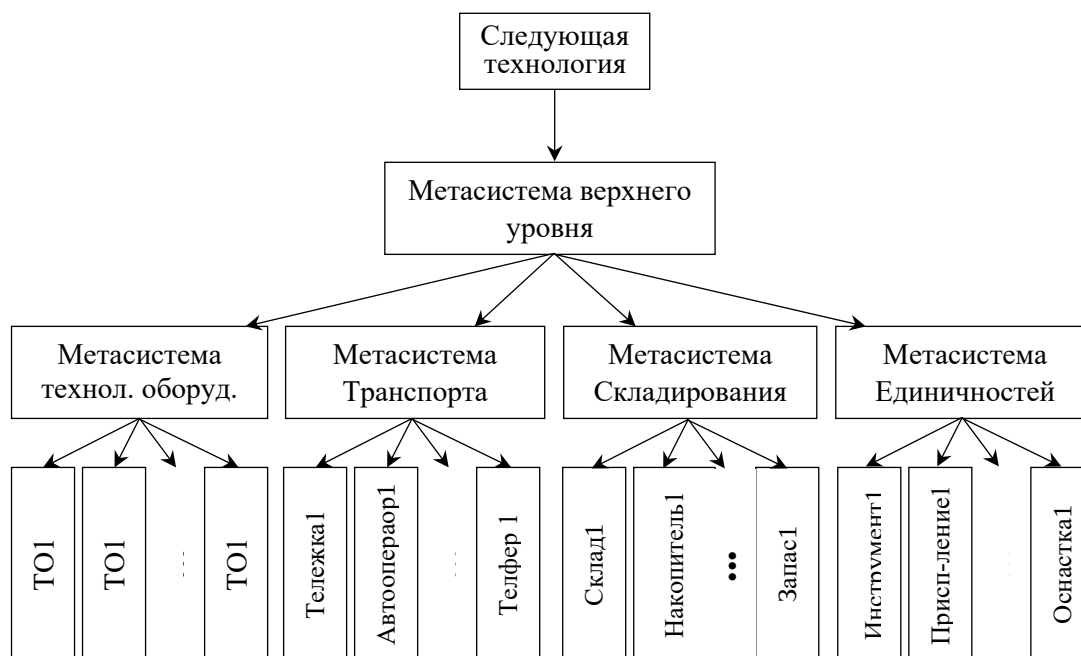


Рис. 1. Метасистемный механизм переключения ресурсов

На объект управления (ГПС) поступает поток технологий, задача метасистемы верхнего уровня последовательно подключать метасистемы нижнего уровня, конкретизирующие технологическое оборудование, транспортные устройства, склады и накопители, инструменты и приспособления, в соответствии с технологической последовательностью.

При этом на метасистемы нижнего уровня возлагается оценка готовности перечисленных компонент к реализации вновь пришедшей технологии.

Готовность обуславливается многими факторами:

- соответствию по технологическому назначению и техническим характеристикам, например, в отношении технологического оборуду-

дования – по технологической операции и мощности двигателя, транспортного средства – наличие возможности добраться до целевого места и допустимости габаритов и веса груза, склада – по размерам места и назначению этого места, инструмента по назначению и типоразмеру;

- исправностью означает работоспособное состояние технологического оборудования, то есть способность выполнять свои функции в данный момент. Это относится к компонентам метасистем нижнего уровня: к транспортному средству, месту складирования, инструменту или приспособлению;

- незагруженностью – это означает, что компонент в данное время не используется ни в одной технологии и «простаивает»;

- близостью к месту, где возникла потребность в данном компоненте;

- близость по назначению (снижает себестоимость и повышает качество).

Другие факторы являются более специфичными и относятся к метасистеме верхнего уровня и каждой из метасистем нижнего уровня. На верхнем уровне технологию выбираем ту, для которой больше всего технологического оборудования в готовности. На нижних уровнях складское место выбираем того типоразмера, которого в данный момент больше всего среди свободных мест, транспортное средство берем самое удобное в отношении маршрута, инструмент и приспособление выбираем поблизости, например с соседнего станка. Все это обуславливает опосредованную экономию. Дополнительные условия переключений возникают в случае использования реконфигурируемого оборудования [7, 8].

Другая задача метасистемного подхода связана с оптимальным распределением ресурсов. Строгая постановка этой задачи затруднительна в силу хаотичного поступления технологий, поэтому здесь можно использовать агентную модель для планирования стратегии загрузки компонент, управляемых метасистемами нижнего уровня, как имеющую ряд преимуществ [9]:

- функционирование сводится к системе массового обслуживания с непрерывным потоком заявок и распределением ресурсов между ними в реальном времени;

- с каждой заявкой и ресурсом можно связать программного агента в виртуальном пространстве, который запускается происходящими событиями, и улучшает свои текущие показатели;

- агенты каждой заявки и ресурса строят свои собственные, но встроенные в общую сеть расписания;

- в основе подхода к планированию лежит не полный или частичный комбинаторный перебор вариантов, а выявление и разрешение конфликтов путем переговоров агентов и достижения компромиссов;

– созданный план запускается на исполнение, в ходе которого метасистемы отслеживают исполнение и инициируют перепланирование в случае расхождений плана с фактической ситуацией.

Реализация описанной модели осуществлялась с помощью соответствующей компьютерной программы [10]. Для простоты в ней имитировалось только стандартное переключение для шести технологий. При этом обычное мультиагентное управление ГПС, при котором подготовка и запуск технологии в производство начинались децентрализованно, сравнивалось с мультиагентным, при котором метасистема сначала вырабатывала оптимальную стратегию в виртуальном пространстве и совмещала ее в управлении с производственной средой.

Таким образом, двухуровневая метасистема, с одной стороны централизует управление, с другой стороны подключает запараллеливание операций, передавая активность метасистемам нижнего уровня. При этом основным механизмом нижнего уровня должен быть агент-ориентированный подход, который позволяет активизироваться любому компоненту, задача централизованной части сводится к разрешению конфликтов.

Список литературы

1. Загидуллин Р. С., Крюкова А. К., Михеев М. А., Ткаченко А. А. Разработка модели гибкой производственной ячейки для серийного изготовления беспилотных летательных аппаратов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре, 2024. С. 18–20.
2. Dlamini N. Z., Mpofo K., Daniyan I., Ramatsetse B. An overview of the manufacturing systems: a literature survey // Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever-Changing World : Lecture Notes in Production Engineering. Springer, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-15602-1_64
3. Шаповалов В. Д. Моделирование роботизированного участка гибкой производственной системы // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2022. № 11 (65). С. 246–251.
4. Богуцкий В. Б., Шрон Л. Б. Выбор типа технологической оснастки для гибкой производственной системы // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 29. С. 60–64.
5. Pishchukhin A. M. Metasystem approach to the choice of billet production technology in aircraft construction // AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. 2021. P. 070001. doi: 10.1063/5.0099357
6. Akhmedyanova G. F., Pishchukhina T. A. Metasystem switches in a reconfigurable production system // Advances in Automation V. Proceedings of the International Russian Automation Conference. 2024. P. 395–405. doi: 10.1007/978-3-031-51127-1_37

7. Пищухина Т. А., Ахмедьянова Г. Ф., Пищухин А. М. Обеспечение гибкости производственной системы на основе реконфигурации технологического оборудования // Автоматизация в промышленности. 2023. № 10. С. 42–47.

8. Левашкин Д. Г. Анализ влияния точности автоматически заменяемых узлов на обработку деталей в реконфигурируемых производственных системах // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). С. 27–31.

9. Pishchukhin A. Metasystem approach to increase the load factor FMS // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, IC-MTMTE–2017. 2017. P. 04003. doi: 10.1051/matecconf/201712904003

10. Ивашкин Ю. А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3 : учеб. пособие. М. : Лаборатория знаний, 2016. 350 с.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Михайлович Пищухин
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Управление
и информатика в технических
системах», Оренбургский
государственный университет
(Россия, г. Оренбург,
пр-кт Победы, 13)
e-mail: pishchukhin55@mail.ru

Alexander M. Pishukhin
Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
management and informatics in
technical systems, Orenburg State
University (13 Pobeda avenue,
Orenburg, Russia)

**Гульнара Фазульевна
Ахмедьянова**
кандидат педагогических наук,
доцент, доцент кафедры
«Управление и информатика
в технических системах»,
Оренбургский государственный
университет (Россия, г. Оренбург,
пр-кт Победы, 13)
e-mail: ahmedyanova@bk.ru

Gulnara F. Akhmedyanova
Candidate of pedagogical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of management and
informatics in technical systems,
Orenburg State University (13 Pobeda
avenue, Orenburg, Russia)

Игорь Валерьевич Кулешов,
старший преподаватель кафедры
«Технологии строительного
производства», Оренбургского
государственного университета
(Россия, г. Оренбург,
пр-кт Победы, 13)
e-mail: kuleshovigor1985@mail.ru

Igor V. Kuleshov
Senior lecturer at the department of
construction technology, Orenburg
State University (13 Pobeda avenue,
Orenburg, Russia)

ОСОБЕННОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Елена Сергеевна Палкина¹,
Юрий Михайлович Шумилов²

^{1,2}Санкт-Петербургский государственный морской технический
университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматриваются особенности цифровизации бизнес-процессов эксплуатации станочного оборудования в машиностроении. Современные информационно-аналитические системы позволяют собирать и визуализировать данные о работе станков и роботизированных комплексов, фиксировать простои и узкие места производственных процессов. Однако их функционал в основном ограничивается мониторингом: системы констатируют факт отклонения, но не инициируют его устранение. Это создает разрыв между диагностикой и управлением, так как реагирование в большей мере зависит от специалистов. В работе акцентируется внимание на необходимости перехода от фиксации к прогнозированию бизнес-процессов. Такой подход позволяет рассматривать информационный мониторинг не как конечную цель цифровизации, а как исходную базу для построения методологии прогнозирования, выявления причин отклонений и формирования предпосылок для более устойчивого функционирования производственных систем.

Ключевые слова: бизнес-процессы, машиностроение, промышленное предприятие, цифровые системы, предиктивная аналитика

FEATURES OF BUSINESS PROCESSES OF OPERATION OF MACHINE TOOL EQUIPMENT OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

Elena S. Palkina¹, Yury M. Shumilov²

^{1,2}Saint Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The article discusses the features of digitalization of business processes of machine tool equipment operation in mechanical engineering. Modern information and analytical systems make it possible to collect and visualize data on the operation of machine tools and robotic complexes, to record downtime and bottlenecks in production processes. However, their functionality is mainly limited to monitoring: the systems detect the fact of a deviation, but do not initiate its elimination. This creates a gap between diagnosis and management, as the response is more dependent on specialists. The paper focuses on

the need to move from fixing to forecasting business processes. This approach allows us to consider information monitoring not as the ultimate goal of digitalization, but as the initial basis for building a forecasting methodology, identifying the causes of deviations and creating prerequisites for more sustainable functioning of production systems.

Keywords: business processes, mechanical engineering, industrial enterprise, digital systems, predictive analytics

Ограниченность современных цифровых систем управления заключается в том, что они преимущественно выполняют функцию сигнальных устройств, фиксирующих факт отклонения в бизнес-процессах эксплуатации оборудования, но при этом не обладают встроенными механизмами целенаправленного вмешательства в процесс. Для промышленности, где каждая остановка оборудования оборачивается экономическими потерями, такой уровень цифровизации представляется недостаточным. К примеру, если станок интегрирован в информационно-аналитическую систему, мы можем наблюдать, что его фактическая загрузка составляет лишь 10 % от технической возможной мощности. При цифровизации процесса согласования договоров становится очевидным, что конкретный документ задержался на определённой стадии. В обоих случаях цифровая система фиксирует симптомы отклонений, но не выполняет прогнозирование их последствий и не помогает выявлять корневые причины. Большинство современных систем ограничены именно информационным уровнем. Металлоёмкие предприятия на информационном уровне собирают, обрабатывают и визуализируют данные о состоянии системы.

Несмотря на высокую диагностическую ценность данных, получаемых в ходе мониторинга, ключевая проблема систем управления станками и роботизированными комплексами заключается в ограниченности их функционала. Современные платформы, оснащённые десятками датчиков и программных модулей, собирают большие массивы информации, но их использование ограничено информационным уровнем – они не обеспечивают прогнозирование бизнес-процессов и выработку вариантов управленческих решений. Система показывает оператору или инженеру, что станок работает на сниженной мощности, что температура шпинделя превысила допустимый предел или что траектория движения манипулятора вышла за калибровочные допуски, однако на этом её функция, как правило, заканчивается.

Разрыв проявляется в том, что дальнейшее реагирование полностью зависит от человека. Инженер должен самостоятельно интерпретировать данные, выявить вероятные причины и принять решение о корректирующих действиях – будь то остановка оборудования, вызов ремонтной службы, перенастройка управляющей программы или изме-

нение технологического маршрута. Таким образом, цифровая система фиксирует факт отклонения, но прогнозирование и выбор управленческих действий остаются целиком на специалисте. Практика эксплуатации оборудования подтверждает данное противоречие. В современных условиях становится очевидной необходимость перехода от диагностических решений к интервенционным системам, способным не только констатировать наличие неисправности, но и инициировать действия по её устранению [1].

Наиболее типичными проблемами для станочного парка является перегрузка приводов, перегрев узлов, износ инструмента, нестабильность подачи охлаждающих жидкостей, а также сбои в системах числового программного управления. Для роботизированных комплексов характерны отклонения траекторий, снижение точности позиционирования и рассогласованность в работе с другими звеньями производственной линии. Все эти проблемы фиксируются средствами мониторинга, однако их решение по-прежнему остается за оператором, который должен принять решение об остановке оборудования, корректировке программы, замене инструмента или перенастройке технологического узла.

Таким образом, информационный мониторинг следует рассматривать как необходимую, но лишь базовую ступень в развитии теории и методологии прогнозирования бизнес-процессов в промышленности. Ключевая задача интервенционных систем состоит в минимизации времени между фиксацией сбоя и его устранением. Это особенно критично для высокопроизводительных линий, где даже кратковременный простой одного элемента влечёт каскадные задержки по всей системе. Исключение субъективности и замедлений, присущих ручному управлению, позволяет существенно повысить устойчивость производственного процесса и сократить риск незапланированных остановок [2]. Именно поэтому переход от мониторинга к активному управлению следует рассматривать не как технологическую опцию, а как необходимое условие дальнейшего повышения эффективности функционирования станков и роботизированных комплексов.

Решение представленных проблем лежит в развитии системы от простого мониторинга к интеллектуальной поддержке принятия решений [3]. Интервенционный уровень цифрового сопровождения процессов – способность инициировать или рекомендовать конкретные действия, направленные на устранение проблемы. В основе данной системы лежит применение технологий предиктивной аналитики, интеграция цифровых двойников, автоматизация управленческой реакции и кросс-процессная интеграция.

Использование методов машинного обучения позволит не только фиксировать факт задержки или недозагрузки, но и прогнозировать вероятность их возникновения на основе исторических данных. Моделирование производственных процессов в виртуальной среде дает возможность тестировать управленческие решения до их внедрения, минимизируя риски [4]. В этом случае при критическом уровне вибрации шпинделя оборудование может быть остановлено в безопасном режиме до наступления аварийного отказа; при перегреве узлов станок переводится в щадящий режим работы с одновременным формированием заявки на техническое обслуживание; при снижении точности позиционирования роботизированный комплекс инициирует процедуру самокалибровки. Таким образом, вмешательство системы становится проактивным, а устранение последствий отклонений осуществляется без задержек, связанных с человеческим фактором.

Методологическое требование при переходе от фиксации к потенциальному устранению корневых причин сбоев в работе станков и роботизированных комплексов основано на интеграции данных. Системы должны объединять производственные, логистические и управленческие данные, формируя целостную картину. Это позволит видеть не только локальные симптомы, но и системные причины.

В традиционной практике каждая из подсистем (PLC, MES, ERP, WMS и др.) оперирует собственным ограниченным сегментом информации, формируя локализованное и частично фрагментарное представление о реальном состоянии производственной системы. Такое раздробление данных и процессов делает невозможным корректный причинно-следственный анализ, потому что отдельные аномалии выглядят как локальные события, тогда как их источник может лежать в логистике заготовок, проектных допущениях или управленческих решениях по расписанию. Интеграционная экосистема объединяет эти фрагменты в единую временно- и семантически увязанную модель производственной реальности, обеспечивая условия для достоверного определения первопричин и для автоматизированного, экономически обоснованного реагирования.

Таким образом, цифровые технологии подтвердили свою эффективность в диагностике и обеспечении прозрачности производственных процессов. Вместе с тем их дальнейшее развитие должно быть ориентировано на переход от фиксации информации к активному воздействию. Только в этом случае информационно-аналитические системы станут не только источником данных, но и полноценным элементом управленческой экосистемы, обеспечивающей устойчивое развитие сложных производственных комплексов. В этом контексте ключевая перспектива

цифровизации машиностроительных предприятий заключается в интеграции мониторинга с аналитикой бизнес-процессов. Производственные системы становятся полноценными элементами управленческой экосистемы, способными прогнозировать развитие бизнес-процессов, выявлять корневые причины отклонений и предлагать оптимальные сценарии решений. Именно в этом заключается стратегическая перспектива цифровизации машиностроительных предприятий.

Список литературы

1. Палкина Е. С., Постников Р. А. Цифровая трансформация производственной системы в судостроении: проблемы и способы их решения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 6. С. 107–123.
2. Немтинов В. А., Бобылев В. Ю., Немтинова Ю. В., Борисенко А. Б. Информационная поддержка принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 2. С. 220–229.
3. Ясинская Ю. В., Коваленок М. А. Разработка программного обеспечения для оптимизации производственного процесса станков с числовым программным управлением // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2022. № 3 (3). С. 78–92.
4. Зотов Е. В., Бурцев Н. С. Повышение эффективности моделирования процесса разработки технологического оснащения для штамповки деталей // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 1–3 июня 2023 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 259–264.

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Сергеевна Палкина

доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры «Инновационная
экономика», Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет (Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3)
e-mail: elena_palkina@hotmail.com

Elena S. Palkina

Doctor of economic sciences,
associate professor, professor of
the department of innovative
economics, St. Petersburg State
Marine Technical University
(3 Lotsmanskaya street,
St. Petersburg, Russia)

Юрий Михайлович Шумилов

аспирант, Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет (Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3)
e-mail: ys812@yandex.ru

Yury M. Shumilov

Postgraduate student,
St. Petersburg State Marine
Technical University
(3 Lotsmanskaya street,
St. Petersburg, Russia)

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ СТАНКОСТРОЕНИЯ

**Александр Викторович Щегольков¹,
Алексей Викторович Щегольков²,
Виктория Александровна Ельцова³,
Ярослав Владимирович Ельцов⁴**

^{1,3}Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия

⁴Московский авиационный институт (национальный
исследовательский институт), Москва, Россия

Аннотация. Улучшение функциональных возможностей средств автоматизации в станкостроении является важной и неотъемлемой частью развития машиностроительного комплекса Российской Федерации. Для создания эффективных систем автоматизации в станкостроении необходимо использовать новые типы первичных измерительных преобразователей. К таким типам преобразователей можно отнести, например, преобразователи для измерения давления и механических напряжений. Для этих целей могут быть использованы тензометрические преобразователи. Существует несколько типов тензометрических преобразователей, среди которых можно выделить: фольговые преобразователи, в основе которых используется металлический сплав; полупроводниковые преобразователи; преобразователи на основе проводящих полимерных композитов. Каждый тип обладает определенным набором преимуществ и недостатков. Следует отметить, что для создания высокочувствительных элементов наиболее перспективны новые подходы, основанные на проводящих полимерных композитах. Для создания таких композитов возможно использование наноразмерных дисперсных наполнителей, а также их комбинаций, что позволяет контролировать широкий ряд параметров. Получение широкого диапазона измерений, низкой погрешности и адаптивности к технологическому объекту является основным направлением развития в области создания тензометрических преобразователей.

Ключевые слова: проводящие полимерные композиты, тензометрические преобразователи, энергоэффективность, углеродные наноматериалы, механические напряжения

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание FZRR-2024-0003).

STRAIN GAUGE TRANSDUCERS BASED ON NANOMODIFIED COMPOSITES FOR MACHINE TOOL TECHNOLOGIES

Alexander V. Shchegolkov¹, Alexei V. Schegolkov²,
Victoria A. Yeltsova³, Yaroslav V. Yeltsov⁴

^{1,3}Tambov State Technical University, Tambov, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

⁴Moscow Aviation Institute (National Research Institute), Moscow, Russia

Abstract. Improving the functionality of automation tools in machine tool manufacturing is an important and integral part of the development of the machine-building complex in the Russian Federation. To create effective automation systems in machine tool manufacturing, it is necessary to use new types of primary measuring transducers. Examples of such transducers include pressure and mechanical stress transducers. For these purposes, strain gauge transducers can be used. There are several types of strain gauges, including foil gauges based on a metal alloy, semiconductor gauges, and gauges based on conductive polymer composites. Each type has its own set of advantages and disadvantages. It is worth noting that new approaches based on conductive polymer composites are particularly promising for creating highly sensitive elements. To create such composites, it is possible to use nanosized dispersed fillers, as well as their combinations, which allows for the control of a wide range of parameters. Obtaining a wide range of measurements, low error, and adaptability to the technological object is the main direction of development in the field of creating strain gauges.

Keywords: conductive polymer composites, strain gauge converters, energy efficiency, carbon nanomaterials, mechanical stresses

Financing: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment FZRR-2024-0003)

Инновационные подходы в технологиях создания тензOMETрических преобразователей для различных нужд, в том числе для измерения механических параметров в станках, могут быть реализованы с применением трёх основных видов материалов: металлических сплавов, полупроводников и проводящих полимерных композитов [1–3]. Все эти типы материалов обладают широким диапазоном характеристик и высоким уровнем чувствительности.

Особенно эффективно это проявляется при использовании наноматериалов. Дисперсные материалы, такие как углеродные нанотрубки и графен, могут значительно повысить электропроводность полимерных композитов при малых значениях массовой концентрации [4–6].

Регулируемые по структуре нанотрубки могут быть целенаправленно получены с помощью определённых технологических подходов, в частности, метода СВЧ-синтеза, когда соединения вроде ферроцена и графит в условиях СВЧ-воздействия трансформируются в углеродные нанотрубки, которые могут быть дополнительно функционализированы для повышения эффективности.

Преимущество таких систем, основанных на применении проводящих полимерных композитов, также заключается в возможности

контроля температурного коэффициента сопротивления – явления, которое оказывает влияние на точность измерения механических напряжений, деформаций и давления.

Использование подхода, основанного на модифицировании полимеров, эффективно и может быть массово применено, так как характеристики получаемых композитов проявляются с малым разбросом параметров. Таким образом, такие материалы могут быть эффективной заменой классических тензометрических преобразователей на основе металлических сплавов и полупроводников.

Методика и материалы

Первичный измерительный преобразователь (ПИП) на основе эластомера с МУНТ и микроразмерными структурами (бронза) подключен к мультиметру UNI-T UT61E+ (вторичный измерительный прибор (ВИП)) и механически связан с объектом измерений (ОИ). Аналоговый сигнал изменения электрического сопротивления ΔR поступал на мультиметр UNI-T UT61E+, который в свою очередь оцифровывает полученный сигнал и передает в виде таблицы значений на ноутбук HUAWEI MateBook D 15 (256GB)) (ПК-персональный компьютер). Изменение давления или механических колебаний определяется по изменению ΔR ТД.

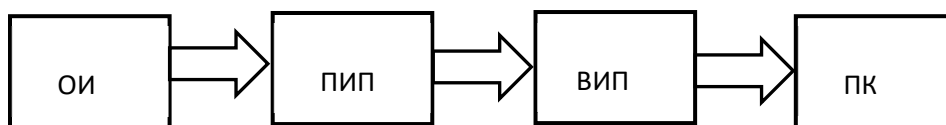


Рис. 1. Схема измерения и регистрации параметров давления или механические колебаний

Первичный измерительный преобразователь (ПИП) на основе эластомера с МУНТ и микроразмерными структурами (бронза) имеет структуру показанную на рис. 2.

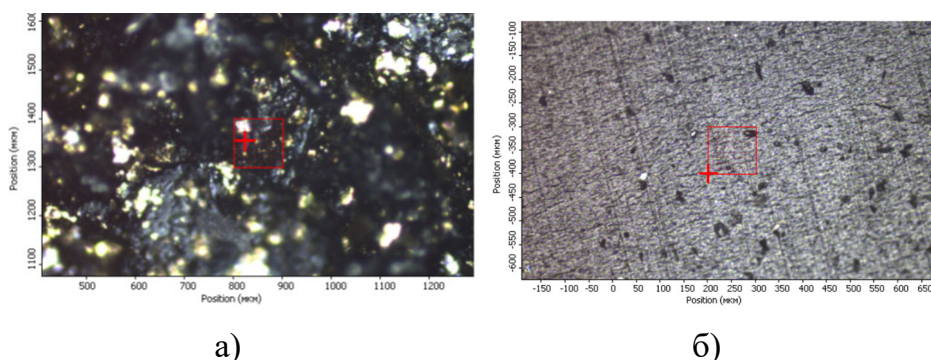


Рис. 2. Поверхность образца эластомера с добавками металлических дисперсных частиц

Путем варьирования концентрации углеродных наноструктур и металлических наполнителей можно целенаправленно изменять

ключевые характеристики тензодатчиков, такие как коэффициент преобразования и чувствительность. Важным аспектом является возможность управления температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) получаемого композита.

Заключение

Композит на основе эластичной полимерной матрицы с углеродными наноструктурами и добавками бронзы может быть использован для получения тензодатчика. Путем варьирования концентрации углеродных наноструктур и металлических наполнителей можно целенаправленно изменять ключевые характеристики тензодатчиков, такие как коэффициент преобразования и чувствительность. Схема измерения и регистрации параметров давления или механические колебаний имеет линейный вид и позволят осуществлять контроль и регистрацию быстро протекающих механических процессов, которые характерны для различных типов станков.

Список литературы

1. Štutiny E., Dzedzickis A., Samukaitė-Bubnienė U., Bučinskas V. Novel synthetic iron (III) oxide-based force sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 331. P. 113043. doi: 10.1016/j.sna.2021.113043
2. Tuli A., Singh A. P. Polymer-based wearable nano-composite sensors: a review // *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2023. Vol. 28 (2). P. 156–191. doi: 10.1080/1023666X.2022.2161737
3. Joseph J., Haseeb A. S. M. A. MEMS-Based Flexible Sensors // *Encyclopedia of Materials*. Academic Press., 2023. P. 129–137. doi: 10.1016/B978-0-12-819728-8.00132-7
4. Abubakre O. K., Medupin R. O., Akintunde I. B. [et al.]. Carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites for sustainable biomedical applications: A review // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2023. Vol. 8 (2). P. 100557. doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100557
5. Ma H., Wang J., Qian J. [et al.]. Experimental investigations of fractured rock deformation: A direct measurement method using strain gauges // *Journal of Structural Geology*. 2023. Vol. 171. P. 104869. doi: 10.1016/j.jsg.2023.104869

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Викторович Щегольков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5)
e-mail: energynano@yandex.ru

Alexander V. Schegolkov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department
of electricity, Tambov State
Technical University
(106/5 Sovetskaya street, Tambov,
Russia)

Алексей Викторович Щегольков
кандидат технических наук, доцент,
Центр научной деятельности, Передовая
инженерная школа технологического
лидерства «FDR», Московский
политехнический университет (Россия,
г. Москва, ул. Б. Семёновская, 38)
e-mail: alexxx5000@mail.ru

Alexei V. Schegolkov
Candidate of technical sciences,
associate professor, Center for
scientific activity, advanced
engineering school of technological
leadership "FDR", Moscow
Polytechnic University,
(38 B. Semyonovskaya street,
Moscow, Russia)

Виктория Александровна Ельцова
магистрант, Тамбовский
государственный технический
университет (Россия, г. Тамбов,
ул. Советская, 106/5)
e-mail: energynano@yandex.ru

Victoria A. Yeltsova
Master degree student, Tambov
State Technical University
(106/5 Sovetskaya street, Tambov,
Russia)

Ярослав Владимирович Ельцов
студент, Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, Волоколамское
шоссе, 4)
e-mail: Yaroslav032003@mail.ru

Yaroslav V. Yeltsov
Student, Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(4 Volokolamsk highway, Moscow,
Russia)

УДК 621.91.01

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАЗМЕРНОЙ НАСТРОЙКЕ ИНСТРУМЕНТА НА СТАНКАХ С ЧПУ

**Александра Викторовна Акинцева¹,
Павел Петрович Переверзев²**

^{1,2}Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема оптимизации размерной настройки станков с ЧПУ – определения координаты вершины инструмента внутри поля допуска. Отсутствие аналитической методики приводит к эмпирическим поискам, браку и потере производительности. Предложен научный подход на основе принципа баланса между допуском и суммой технологических погрешностей (базирования, износа, упругих деформаций). Разработка модели позволит автоматизировать настройку, повысить точность и стабильность обработки, что актуально для цифровизации производства.

Ключевые слова: размерная настройка станков с ЧПУ, позиционирование режущего инструмента, баланс между допуском и суммой технологических погрешностей

COMPENSATION OF TECHNOLOGICAL ERRORS IN TOOL DIMENSIONAL ADJUSTMENT ON CNC MACHINES

Aleksandra V. Akindyeva¹, Pavel P. Pereverzev²

^{1,2}South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The problem of optimizing dimensional adjustment of CNC machines is considered – determining the tool tip coordinate within the tolerance range. The lack of an analytical methodology leads to empirical trials, defects, and loss of productivity. A scientific approach is proposed, based on the principle of balance between tolerance and the sum of technological errors (setup, wear, elastic deformations). Developing a model will enable automated adjustment, improve processing accuracy and stability, which is relevant for production digitalization.

Keywords: dimensional adjustment of CNC machines, cutting tool positioning, balance between tolerance and the sum of technological errors

Размерная настройка металлорежущего оборудования с ЧПУ представляет собой критически важный этап технологической подготовки производства, от корректности выполнения которого непосредственно зависит соответствие геометрических параметров изготавливаемых деталей заданным конструкторским допускам. Ключевым аспектом данной процедуры является определение координат вершины режущего инструмента относительно границ поля допуска на операционный размер. Решение данной задачи в значительной степени влияет на точность, стабильность и производительность процесса механической обработки, оставаясь при этом сложной и не до конца решенной научно-технической проблемой.

Проведенный анализ обширного массива научно-технической литературы [1–4 и др.] свидетельствует об отсутствии универсальной инженерной методики расчета координаты вершины инструмента, которая бы комплексно учитывала влияние многообразия технологических погрешностей. В сложившейся практике решение этой задачи возлагается на оператора станка с ЧПУ, который, руководствуясь эмпирическими знаниями и интуицией, эмпирическим путем, методом пробных обработок и последующих корректировок, определяет требуемые параметры. Такой подход характеризуется высокой субъективностью, нестабильностью результатов и значительными временными затратами. Особую сложность представляет ситуация с концентрированными операциями, требующими настройки нескольких инструментов за одну установку заготовки, при ограниченном количестве пробных заготовок и напряженной производственной программе. В условиях дефицита времени оператор вынужденно занижает режимы

резания для гарантированного исключения брака, что приводит к недопустимому снижению производительности.

Сложность задачи обусловлена необходимостью компенсации в пределах заданного допуска совокупности взаимосвязанных погрешностей:

1. Нестационарность положения поля допуска. При обработке партии деталей в системе координат станка происходит случайное смещение поля допуска для каждой новой заготовки, обусловленное погрешностями базирования, закрепления, неточностью оснастки и отклонениями формы базовых поверхностей.

2. Геометрические погрешности станка. Неточность кинематики и геометрии станка вызывает неконтролируемые колебания траектории движения инструмента.

3. Погрешности позиционирования инструментальной системы. Точность установки координат вершины инструмента ограничена совокупной погрешностью, включающей неточность позиционирования привода ЧПУ, погрешность установки инструмента относительно инструментального нуля, а также отклонения его собственной геометрии.

4. Размерный износ инструмента. В процессе резания происходит механический износ инструмента, приводящий к прогрессирующему изменению формируемого размера (увеличению для наружных поверхностей).

5. Упругие деформации технологической системы. Силы резания вызывают упругие отжатия элементов системы СПИД, непосредственно влияющие на погрешность формообразования. Данная погрешность носит переменный характер и зависит от таких факторов, как затупление инструмента, колебание припуска, непостоянная жесткость системы и прерывистость резания.

Для предотвращения брака сумма всех перечисленных погрешностей не должна превышать ширины поля допуска на обрабатываемый размер. Следовательно, возникает задача оптимального позиционирования инструмента внутри этого поля, обеспечивающего необходимый резерв для компенсации каждой составляющей суммарной погрешности.

Гипотетически, экстремальное расположение инструмента у одной из границ поля допуска является неоптимальным. Так, позиционирование у нижнего предела увеличивает риск невозможности компенсации погрешностей базирования и получения размера меньше допустимого. Позиционирование у верхнего предела не оставляет запаса для компенсации износа инструмента и погрешностей его

позиционирования, приводя к выходу размера за верхнюю границу. Таким образом, существует теоретическое оптимальное положение инструмента, при котором обеспечивается баланс между компенсационными возможностями для всех видов погрешностей, что максимизирует вероятность получения годной детали на протяжении всей обрабатываемой партии.

Эмпирические методы, применяемые в настоящее время, неприемлемы для условий автоматизированного и цифрового производства. Решение проблемы требует разработки аналитической модели, основанной на принципе баланса между допуском готовой деталей и суммой технологических погрешностей. Выделим следующие взаимосвязанные подзадачи:

1. Формализация технологических взаимосвязей. Разработка аналитических моделей процесса резания, устанавливающих количественные зависимости между технологическими факторами, значимыми для размерной настройки.

2. Моделирование размерных цепей. Установление взаимосвязи между размерными цепями, возникающими при базировании заготовки и позиционировании инструмента, программным перемещением суппорта и полем допуска. Ключевым является условие, что координата вершины инструмента является общей точкой для размера, задаваемого от нуля базы заготовки, и размера, задаваемого от инструментального нуля станка.

3. Разработка расчетной модели координаты инструмента. Создание методики, основанной на принципе баланса допуска и суммы погрешностей, с интегрированными моделями размерных цепей базирования и позиционирования.

4. Учет погрешности от упругих деформаций. Особенностью данной погрешности является ее зависимость исключительно от режимов резания и жесткости СПИД. В рамках модели ее допустимая величина должна определяться как разность между полным допуском и суммой остальных погрешностей. Таким образом, рассчитанное значение этой погрешности становится ограничивающим критерием при назначении режимов резания, которые должны обеспечивать ее не превышение.

Решение описанного комплекса задач является научно-технической проблемой высокой сложности, требующей системного подхода. Однако ее успешная реализация позволит перейти от эмпирических методов к детерминированному расчету параметров режима резания, что обеспечит существенный рост стабильности качества, сокращение брака, уменьшение временных и материальных затрат на подготовку

производства. В конечном счете, это создаст основу для полной автоматизации и цифровизации этапа технологической подготовки производства в машиностроении, исключив необходимость обработки пробных заготовок и субъективные решения оператора. В настоящее время ведутся исследования, направленные на детальную проработку указанных подзадач с целью создания целостной методологии.

Список литературы

1. Заковоротный В. Л., Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 2 (160). С. 38–46.
2. Григорьев А. С. Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 1 (18). С. 39–43.
3. Каштальян И. А., Козорез А. А., Шпак А. В. Имитационная модель системы диагностирования и коррекции режущего инструмента на токарных станках с числовым программным управлением // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2010. № 8. С. 39–48.
4. Некрасов Р. Ю., Путилова У. С., Стариков А. И. [и др.] Моделирование процессов диагностики и управления обработкой на станках с ЧПУ // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2 (26). С. 54–59.

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Викторовна Акинцева
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
автоматизированного
машиностроения», Южно-Уральский
государственный университет
(Россия, г. Челябинск,
пр-кт Ленина, 76)
e-mail: akintsevaav@susu.ru

Aleksandra V. Akincheva
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the department of technology of
automated mechanical engineering,
South Ural State University (76 Lenin
avenue, Chelyabinsk, Russia)

Павел Петрович Переверзев
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технологии
автоматизированного
машиностроения», Южно-Уральский
государственный университет (Россия,
г. Челябинск, пр-кт Ленина, 76)
e-mail: pereverzevpp@susu.ru

Pavel P. Pereverzev
Doctor of technical sciences, associate
professor, professor
of the department of technology of
automated mechanical engineering,
South Ural State University
(76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЖЕСТКОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Виктор Иванович Гузеев¹,
Антон Халилевич Нуркенов²,
Егор Владимирович Нестерюк³**

^{1,2,3}Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

Аннотация. Проведена серия экспериментальных исследований, устанавливающих влияние положения рабочего органа робота на амплитуду и частоту вибраций при фрезеровании в 25 точках вдоль осей X и Y , а также на 5 высотах по оси Z . Результаты, полученные в ходе эксперимента, позволили построить поля жесткости для обрабатывающего робототехнического комплекса. В дальнейшем результаты исследования будут направлены на создание методики прогнозирования жесткости для назначения предельных режимов обработки, обеспечивающих заданную точность для конкретной технологической системы на базе робототехнического комплекса.

Ключевые слова: механическая обработка, фрезерование, роботизированный комплекс, микроперемещения, промышленный робот

FORMATION OF THE RIGIDITY FIELD OF THE ROBOTIC MACHINING COMPLEX BASED ON AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM

**Viktor I. Guzeev¹, Anton K. Nurkenov²,
Egor V. Nesteryuk³**

^{1,2,3}South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. A series of experimental studies was conducted to determine the effect of the robot's working element position on the vibration amplitude and frequency during milling at 25 points along the X and Y axes, as well as at 5 heights along the Z axis. The experimental results allowed us to construct stiffness fields for a robotic machining complex (RMC). These results will be used to develop a stiffness prediction method for assigning limiting machining modes that ensure the specified accuracy for a specific RMC-based technological system.

Keywords: mechanical processing, milling, robotic complex, micro-movements, industrial robot

Введение

В машиностроительной отрасли наблюдается тенденция к замене дорогостоящих обрабатывающих центров на робототехнические комплексы (РТК) для обработки крупногабаритных деталей. Однако широкое внедрение роботов в процессы механообработки сдерживается проблемой обеспечения заданной точности [1], непосредственно связанной с недостаточной жесткостью технологической системы.

Важно отметить, что требования к РТК значительно варьируются в зависимости от задач. Для малоответственных операций (покраска, сортировка, сварка [2], удаление заусенцев [3] критическим параметром является повторяемость, а не абсолютная точность. Это отражается и в практике производителей: если ранее требования к роботам были менее строгими, то сегодня они все чаще следуют стандарту ISO 9283 [4]. Иная ситуация возникает при механической обработке материалов, где именно точность [5] и жесткость технологической системы (ТС) [6] становятся определяющими факторами. При этом производители роботов редко указывают эти ключевые параметры, что создает существенную проблему [7] для технологического планирования.

Вопрос повышения жесткости и точности РТК изучается с 1980-х годов. Для решения задачи метрологического обеспечения созданы методы калибровки и юстировки с применением современного 3D [8, 9] и 6D [10] измерительного оборудования. Однако основным препятствием остается высокая стоимость такого оборудования (например, лазерных трекеров, чья цена превышает 100 000 долларов), делающая его малодоступным для большинства предприятий.

Цель эксперимента – оценить влияние вылета манипулятора KUKA KR-250 на жесткость технологической системы и вибрации. Методика включает применение вибростенда для генерации возмущений с заданными параметрами в различных точках рабочей зоны. Полученные данные позволят построить матрицу для прогнозирования жесткости системы.

Для проведения исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Разработать и установить специальное приспособление для сопряжения возбудителя колебаний (вибростенда) с неподвижной частью шпинделя робототехнического комплекса (РТК).
2. Обеспечить монтаж измерительной аппаратуры (датчиков вибраций) на конструктивных элементах РТК для сбора данных.

3. Провести серию импульсных нагрузок для измерения вибраций шпинделя в плоскости XY на рабочей области 1200×1200 мм в диапазоне высоты по координате Z от 0 до 500 мм.

4. На основе полученных экспериментальных данных выполнить расчет жесткости технологической системы для различных положений манипулятора РТК в рабочем пространстве

Монтаж виброиспытательного оборудования

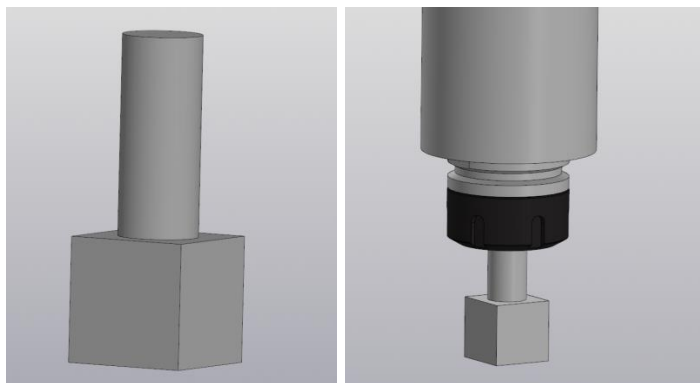
Был установлен электродинамический вибростенд SHAKER в рабочих положениях в пределах рабочей области 1200×1200 мм (рис. 1).



Рис. 1. Установка вибростенда SHAKER

Разработка и изготовление технологической оснастки

Для осуществления эксперимента было спроектировано приспособление, позволяющее имитировать процесс фрезерования с заданной постоянной нагрузкой за счет привода SHAKER. 3D модель приспособления и его установка в шпинделе представлена на рис. 2, а, б соответственно



а) приспособление

б) установка в сборе

Рис. 2. Способ крепления привода к приспособлению в шпинделе РТК

Интеграция измерительной системы

Рабочий привод SHAKER крепится к неподвижной части шпинделя РТК, а датчики LMS SCADAS Mobile на неподвижной части шпинделя (рис. 3).

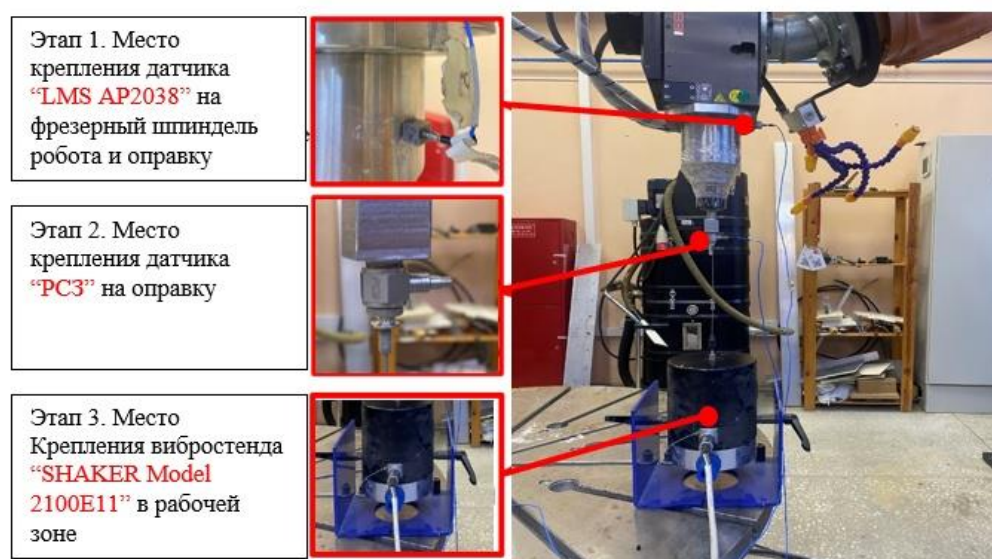


Рис. 3. Этапы

Проведение экспериментальных измерений

На основе данных предыдущего эксперимента (табл. 1), содержащих зависимости пиковых значений, были заданы параметры в программном обеспечении вибростенда. Проведены измерения вибраций вдоль осей X и Y (рис. 4) в 25 точках рабочей зоны (рис. 5) с шагом 100 мм по высоте.

Таблица 1

Исходные данные пиковых значений жесткости вибростенда, полученные при обработке резанием

Един. из- мер.	Расположе- ние датчика		Положение1				Положение2				Положение3			
			+Y	+X	−Y	−X	+Y	+X	−Y	−X	+Y	+X	−Y	−X
			Глубина обработки L = 1,5мм											
Н/м	деталь	max	0,229	0,130	0,248	0,132	0,500	0,182	0,397	0,232	0,360	0,328	0,242	0,326
		min												
Н/м	шпин- дель	max	0,504	0,437	0,546	0,709	0,341	0,305	0,402	0,315	0,254	0,322	0,223	0,289
		min												
Н	сила	max	25,40	14,95	11,70	30,36	21,45	14,45	10,45	13,15	17,99	10,15	10,88	5,617
		min	6,106	9,524	3,167	2,581	3,316	4,726	5,686	2,825	3,538	3,784	4,274	2,881
			Глубина обработки L = 3мм											
Н/м	деталь	max	0,483	0,66	0,675	0,363	5,333	3,648	7,67	5,12				
		min	0,236	0,29	0,252	0,258	1,36	1,769	3,42	1,41				
Н/м	шпин- дель	max	0,446	0,374	0,392	0,490	0,174	0,249	2,017	0,199	0,541	0,212	0,577	0,199
		min	0,294	0,269	0,261	0,230	0,142	0,144	1,378	0,120				
Н	сила	max	32,48	24,09	24,02	42,44	78,84	54,01	92,89	63,02	20,4	30,19	23,41	32,32
		min	2,783	15,03	10,43	1,371	12,70	31,52	7,284	22,01	4,067	19,39	22,36	1,174

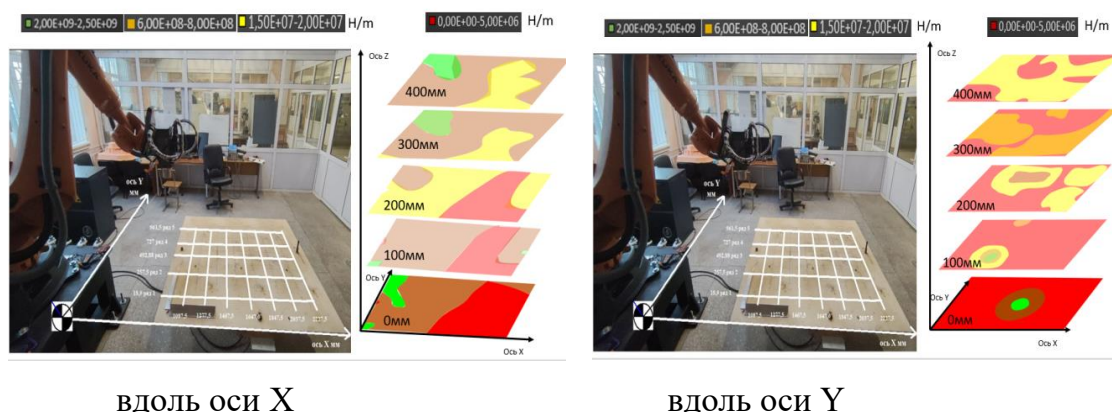


Рис. 7. Поле изменения жесткости ТС в зависимости от положения РТК

Выводы:

1. Распределение жесткости технологической системы по оси X демонстрирует выраженную линейную зависимость от положения манипулятора, что позволяет использовать прогнозные модели для оптимизации позиционирования заготовки и выбора режимов обработки.
2. Характер распределения жесткости по оси Y имеет существенно нелинейный характер, что требует применения консервативного подхода к выбору режимов обработки – с ориентацией на наихудшие условия позиционирования заготовки в рабочей зоне.
3. Разработанная методика оценки пространственного распределения жесткости показала свою эффективность для предварительного тестирования технологических систем на базе РТК и может быть использована для определения предельных режимов обработки с учетом вибродинамических характеристик.

Список литературы

1. Вартанов М. В., Зизина И. Н., Зотин Д. О. Применение программного обеспечения Robotstudio при создании планировок роботизированных ячеек для механообработки // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : сб. тр. конф. Севастополь : Изд-во СевГУ, 2017. С. 104–106.
2. International Federation of Robotics. World Robotics 2012 : statistical yearbook. 2013.
3. Иванова, А. В., Пономарёва Б. Б., Савилов А. В. [и др.]. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей // Вестник ИРНИТУ. 2013. № 11 (82). С. 49–53.
4. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots Performance criteria and related test methods // International Standard under systematic review. Ed. 2. Published Stage, 1998. Vol. 90.20.

5. Саранин Л. Г., Маленко П. И., Захаров С. К. [и др.]. Изготовление литейного модельного комплекта с применением станка-робота FANUC // Известия Тульского университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 519–527.
6. Еникеев Б. А., Сайдуганов А. Р., Акмаев О. К., Кудояров Р. Г. Экспериментальные исследования жесткости станка-робота // Станкостроение и инновационное машиностроение : материалы Всерос. науч.-техн. конф. Уфа : Изд-во УГАТУ, 2019. С. 273–276.
7. Schneider U., Ansaloni M., Drust M. [et al.]. Experimental investigation of error sources in robot machining // International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM). Porto, Portugal, 2013. P. 14–26.
8. Bo T., XingWei Z., Han D. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study // Science China Technological Sciences. 2019. Vol. 62, № 8. P. 1388–1400.
9. Wu1 K., Krewet C., Bickendorf J., Kuhlenkoetter B. Dynamic performance of industrial robot with CNC controller // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 90, № 5-8. P. 2389 –2395.
10. Zaeh M. F., Improvement of the machining accuracy of milling robots // Production Engineering. 2014. Vol. 8, № 6. P. 737–744.
11. Нуркенов А. Х., Гузеев В. И., Батуев В. В. [и др.]. Экспериментальное исследование жесткости технологической системы на базе промышленного робота KUKA KR 300 R2500 ULTRA // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Машиностроение. 2022. Т. 22, № 1. С. 48–58. doi: 10.14529/engin220104 EDN: WAGVXZ
12. Гузеев В. И., Сергеев С. В., Нуркенов А. Х. [и др.] // Исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса для реализации методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. 2023. Т. 21, № 1. С. 45–54. doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54 EDN: HBPU

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Иванович Гузеев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технологии
автоматизированного машиностроения»,
Южно-Уральский государственный
университет (Россия, г. Челябинск,
пр-кт Ленина, 76)
e-mail: guzeevvi@susu.ru

Viktor I. Guzeev

Doctor of technical sciences,
professor, head of the department
of controlled mechanical engineering
technologies, South Ural State
University (76 Lenin avenue,
Chelyabinsk, Russia)

Антон Халилович Нуркенов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии
автоматизированного машиностроения»,
Южно-Уральский государственный
университет (Россия, г. Челябинск,
пр-кт Ленина, 76)
e-mail: nurkenovak@susu.ru

Anton K. Nurkenov

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
automated mechanical engineering
technologies, South Ural State
University (76 Lenin avenue,
Chelyabinsk, Russia)

Егор Владимирович Нестерюк
аспирант, Южно-Уральский
государственный университет
(Россия, г. Челябинск,
пр-кт Ленина, 76)
e-mail: E1g9o9r@mail.ru

Egor V. Nesteryuk
Postgraduate student, South Ural
State University (76 Lenin avenue,
Chelyabinsk, Russia)

УДК 621.357.7:621.9.01

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ФЕРРАТА БАРИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В СТАНКОСТРОЕНИИ

**Сергей Юрьевич Киреев¹,
Владимир Николаевич Штепа²,
Константин Сергеевич Шинкевич³,
Владислав Алексеевич Крылов⁴,
Наталья Владленовна Камардина⁵,
Марина Александровна Маркина⁶,
Алексей Сергеевич Балыбердин⁷**

^{1,4,5,6,7} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{2,3} Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена разработка технологии утилизации отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) с использованием феррата бария (BaFeO_4), синтезированного электрохимическим методом. Рассмотрены традиционные методы утилизации СОЖ (сжигание, биodeградация, коагуляция) и их недостатки. Предложен электрохимический синтез BaFeO_4 на основе анодного окисления железа в щелочной среде с добавлением солей бария, обеспечивающий выход продукта 75–80 %. Экспериментальные результаты показывают эффективность удаления органических веществ (85–95 %), металлов (80–90 %) и микроорганизмов (до 99 %) из отработанных СОЖ. Технология сочетает экологичность, низкую стоимость и возможность интеграции в станкостроительные производства.

Ключевые слова: отработанные СОЖ, утилизация, феррат бария, электрохимический синтез, окисление, коагуляция, обеззараживание, эффективность

DEVELOPMENT OF ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF BARIUM FERRATE FOR WASTE COOLANT UTILIZATION IN MACHINE BUILDING

Sergey Yu. Kireev¹, Vladimir N. Shtepa²,
Konstantin S. Shinkievich³, Vladislav A. Krylov⁴,
Natalia V. Kamardina⁵, Marina A. Markina⁶,
Alexey S. Balyberdin⁷

^{1,4,5,6,7}Penza State University, Penza, Russia

^{2,3}Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article presents the development of technology for the disposal of spent cutting fluids (CF) using barium ferrate (BaFeO_4) synthesized by electrochemical method. Traditional methods of CF disposal (combustion, biodegradation, coagulation) and their disadvantages are considered. An electrochemical synthesis of BaFeO_4 based on anodic oxidation of iron in an alkaline environment with the addition of barium salts has been proposed, providing a product yield of 75–80 %. Experimental results show the effectiveness of removing organic substances (85–95 %), metals (80–90 %), and microorganisms (up to 99 %) from spent cutting fluids. This technology combines environmental friendliness, low cost, and the ability to integrate into machine-building production.

Keywords: spent lubricant, disposal, barium ferrate, electrochemical synthesis, oxidation, coagulation, disinfection, efficiency

Введение

Отработанные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) представляют значительную экологическую проблему в станкостроении и металлообработке. Ежегодный объем отходов СОЖ в России превышает 100 тыс. тонн, содержащих масла, эмульгаторы, бактерии и тяжелые металлы, что приводит к загрязнению почв и водоемов [1]. Традиционные методы утилизации не всегда эффективны: сжигание генерирует токсичные газы, биodeградация медленна, а коагуляция требует больших объемов реагентов. В поисках альтернатив мы обратили внимание на ферраты (Fe(VI)), особенно феррат бария (BaFeO_4), который сочетает окислительные, коагуляционные и дезинфицирующие свойства без образования вредных побочных продуктов [2].

Цель работы – разработка технологии утилизации СОЖ с использованием BaFeO_4 , полученного электрохимически, с оценкой ее эффективности в лабораторных условиях.

Обзор методов утилизации отработанных СОЖ

Утилизация СОЖ включает физические, химические и биологические методы, каждый из которых имеет свои ограничения.

1. Сжигание. Отработанные СОЖ сжигают в специализированных установках при 800–1200°C, что позволяет уничтожить органику и бактерии [3]. Преимущества: полное разложение (эффективность 95–99 %), возможность рекуперации энергии. Недостатки: высокие энергозатраты (до 5–10 кВт·ч/кг), эмиссия диоксинов и NO_x, необходимость в дорогом оборудовании с газоочисткой. Метод не подходит для малых предприятий из-за экологических рисков.

2. Биodeградация. Микроорганизмы разлагают органику в аэротенках или биореакторах [4]. Преимущества: низкая стоимость (0,5–2 руб./л), экологичность без химикатов. Недостатки: длительность процесса (7–30 дней), неэффективность против устойчивых эмульсий и металлов (удаление <70 %), чувствительность к pH и температуре, риск вторичного загрязнения биомассой.

3. Коагуляция и флокуляция. Добавление коагулянтов (соли Al, Fe) осаждает эмульсии [5]. Преимущества: быстрота (1–2 ч), удаление взвесей на 80–90 %, простота. Недостатки: большой объем осадка (до 20 % от объема СОЖ), необходимость в реагентах (увеличивает стоимость на 30–50 %), неполное удаление растворенных веществ и бактерий.

Эти методы часто комбинируют, но они не решают проблему комплексно. Ферраты предлагают альтернативу: окисление органики до CO₂ и H₂O, коагуляцию металлов и дезинфекцию без галогенов [2].

Разработка технологии утилизации СОЖ с помощью феррата бария

Мы выбрали феррат бария из-за его стабильности (в отличие от Na₂FeO₄ или K₂FeO₄) и способности к селективному окислению [6]. Синтез BaFeO₄ проводили электрохимически: анод – железная стружка (Ст3, фракция 0,5–1 мм), катод – нержавеющая сталь (08X18H10T), электролит – 1–2 М NaOH с добавлением Ba(OH)₂ (0,5–1 М), плотность тока 5–15 мА/см², температура 25–30 °C, мембрана – полипропиленовая перегородка. Реакция: $\text{Fe} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{FeO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^-$, затем осаждение с Ba²⁺. Выход – 75–80 %, подтвержденный спектрофотометрией ($\lambda = 510$ нм).

Для утилизации СОЖ (отработанная эмульсия с 5–10 % масла, pH 8–9, бактерии 10⁶ КОЕ/мл) добавляли BaFeO₄ (5–20 мг/л Fe(VI)) при перемешивании (30–60 мин). Механизм: окисление углеводов, коагуляция Fe(OH)₃, дезинфекция.

Результаты экспериментов

В лабораторных тестах (объем СОЖ 100–200 мл) эффективность зависела от дозы BaFeO₄. При 10 мг/л Fe(VI): удаление масла – 92 % (анализ рефрактометрией), металлов (Pb, Cu) – 85–90 % (ААС),

бактерий – 98 % (турбидиметрия). Время – 45 мин, pH после – 7–8. Без феррата удаление <50 %. Выход BaFeO_4 – 78 % при токе 10 мА/см².

Обсуждение

Технология превосходит традиционные: нет токсичных газов, осадок минимален (5–10 %), стоимость реагентов снижена за счет стружки (на 80 %). Электрохимия позволяет синтез *in situ*, интегрируя в станки. Недостатки: стабильность BaFeO_4 (разлагается за 1–2 ч в воде), энергозатраты (3–5 кВт·ч/кг). Перспективы: комбинация с мембранной фильтрацией.

Заключение

Разработанная технология утилизации СОЖ с BaFeO_4 эффективна и экологична, подходя для станкостроения. Дальнейшие исследования – масштабирование и интеграция в производство.

Список литературы

1. Харитоненко А. Л., Соловьева В. Я. Экологические аспекты при утилизации отработанных охлаждающих жидкостей // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 3. С. 721–730.
2. Licht S., Naschitz V., Wang B. Rapid chemical synthesis of the barium ferrate super-iron Fe (VI) compound, BaFeO_4 // Journal of Power Sources. 2002. Т. 109, № 1. С. 67–70.
3. Garcia-Segura S. [et al.]. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2017. Т. 801. С. 267–299.
4. Moreira F. C. [et al.]. Electrochemical advanced oxidation processes: a review on their application to synthetic and real wastewaters // Applied Catalysis B: Environmental. 2017. Т. 202. С. 217–261.
5. Alsheyab M., Jiang J. Q., Stanford C. On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment—A review // Journal of Environmental Management. 2009. Т. 90, № 3. С. 1350–1356.
6. Sharma V. K. Ferrate (VI) and ferrate (V) oxidation of organic compounds: Kinetics and mechanism // Coordination Chemistry Reviews. 2013. Т. 257, № 2. С. 495–510.
7. Chaplin B. P. Advantages, disadvantages, and future challenges of the use of electrochemical technologies for water and wastewater treatment // Electrochemical water and wastewater treatment. Butterworth-Heinemann, 2018. С. 451–494.
8. Sirés I. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Т. 21, № 14. С. 8336–8367.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Юрьевич Киреев

доктор технических наук, профессор,
декан факультета промышленных
технологий, электроэнергетики и
транспорта, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: sergey58_79@mail.ru

Sergey Yu. Kireev

Doctor of technical sciences,
professor, dean of the faculty of
industrial technologies, electric
power engineering and transport,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Владимир Николаевич Штепа

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедры «Безопасность
жизнедеятельности», Белорусский
государственный технологический
университет (Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Свердлова, 13А)
e-mail: tppoless@mail.ru

Vladimir N. Shtepa

Doctor of technical sciences,
associate professor, head of the
department of life safety, Belarusian
State Technological University
(13A Sverdlova street, Minsk,
Republic of Belarus)

Константин Сергеевич Шинкевич

студент, Белорусский государственный
технологический университет
(Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Свердлов, а 13А)
e-mail: tppoless@mail.ru

Konstantin S. Shinkevich

Student, Belarusian State
Technological University
(13A Sverdlova street, Minsk,
Republic of Belarus)

Владислав Алексеевич Крылов

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: tppoless@mail.ru

Vladislav A. Krylov

Student, Penza State (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Наталья Владленовна Камардина

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Техносферная
безопасность», Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: alisa-melafon@mail.ru

Natalia V. Kamardina

Candidate of technical sciences,
associate professor of the department
of technosphere safety, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Марина Александровна Маркина

студентка, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: marina.markina.6405@mail.ru

Marina A. Markina

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Сергеевич Балыбердин

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: bwa704lgmail.com

Alexey S. Balyberdin

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА СТАНКА 16K25Б НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУДО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПОДШИПНИКОВ

**Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Кирилл Васильевич Кривоносов²,
Илья Вячеславович Черепенников³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается способ диагностирования подшипникового узла станка 16K25Б на основе анализа амплитудно-частотных характеристик акустического сигнала подшипников, предложен способ выявления частотных диапазонов диагностирования. Описана методика получения и фиксации сигнала. Проведен анализ амплитудно-частотных характеристик по коэффициенту вариации.

Ключевые слова: диагностика, подшипник, станок, сигнал, диапазон, частота, эмиссия, анализ, коэффициент вариации

DIAGNOSTICS OF THE BEARING UNIT OF THE 16K25B MACHINE BASED ON ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE BEARING ACOUSTIC SIGNAL

**Alexander E. Zverovshchikov¹, Kirill V. Krivonosov²,
Ilya V. Cherepennikov³**

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This paper examines a method for diagnosing the bearing assembly of a 16K25B machine tool based on an analysis of the amplitude-frequency characteristics of the bearings' acoustic signal. A method for identifying diagnostic frequency ranges is proposed. A technique for obtaining and recording the signal is described. An analysis of the amplitude-frequency characteristics is performed using the variation coefficient.

Keywords: diagnostics, bearing, machine, signal, range, frequency, emission, analysis, variation coefficient

Организация эффективной системы диагностики промышленного оборудования выступает ключевым фактором обеспечения его длительной и безаварийной эксплуатации, а также быстрого устранения неисправностей вышедшего из строя оборудования. Для получения данных отражающие признаки неисправности предлагается использование метода диагностики по виброакустическому сигналу.

Выбор частотных диапазонов диагностирования основан на методах акустического контроля, анализирующих параметры волн упругих колебаний, возбуждаемых в объекте (активные методы) или возникающих в нём (пассивные методы) [1].

Для оптимизации сигнала и отделения шумовых помех, выбирается наивысшая из доступных частот, обеспечивающая достаточный уровень виброакустического сигнала, для достаточной диагностики объекта исследования и его акустической эмиссии – коробка передач токарного станка 16K25Б [2].

Для диагностирования выбран частотный диапазон звуковых сигналов до 8000Гц, однако априорный анализ частот проводится в диапазоне от 43Гц до 22000Гц. Анализ проводился по уровню шума в децибелах [3].

Для регистрации и последующей обработки сигналов был разработан и собран лабораторный стенд.

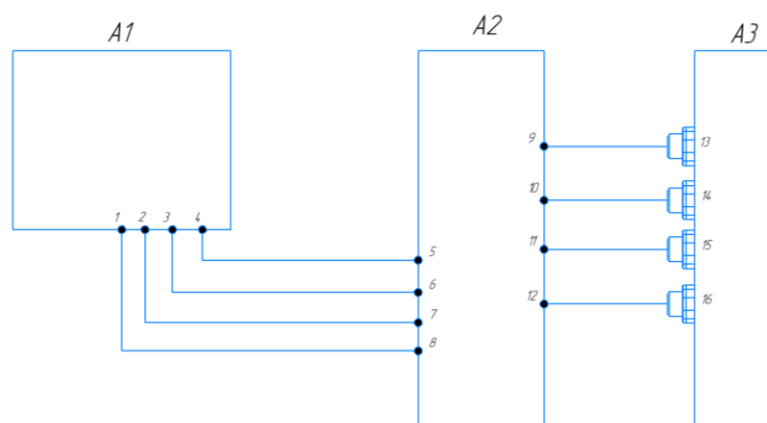


Рис. 1. Принципиальная аппаратная схема диагностического комплекса (A1 – компьютер, A2 – многоканальный микшер, A3 – исследуемый узел станка, 1-16 – подключения)

Одновременное получение сигналов с 5 датчиков обеспечивалось при помощи дополнительного программного обеспечения и многоканального микшера [4]. Зонирование датчиков (рис. 2) выполнено с точностью отклонения зоны при смене диагностируемого станка 0,5 мм [5].



Рис. 2. Место лоцирования 1, 2 и 5 датчика



Рис. 3. Место лоцирования 3 датчика

Для всех интервалов анализируемой АЧХ рассчитывался средний коэффициент вариации, для анализа отбирались интервалы, у которых коэффициент вариации превышает средний. Из этих интервалов отбирались те, у которых коэффициент вариации находился в верхней трети размаха от максимума. Было принято допущение, основанное на личном опыте сборщика, что именно разница шумов является значимой для выявления дефектов.

Таким образом, по коэффициенту вариации определялись пики, по которым выбраны диапазоны для диагностики.

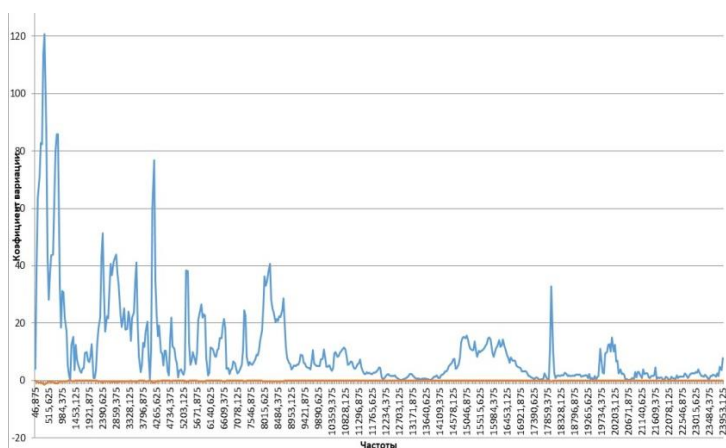


Рис. 4. Зависимость коэффициента вариации в разных локациях коробки передач станка на всём диапазоне частот

Разработана программа расчёта частот подшипников, в которой по математическим формулам составлена таблица, где по параметрам подшипника определяются основные резонансные частоты для каждой

составляющей подшипника. В таблице частот выделялись рабочие частоты подшипников, по выделенным диапазонам частот выбирались уровни сигналов от каждого станка, по которым высчитываются: разность, среднее квадратичное, поле рассеивания, коэффициент вариации и дисперсия.

Была принята гипотеза, что распределение величин амплитуд узлов исправного оборудования, подчиняется нормальным законам, соответственно с этим определялось допустимое значение поля рассеивания, по которому можно судить о ресурсе узла [6].

На рис. 5 представлено установленное нормальное значение сигнала в дБ и его верхние и нижние предельные отклонения, для различных групп подшипников.

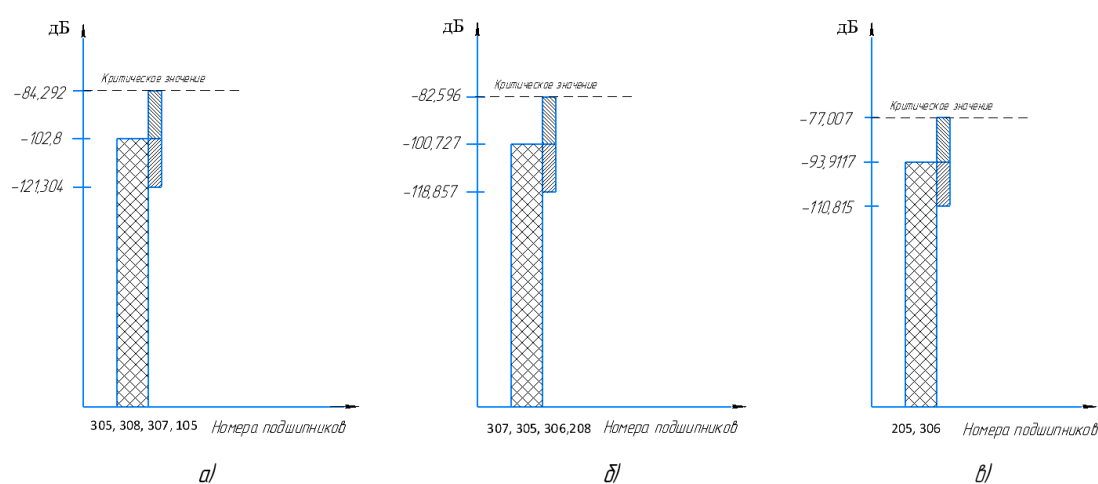


Рис. 5. Рабочие и критические частоты и уровни шума подшипниковых узлов. Для подшипников:
а) 305, 308, 307, 105; б) 307, 305, 306, 208; в) 205, 306

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о работоспособности и применимости виброакустического сигнала, в качестве способа диагностирования промышленного оборудования. Выбранные диапазоны частот дают информативные данные по которым можно с помощью разработанных математических программ анализировать состояние ресурс и прогнозировать появление неисправностей. Определена методика выделения частоты диагностирования. Для всех интервалов АЧХ рассчитан средний коэффициент вариации, что позволило определять пики, по которым выбраны диапазоны для диагностики. Разработаны программы расчёта частотной области для передней бабки станка, выделены рабочие частоты, на которые определены их критические значения для различных групп подшипников.

Список литературы

1. Оглезнева Л. А. Акустические методы контроля и диагностики : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 292 с.
2. Маслов Г. Г., Дидманидзе О. Н., Цибулевский В. В. Оптимизация параметров и режимов работы машин методами планирования эксперимента : учеб. пособие. М. : Триада, 2007. 292 с.
3. Бабкина В. С. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерения виброперемещения, виброскорости и виброускорения в диапазоне частот $3 \cdot 10^{-1} \div 10^4$. М. : Изд-во стандартов, 1990. 8 с.
4. Козочкин М. П. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования : учеб. пособие. М. : Лань, 2021. 240 с.
5. Ефимов А. П., Никонов А. В., Сапожков М. А., Шоров В. И. Акустика : справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 336 с.
6. Жецкий В. Е. Методические рекомендации по применению датчиков вибрации, методам обработки полученных данных и способам диагностики состояния оборудования на основе данных виброизмерений. Омск : Микроникс, 2004. 73 с.

Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Евгеньевич
Зверовщиков**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of
mechanical engineering technologies
and equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Васильевич Кривоносов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: kirill.pnz55@gmail.com

Kirill V. Krivonosov

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Илья Вячеславович Черепенников

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail:
vasya.cherepennikov@yandex.ru

Илья V. Cherepennikov

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

Александр Евгеньевич Зверовщиков¹,
Илья Вячеславович Черепенников²,
Кирилл Васильевич Кривоносов³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Рассматривается способ определения частотных спектров, характеризующих процесс резания при токарной обработке конструкционной стали. Проведен двухфакторный эксперимент, в результате которого получены амплитудно-частотные характеристики сигнала, полученного при резании с образованием сливной и сегментной стружки, а также амплитудно-частотные характеристики холостого хода. Рассчитаны силы резания на заданных режимах обработки. Проведен анализ амплитудно-частотных характеристик, полученных в результате эксперимента, и выявлены частотные спектры, характеризующие процесс резания.

Ключевые слова: акустическая контроль, режущий инструмент, резец, процесс резания, токарный станок, спектр, амплитуда, частота, подача, датчик

ACOUSTIC MONITORING OF THE CUTTING PROCESS ON LATHES

Alexander E. Zverovshchikov¹, Ilya V. Cherepennikov²,
Kirill V. Krivonosov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This article examines a method for determining the frequency spectra characterizing the cutting process during turning of structural steel. A two-factor experiment was conducted, which yielded the amplitude and frequency characteristics of the signal generated during continuous and segmented chip formation, as well as the amplitude and frequency characteristics of the idle stroke. Cutting forces were calculated for given machining conditions. The amplitude and frequency characteristics obtained in the experiment were analyzed, and the frequency spectra characterizing the cutting process were identified.

Keywords: acoustic monitoring, cutting tool, cutter, cutting process, lathe, spectrum, amplitude, frequency, feed, sensor

Цель работы – определить частотные спектры характеризующие процесс резания.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на определение частотных спектров характеризующих процесс резания, был выбран универсальный токарно-винторезный станок 1А625.

Обрабатываемый материал: сталь 45 ГОСТ 1050-2013.

Для осуществления процесса резания на данном станке в качестве обрабатываемой заготовки был выбран круг Ø44 мм сталь 45 ГОСТ 1050–2013 в состоянии поставки.

В качестве режущего инструмента выступает правый проходной упорный резец со сменной многогранной пластинкой (СМП) *PTGNR2525M22* ГОСТ 24996–81 и СМП 01114-220408 (*TNUM-220408*) ГОСТ 19046-80, сплав ВК8 ГОСТ 3882–74.

Пьезоэлектрический датчик необходимо располагать как можно ближе к зоне резания, чтобы минимизировать затухание высокочастотного спектра сигнала [1, 2]. Идеальный вариант – расположить датчик непосредственно на режущей пластине, однако это невозможно ввиду больших размеров пьезоэлектрического датчика, а также из-за особенностей процессов резания, таких как высокая температура и стружкоотделение.

Принято решение, что корпусной датчик будет закреплен на пластине, изготовленной из конструкционной стали 3 ГОСТ 380–2005 размером 110x100x10 мм, поверхности которой предварительно подготовлена. Один конец пластина консольно закреплена в резцедержателе станка, под резцом. Способ закрепления представлен на рис. 1.



Рис. 1. Способ закрепления корпусного датчика

Для выявления частотных спектров, характеризующих процесс резания, было предложено провести двухфакторный эксперимент:

1-й варьируемый фактор – тип стружки: сливная или элементная.

2-й варьируемый фактор – тип хода: рабочий или холостой ход.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 1, где фактор X_1 характеризует тип стружки, а X_2 характеризует тип хода. Значение фактора X_1 : +1 – элементная стружка; –1 – сливная стружка. Значение фактора X_2 : +1 – рабочий ход; –1 – холостой ход.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

№	X_1	X_2	$Y(X_1; X_2)$
1	+1	+1	Y_1
2	–1	+1	Y_2
3	+1	–1	Y_3
4	–1	–1	Y_4

Опытным путем для заданных условий резания были подобраны режимы резания для образования сливной и элементной стружки, полученные данные представлены в табл. 2. Полученные образцы стружки представлены на рис. 2.

Таблица 2

Режимы резания

Тип стружки	Режимы резания			
	$n, \text{мин}^{-1}$	$S, \text{мм/об}$	$t, \text{мм}$	$d, \text{мм}$
Элементная (надлома)	500	0,61	1,25	44
Сливная	500	0,15	1,25	44



Рис. 2. Образцы стружки:
слева – сливная; справа – элементная

Для данных режимов резания рассчитана скорость и сила резания по классическим формулам [3], полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Скорость и сила резания

Тип стружки	V , м/мин	P , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
Элементная (надлома)	69,08	1916	1098	617	1144
Сливная	69,08	669	384	215	504

По результатам проведенных экспериментов, были получены АЧХ процессов резания и построен график, изображенный на рис. 3.

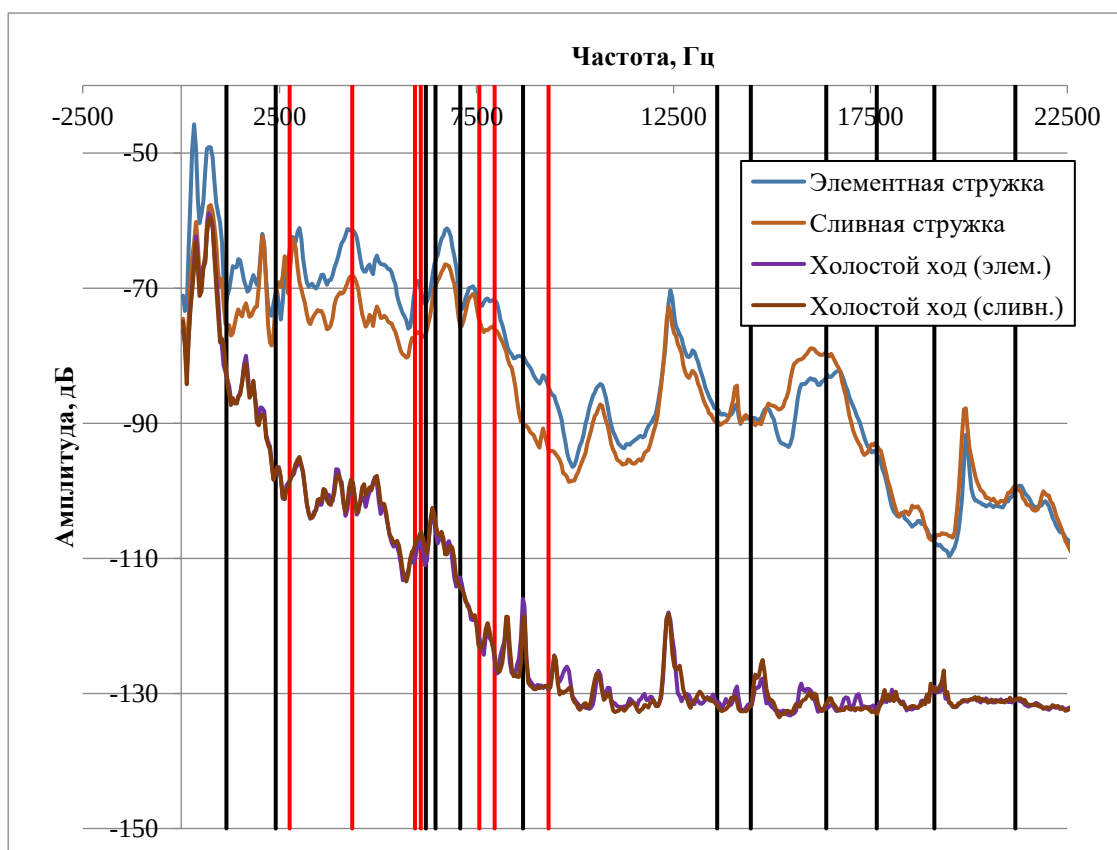


Рис. 3. АЧХ экспериментальных данных

В программе КОМПАС-3D при помощи приложения *APM FEM* были определены резонансные частоты корпуса датчика и стальной пластины, на которой закрепляется датчик. Полученные данные были нанесены на график: красные линии резонансным частотам корпуса датчика и черные вертикальные линии соответствуют резонансным частотам стальной пластины (рис. 3).

Анализируя построенный график (рис. 3) можно заключить, что на участке от 0 до 7500 Гц прослеживается визуальное сходство формы огибающей, различия состоят лишь в величине амплитуды. Записываемый акустический сигнал станка является совокупностью акустических сигналов работы механизмов станка (характеризуемого сигналом холостого хода) и процесса резания. Ввиду естественного износа токарного станка в кинематических связях механизмов образуются зазоры и износ, которые под нагрузкой проявляются в увеличении уровня шума, с чем и связано увеличение амплитуды сигнала как при осуществлении процесса резания, по сравнению с холостым ходом станка. Также видно, что амплитуда сигнала в процессе резания с получением элементной стружки больше на 8 дБ (4780 Гц), чем при резании с получением сливной стружки, что связано с увеличившейся нагрузкой на станок, в результате увеличившейся силы резания в 2,89 раза [4].

На участках от 7500 до 10 000 Гц и от 15 000 до 19 000 Гц наблюдаются серьезные отличия формы огибающей сигнала по сравнению с работой станка при осуществлении процесса резания и с работой станка на холостом ходу [5]. Разность амплитуд сигнала при формировании элементной и сливной стружки на вышеупомянутых участках изменяется нелинейно, что характеризует разные условия стружкообразования, стружкоотделения и схода стружки с резца, влияние данных факторов как раз и отражается на величине амплитуды определенных спектров.

Исходя из вышесказанного, выделенные участки от 7500 до 10 000 Гц и от 15 000 до 19 000 Гц характеризуют процесс резания, в дальнейшем данные участки и будут использованы для оценки акустического сигнала процесса резания.

Список литературы

1. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. М. : Машиностроение, 1971. 224 с.
2. Патент 2138793 Российская Федерация, МКИ G01M15/00, 13/04. Устройство для крепления вибропреобразователя / Костюков В. Н., Горшечников О. П., Мелинг А. Я. № 97121755 ; заявл. 24.12.97 ; опубл. 27.09.99, Бюл. № 27. 6 с.
3. Дальский А. М., Косилова А. Г., Мещеряков Р. К. Справочник технолога машиностроителя : 2 т. М., 2001. Т. 2. 912 с.
4. Костюков В. Н., Костюков А. В. Мониторинг состояния оборудования в реальном времени // Контроль. Диагностика. 2010. № 3 С. 43–50.
5. Жецкий В. Е. Методические рекомендации по применению датчиков вибрации, методам обработки полученных данных и способам диагностики состояния оборудования на основе данных виброизмерений. Омск : Микроникс, 2004. 73 с.

Информация об авторах / Information about the authors

**Александр Евгеньевич
Зверовщиков**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии
и оборудование машиностроения»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: azwer@mail.ru

Alexander E. Zverovshchikov

Doctor of technical sciences,
professor, professor of the department
of mechanical engineering
technologies and equipment, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Илья Вячеславович Черепенников
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: vasya.cherepennikov@yandex.ru

Илья V. Cherepennikov

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Кирилл Васильевич Кривонос
магистрант, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: kirill.pnz55@gmail.com

Kirill V. Krivonosov

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 67.05

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ НА ЛАЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ

**Егор Денисович Сердюков¹,
Фан Сагирович Сабилов²**

^{1,2}Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы образования волнистой поверхности при лазерной резке на станках с ЧПУ. Получены зависимости амплитуды волны на поверхности от скорости перемещения лазерной головки. Определены амплитудно-частотные характеристики упругой системы в направлении трех осей, позволившие связать собственные частоты упругой системы с частотой волны на детали.

Ключевые слова: лазерный станок, собственные колебания, погрешности резки

CAUSES OF ERRORS IN LASER CUTTING ON A CNC LASER MACHINE

Egor D. Serdyukov¹, Fan S. Sabirov²

^{1,2}Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia

Abstract. The issues of the formation of a wavy surface during laser cutting on CNC machines are considered. The dependences of the amplitude of the wave on the surface on the speed of movement of the laser head are obtained. The frequency response of the elastic system in the direction of three axes was determined, which made it possible to link the natural frequencies of the elastic system with the frequency of the wave on the part.

Keywords: laser machine, intrinsic vibrations, cutting errors

Эксплуатируя лазерные вырезные станки, многие пользователи обратили внимание на то, что при изменении направления движения лазерной головки на обработанной поверхности образуются волны, заметные даже невооруженным глазом. На рис. 1, *а* показано образование затухающих волн на поверхности заготовки при лазерной резке фанеры толщиной 4 мм с подачей 40 мм/сек на станке мод. 1610. Аналогичная картина возникает на лазерном станке Optimum Tube компании Lassard при вырезании квадрата на трубе из конструкционной стали, (рис. 1, *б*).

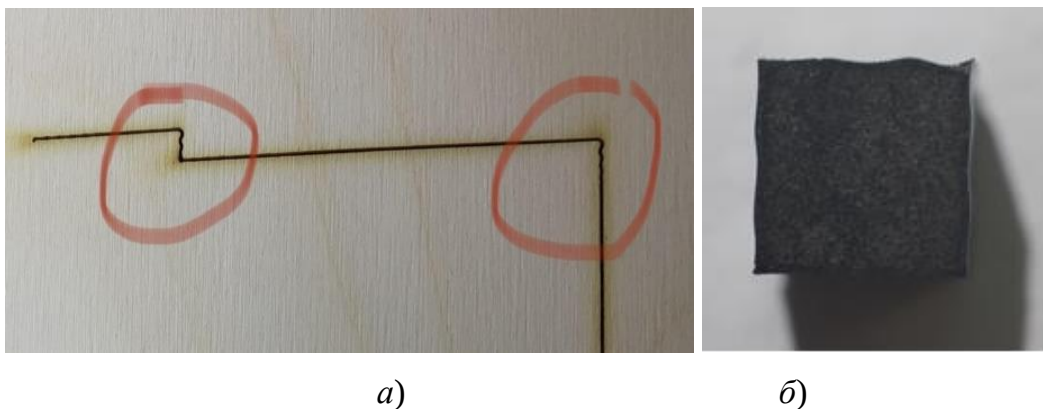


Рис. 1. Волнообразные погрешности профиля при смене направления движения: на станке мод. 1610 при резке фанеры (*а*); на станке Optimum Tube при вырезании квадрата (*б*)

Лазерный станок Optimum Tube (рис. 2) – порталная конструкция с двумя приводами. Портал перемещается по оси Y по шариковым направляющим через электродвигатель, планетарный редуктор и зубчатую шестерню. Каретка движется по оси X по шариковым направ-

ляющим портала с помощью электродвигателя, планетарного редуктора и зубчато-реечной передачи. Под консольной частью портала находится труборезный модуль, который обрабатывает трубы (круглые, прямоугольные), швеллеры, двутавры и другой прокат. Модуль вращает и перемещает заготовки вдоль оси с помощью отдельного привода.

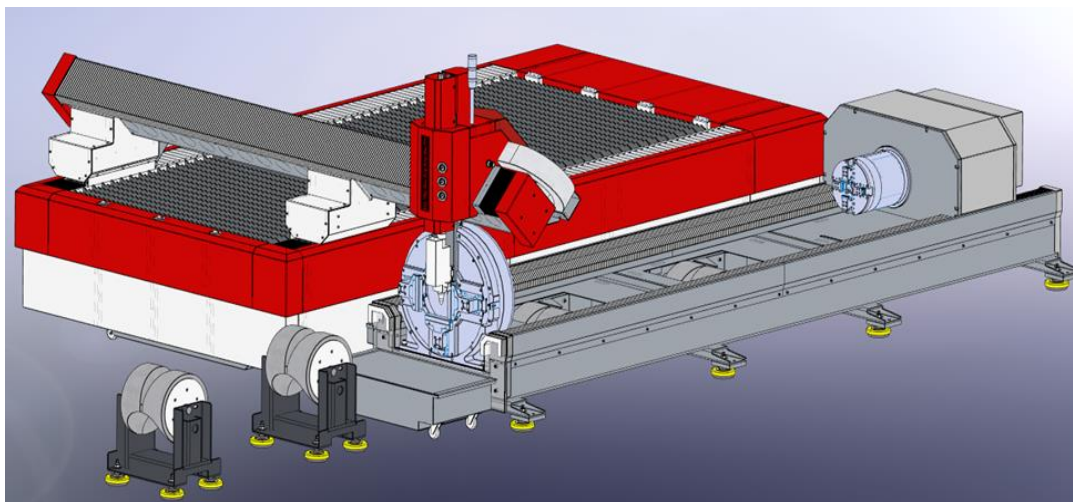


Рис. 2. Лазерный станок Optimum Tube

Резка квадрата производилась на станке с ЧПУ Optimum Tube с подачей 1400 мм/мин и ускорением 0.98 мм/с^2 ($0.1g$). При заданном ускорении установившееся значение подачи будет после прохождения пути 0,56 мм. С помощью микроскопа NORGAU NVM-3020 был измерен период волны на поверхности детали от точки установившегося движения, который составил 1,78 мм по координате X и 2,68 мм по координате Y. При подаче 1400 мм/мин (23,3 мм/с) частота волны на гранях квадрата составляет 13,1 Гц по оси X и 8,7 Гц по оси Y.

Предположения о колебаниях лазерной головки на собственных частотах упругой системы проверялись по методике [1] следующим образом. Датчики вибраций (акселерометры) крепились на корпусе головки в направлении осей X и Y (рис. 3). Динамометрическим молотком наносились удары по корпусу головки отдельно по тем же осям. Сигналы с динамометрического молотка и датчиков вибраций регистрировались, оцифровывались и обрабатывались с помощью программ, разработанных в МГТУ «Станкин» [2]. Результатом были амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) упругой системы станка по упомянутым осям (рис. 4 и 5).

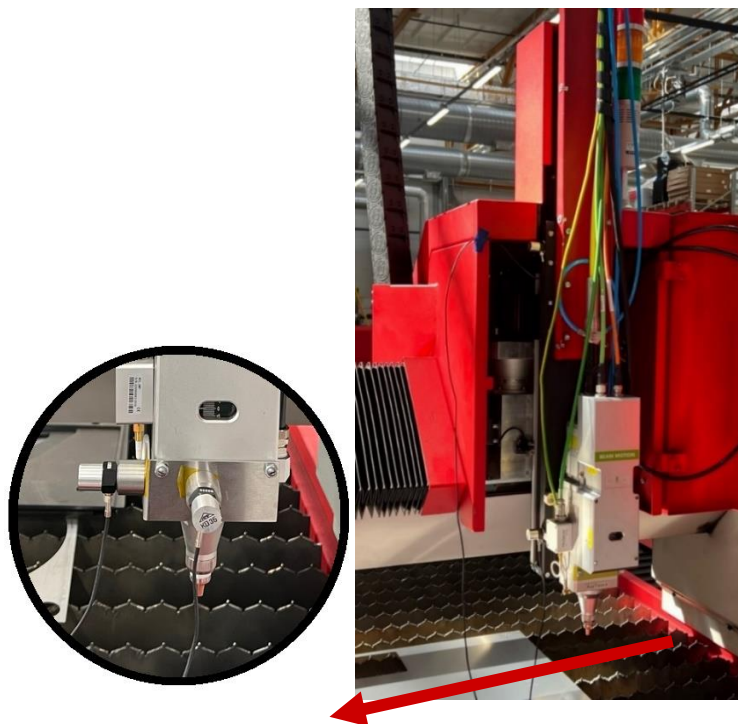


Рис. 3. Расположение датчиков на лазерной головке

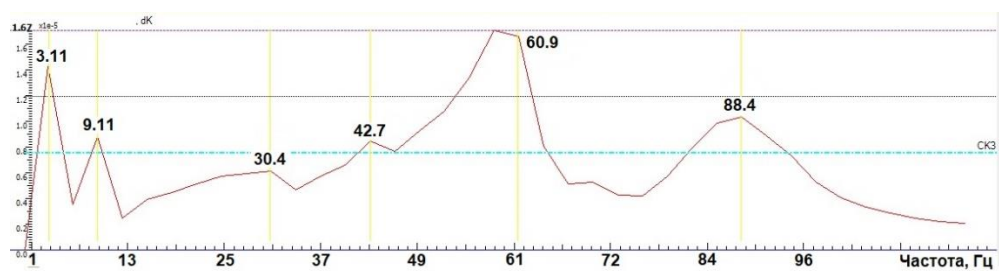


Рис. 4. АЧХ по виброперемещению лазерной головки по оси X-X

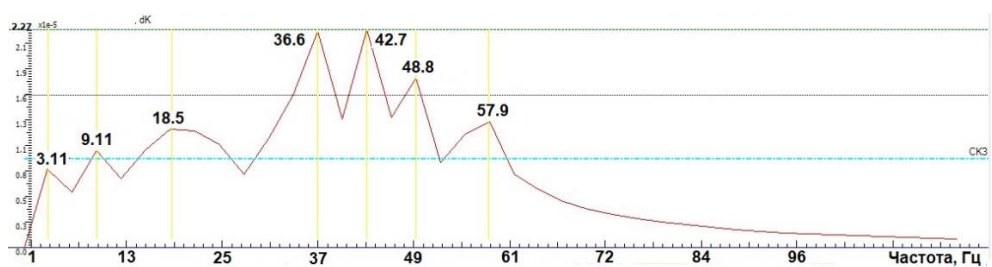


Рис. 5. АЧХ по виброперемещению лазерной головки по оси Y-Y

Для анализа динамических характеристик станка необходимо рассчитать частоту волны на волнообразном профиле:

$$f = \frac{S}{l} = \frac{23.3}{2.68} = 8.7 \text{ Гц}$$

где S – фактическая подача, мм/с; l – длина волны, мм.

В ходе анализа амплитудно-частотных характеристик выявлено, что частотная составляющая 9,11 Гц близка к частоте волнистости 8,7 Гц по оси Y, что может указывать на колебания лазерной головки на данной частоте (гипотеза требует подтверждения), при этом частота волнистости 13,1 Гц по оси X явно не проявилась. Для определения погрешностей при изменении направления движения лазерной головки на микроскопе NORGAU NVM-3020 были исследованы образцы, вырезанные с разной подачей из трубы квадратного сечения 40×40 мм со стенкой 2 мм и стороной квадрата 10 мм.

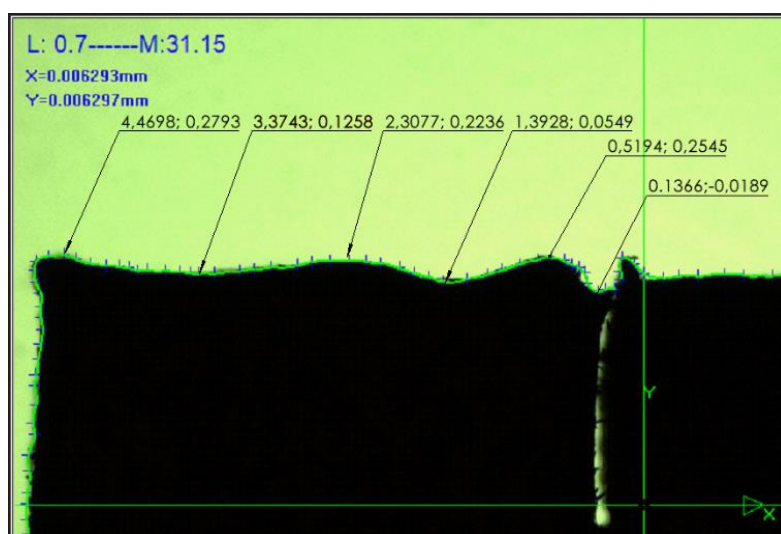


Рис. 6. Вырезанный квадрат с поверхностью с волнообразным профилем

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов на станке Optimum Tube

Подача, мм/мин	Амплитуда по оси «X», мм	Амплитуда по оси «Y», мм
800	0,0833	0,0385
1000	0,0945	0,0975
1200	0,148	0,865
1500	0,2734	0,14

В результате работы были проведены испытания лазерного станка Optimum Tube, испытания показали, что при резке металла образуется поверхность с волнообразным профилем частотой 8,7 Гц, а максимальная погрешность составила 0,2734 мм. Возможно причиной волнистости по оси X являются качательные колебания лазерной головки. Проверка этого предположения требует более тщательного исследования, а именно определения форм колебаний каретки с лазерным модулем.

Список литературы

1. Кочинев Н. А., Сабилов Ф. С. Измерение динамических характеристик станков методом импульсного нагружения // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 39–41.

2. Кочинев Н. А., Сабилов Ф. С., Козочкин М. П. [и др.]. Программный комплекс обработки и анализа вибрационных сигналов ExpDynaPro : свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015610599 ; зарег. 14.01.2015.

Информация об авторах / Information about the authors

Егор Денисович Сердюков
аспирант, Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский пер., 1)
e-mail: sidoscar123@gmail.com

Egor D. Serdyukov
Postgraduate student, Moscow State
Technological University "Stankin"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Фан Сагирович Сабилов
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Станки»,
Московский государственный
технологический университет
«Станкин» (Россия, г. Москва,
Вадковский пер., 1)
e-mail: fanira5057@yandex.ru

Fan S. Sabirov
Doctor of technical sciences,
professor, head of the department of
machine tools, Moscow State
Technological University "Stankin"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

УДК 621.357.7:621.9.01

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ КОБАЛЬТ-КАРБИД ВОЛЬФРАМА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА

**Сергей Юрьевич Киреев¹,
Светлана Николаевна Киреева²,
Софья Руслановна Синенкова³**

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Разработана технология формирования композиционных гальванических покрытий Co-WS для упрочнения поверхностей металлорежущих инструментов и элементов станочного оборудования. Оптимизированы параметры импульсного

осаждения: плотность тока 7–9 А/дм², длительность импульсов 10 мс (скважность 2), температура 18–25 °С, pH 6,5–6,8, содержание уротропина 45–55 г/л (катодный выход 52–67 %). Покрытия с 10,0–25,0 мас. % WC (частицы 1–2 мкм) обладают микротвердостью 5,85–11,15 ГПа, износостойкостью 4140–5760 ДВПД/мкм (при нагрузке 2 Н) и внутренними напряжениями ≤ 100 МПа. Co-WC превосходит традиционные покрытия по твердости и адгезии, обеспечивая повышение ресурса режущих инструментов в 1,5 раза. Установлена применимость Co-WC для направляющих шпинделей и фрез в условиях интенсивного трения. Технология перспективна для модернизации станочного оборудования, устойчивого к абразивному износу, с потенциалом внедрения в станкоинструментальную отрасль.

Ключевые слова: композиционные гальванические покрытия, кобальт-карбид вольфрама, износостойкие покрытия, импульсный электролиз, станкоинструментальная продукция

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR FORMING COBALT-TUNGSTEN CARBIDE COMPOSITE ELECTRODEPOSITED COATINGS FOR SURFACE HARDENING OF MACHINE EQUIPMENT AND TOOLS

Sergey Yu. Kireev¹, Svetlana N. Kireeva², Sofya R. Sinenskova³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. A technology for forming cobalt-tungsten carbide (Co-WC) composite electroplated coatings for hardening surfaces of metal-cutting tools and machine tool components has been developed. The pulse electrodeposition parameters were optimized, including a current density of 7–9 A/dm², pulse duration of 10 ms (duty cycle of 2), electrolyte temperature of 18–25 °C, pH 6,5–6,8, and urotropine content of 45–55 g/L (achieving a cathode current efficiency of 52–67 %). Coatings containing 10,0–25,0 wt. % WC (particle size: 1–2 μm) exhibit a microhardness of 5,85–11,15 GPa, wear resistance of 4140–5760 DVP/micron (at 2 N load), and internal stresses ≤100 MPa. Co-WC coatings outperform traditional coatings in hardness and adhesion, increasing the tool life by 1.5 times. The applicability of Co-WC coatings for spindles, guides, and milling cutters under intensive friction conditions has been confirmed. This technology is promising for modernizing machine tool equipment resistant to abrasive wear, with potential for implementation in the machine tool industry.

Keywords: composite electroplated coatings, cobalt-tungsten carbide (Co-WC), wear-resistant coatings, pulse electrodeposition, machine tool products

Введение. Современные требования к материалам и покрытиям в станкоинструментальной отрасли определяются необходимостью обеспечения высокой износостойкости, твердости и адгезии в условиях интенсивного абразивного и фрикционного воздействия [1]. Традиционно для упрочнения поверхностей металлорежущих инструментов,

шпинделей, направляющих и других элементов станочного оборудования применяются хромовые покрытия [2]. Однако их экологическая опасность и токсичность соединений шестивалентного хрома стимулируют поиск альтернатив [3]. Перспективными являются композиционные гальванические покрытия на основе кобальта с включениями карбида вольфрама (Co-WC), которые сочетают металлическую матрицу с дисперсной фазой, обеспечивая повышенную твердость и износостойкость [4]. В отличие от никелевых аналогов, кобальтовая матрица демонстрирует лучшую смачиваемость частиц WC, что способствует равномерному распределению и улучшению адгезии [5]. Исследования показывают, что импульсный режим электролиза позволяет повысить скорость осаждения в 1,5 раза по сравнению с постоянным током, минимизируя дефекты [6].

Несмотря на прогресс, применение Co-WC в станкоинструментальной области изучено недостаточно, особенно в аспектах оптимизации параметров для конкретных элементов оборудования [7]. Ключевой пробел – отсутствие комплексных данных о поведении покрытий в условиях циклических нагрузок, характерных для станков с ЧПУ и роботизированных комплексов [8]. Целью работы является разработка технологии формирования Co-WC-покрытий с оптимизированными свойствами для упрочнения поверхностей станочного оборудования и инструмента. Задачи: синтез покрытий с варьированием концентрации WC; исследование влияния импульсного режима на морфологию и механические свойства; сравнительный анализ с традиционными покрытиями; тестирование в имитирующих эксплуатацию условиях.

Материалы и методы. Для приготовления электролита использовали: гексагидрат хлорида кобальта (II) ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) – 35–40 г/л, хлорид аммония (NH_4Cl) – 100–150 г/л, уротропин ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) – 45–55 г/л, порошок WC (размер частиц 1–2 мкм) – 5–20 г/л, pH 6,5–6,8. Электролит готовили на дистиллированной воде с контролем pH. Подложки (сталь 45, размер 50×25×1 мм) подготавливали следующим образом: шлифовка ($R_a \leq 0,1$ мкм), обезжиривание (ацетон, ультразвук, 10 мин), травление (10 % H_2SO_4 , 2 мин). Осаждение проводили на импульсном потенциостате: плотность тока 7–10 А/дм², импульсы 10 мс, паузы 10 мс, температура 18–25°C, перемешивание 300–600 об/мин. Аноды – графит или кобальт. Микротвердость измеряли по Виккерсу (нагрузка 0,5 Н, ГОСТ 9450-76). Износостойкость – методом двойных возвратно-поступательных движений (ДВПД) индентора (диаметр 1 мм, нагрузка 2 Н). Адгезия – методом сетки царапин (ГОСТ 9.302-88). Внутренние напряжения – методом гибкого катода.

Результаты и обсуждение. Оптимизация параметров импульсного осаждения позволила достичь катодного выхода по току 52–67 %. При плотности тока 7–9 А/дм² и скважности 2 покрытия формируются равномерными, полублестящими, без трещин. Содержание WC в покрытиях варьируется от 10,0 ± 0,77 % до 25,0 ± 1,1 % в зависимости от концентрации порошка и скорости перемешивания. Микротвердость покрытий достигает 5,85–11,15 ГПа, что на 20–30 % выше, чем у прототипов на постоянном токе (5,32 ГПа) [4]. Износостойкость – 4140–5760 ДВПД/мкм, что обеспечивает повышение ресурса фрез и шпинделей в 1,5 раза по сравнению с хромовыми покрытиями. Внутренние напряжения не превышают 100 МПа, адгезия – высокая (выдерживают изгиб до излома). Уротропин улучшает смачиваемость и подавляет коррозию. Сравнение с аналогами (табл. 1) показывает превосходство Co-WC по твердости и износостойкости для станкоинструментальной области.

Таблица 1

Сравнение свойств покрытий Co-WC и традиционных аналогов

Параметр	Co-WC (разработанная технология)	Хромовые покрытия [2]
Микротвердость, ГПа	5,85–11,15	8,0–10,0
Износостойкость, ДВПД/мкм	4140–5760	3000–4000
Адгезия	Высокая (сетка царапин, изгиб)	Средняя (склонность к отслоению)
Скорость осаждения, мкм/ч	170–240	100–150
Экологичность	Умеренная (без Cr(VI))	Низкая (токсичность)

Co-WC покрытия применимы для упрочнения режущих инструментов, направляющих и шпинделей, где требуется устойчивость к абразивному износу.

Заключение. Разработана технология Co-WC-покрытий с импульсным осаждением, обеспечивающая высокую твердость (до 11,15 ГПа) и износостойкость (до 5760 ДВПД/мкм). Покрытия превосходят аналоги по адгезии и скорости формирования, подходя для станкоинструментальной отрасли. Перспективы: масштабирование для роботизированных комплексов, исследование в условиях вибрации.

Список литературы

1. Lin G. [et al.]. Tool wear on machining of difficult-to-machine materials: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Т. 134, № 3. С. 989–1014.

2. Солодкова Л. Н. Электролитическое хромирование. М. : Глобус, 2007. 191 с.
3. Elkhoshkhany N., Hafnway A., Khaled A. Electrodeposition and corrosion behavior of nano-structured Ni-WC and Ni-Co-WC composite coating // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Т. 695. С. 1505–1514.
4. Киреев С. Ю., Киреева С. Н., Козлов Г. В. [и др.]. Разработка технологии формирования композиционных гальванических покрытий Ni-WC как альтернативы покрытиям Co-WC для изделий авиационной и космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3. С. 121–134. doi: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134
5. Surender M., Balasubramaniam R., Basu B. Electrochemical behavior of electrodeposited Ni-WC composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Т. 187, № 1. С. 93–97.
6. Zhang Y.G. [et al.]. Electrodeposition, microstructure and property of Co-WC composite coatings // *Materials Research Express*. 2020. Vol. 6, № 12.
7. Liu Y. [et al.]. Wear and heat shock resistance of Ni-WC coating on mould copper plate fabricated by laser // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, № 4. P. 8283–8288.
8. Левченко Е. А., Братан С. М., Колесов А. Г. Математическое моделирование процесса обработки деталей с использованием вибраций // *Вестник современных технологий*. 2019. № 3. С. 22–25.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Юрьевич Киреев

доктор технических наук, профессор,
декан факультета промышленных
технологий электроэнергетики
и транспорта, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: sergey58_79@mail.ru

Sergey Yu. Kireev

Doctor of technical sciences,
professor, dean of the faculty
of industrial technologies
of electric power engineering and
transport, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлана Николаевна Киреева

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Химия», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: svetlana58_75@mail.ru

Svetlana N. Kireeva

Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
chemistry, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Софья Руслановна Синенкова

студентка, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: sofya.sinenkova@mail.ru

Sofya R. Sinenkova

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ-КАРБИД ВОЛЬФРАМА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА

Сергей Юрьевич Киреев¹,
Геннадий Васильевич Козлов²,
Светлана Николаевна Киреева³,
Софья Руслановна Синенкова⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Аннотация. Разработана технология формирования композиционных гальванических покрытий Ni-WC для упрочнения поверхностей металлорежущих инструментов и элементов станочного оборудования. Оптимизированы параметры импульсного осаждения: плотность тока 4,0 А/дм², длительность импульсов 5 мс (скважность 2), температура 20 °С, pH 4,5, содержание сахараина 0,3 г/л (катодный выход 96,4 %). Покрытия с 20,3–24,5 мас. % WC (частицы 1–2 мкм) обладают микротвердостью 8,2–9,5 ГПа, коэффициентом износа $2,8\text{--}3,8 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м и внутренними напряжениями ≤ 90 МПа. Ni-WC превосходит традиционные покрытия по коррозионной стойкости и экономичности, обеспечивая повышение ресурса режущих инструментов в 1,4 раза. Установлена применимость Ni-WC для направляющих, шпинделей и сверл в условиях абразивного износа. Технология перспективна для модернизации станочного оборудования, устойчивого к фрикционным нагрузкам, с потенциалом внедрения в станкоинструментальную отрасль.

Ключевые слова: композиционные гальванические покрытия, никель-карбид вольфрама, износостойкие покрытия, импульсный электролиз, станкоинструментальная продукция

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FORMING NICKEL-TUNGSTEN CARBIDE COMPOSITE ELECTROPLATED COATINGS FOR HARDENING SURFACES OF MACHINE TOOLS AND EQUIPMENT

Sergey Yu. Kireev¹, Gennady V. Kozlov²,
Svetlana N. Kireeva³, Sofya R. Sinenskova⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

Abstract. A technology for forming nickel-tungsten carbide (Ni-WC) composite electroplated coatings for hardening surfaces of metal-cutting tools and machine tool

components has been developed. The pulse electrodeposition parameters were optimized, including a current density of 4,0 A/dm², pulse duration of 5 ms (duty cycle of 2), electrolyte temperature of 20 °C, pH 4,5, and saccharin content of 0,3 g/L (achieving a cathode current efficiency of 96,4 %). Coatings containing 20,3–24,5 wt. % WC (particle size: 1–2 μm) exhibit a microhardness of 8,2–9,5 GPa, wear resistance of 2,8–3,8 × 10⁻⁵ mm³/N·m, and internal stresses ≤ 90 MPa. Ni-WC coatings outperform traditional coatings in corrosion resistance and cost-effectiveness, increasing the tool life by 1.4 times. The applicability of Ni-WC coatings for guides, spindles, and drills under abrasive wear conditions has been confirmed. This technology is promising for modernizing machine tool equipment resistant to frictional loads, with potential for implementation in the machine tool industry. **Keywords:** composite electroplated coatings, nickel-tungsten carbide (Ni-WC), wear-resistant coatings, pulse electrodeposition, machine tool products

Введение. Современные требования к материалам и покрытиям в станкоинструментальной отрасли определяются необходимостью обеспечения высокой износостойкости, коррозионной стойкости и адгезии в условиях интенсивного фрикционного и абразивного воздействия [1]. Традиционно для упрочнения поверхностей металлорежущих инструментов, направляющих, шпинделей и других элементов станочного оборудования применяются хромовые покрытия [2]. Однако их экологическая опасность и токсичность соединений шестивалентного хрома стимулируют поиск альтернатив [3]. Перспективными являются композиционные гальванические покрытия на основе никеля с включениями карбида вольфрама (Ni-WC), которые сочетают металлическую матрицу с дисперсной фазой, обеспечивая повышенную твердость и износостойкость [4]. В отличие от кобальтовых аналогов, никелевая матрица демонстрирует лучшую коррозионную стойкость в нейтральных средах и меньшую токсичность, что важно для промышленного применения [5]. Исследования показывают, что импульсный режим электролиза позволяет повысить скорость осаждения и равномерность распределения частиц WC, минимизируя дефекты [6].

Несмотря на прогресс, применение Ni-WC в станкоинструментальной области изучено недостаточно, особенно в аспектах оптимизации параметров для конкретных элементов оборудования [7]. Ключевой пробел – отсутствие комплексных данных о поведении покрытий в условиях циклических нагрузок, характерных для станков с ЧПУ и роботизированных комплексов [8].

Целью работы является разработка технологии формирования Ni-WC-покрытий с оптимизированными свойствами для упрочнения поверхностей станочного оборудования и инструмента.

Задачи: синтез покрытий с варьированием концентрации WC; исследование влияния импульсного режима на морфологию и механические свойства; сравнительный анализ с традиционными покрытиями; тестирование в имитирующих эксплуатацию условиях.

Материалы и методы. Для приготовления электролита использовали: тетрагидрат ацетата никеля ($\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) – 185 г/л, гексагидрат хлорида никеля ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) – 24 г/л, сахарин ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$) – 0,3 г/л, порошок WC (размер частиц 1–2 мкм) – 5–25 г/л, pH 4,5. Электролит готовили на дистиллированной воде с контролем pH. Подложки (сталь 45, размер 50×25×1 мм) подготовили: шлифовка ($R_a \leq 0,1$ мкм), обезжиривание (ацетон, ультразвук, 10 мин), травление (10 % H_2SO_4 , 2 мин). Осаждение проводили на импульсном потенциостате: плотность тока 4,0 А/дм², импульсы 5 мс, скважность 2, температура 20 °С, перемешивание 300 об/мин. Аноды – графит. Микротвердость измеряли по Виккерсу (нагрузка 0,5 Н, ГОСТ 9450–76). Коэффициент износа – методом кинематической схемы (индентор диаметром 1 мм, нагрузка 1,0 Н). Адгезия – методом сетки царапин (ГОСТ 9.302-88). Внутренние напряжения – методом гибкого катода. Коррозионная стойкость – погружением в 3,5 % NaCl (240 ч, ГОСТ 9.308–85).

Результаты и обсуждение. Оптимизация параметров импульсного осаждения позволила достичь катодного выхода по току 96,4 %. При плотности тока 4,0 А/дм² и скважности 2 покрытия формируются равномерными, без трещин, с содержанием WC 20,3–24,5 мас. %. Сахарин в концентрации 0,3 г/л минимизирует внутренние напряжения (≤ 90 МПа). Микротвердость покрытий достигает 8,2–9,5 ГПа, что на 15–25 % выше, чем у прототипов без импульсов [4]. Коэффициент износа – $2,8\text{--}3,8 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, что обеспечивает повышение ресурса сверл и направляющих в 1,4 раза по сравнению с хромовыми покрытиями. Адгезия – высокая (выдерживают изгиб до излома). Коррозионная стойкость превосходит аналоги: отсутствие повреждений после 240 ч в NaCl. Сравнение с аналогами (табл. 1) показывает превосходство Ni-WC по коррозионной стойкости и экономичности для станкоинструментальной области.

Таблица 1

Сравнение свойств покрытий Ni-WC и традиционных аналогов

Параметр	Ni-WC (разработанная технология)	Хромовые покрытия [2]
Микротвердость, ГПа	8,2–9,5	8,0–10,0
Коэффициент износа, $\times 10^{-5}$ мм ³ /Н·м	2,8–3,8	3,5–4,5
Коррозионная стойкость (в 3,5 % NaCl, ч)	>240 (без повреждений)	150–200 (точечная коррозия)
Скорость осаждения, мкм/ч	120–160	100–150
Экологичность	Высокая (без Cr(VI))	Низкая (токсичность)

Ni-WC покрытия применимы для упрочнения инструментов и оборудования, где требуется устойчивость к абразивному износу и коррозии.

Закключение. Разработана технология Ni-WC-покрытий с импульсным осаждением, обеспечивающая высокую твердость (до 9,5 ГПа) и износостойкость (до $2,8 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м). Покрытия превосходят аналоги по коррозионной стойкости и стоимости, подходя для станкоинструментальной отрасли. Перспективы: масштабирование для ЧПУ-станков, исследование в условиях вибрации.

Список литературы

1. Asif M. [et al.]. Recent trends, developments, and emerging technologies towards sustainable intelligent machining: A critical review, perspectives and future directions // Sustainability. 2023. Т. 15, № 10. С. 8298.
2. Солодкова Л. Н. Электролитическое хромирование. М. : Глобус, 2007. 191 с.
3. Elkhoshkhany N., Hafnway A., Khaled A. Electrodeposition and corrosion behavior of nano-structured Ni-WC and Ni-Co-WC composite coating // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Т. 695. С. 1505–1514.
4. Киреев С. Ю., Киреева С. Н., Козлов Г. В. [и др.]. Разработка технологии формирования композиционных гальванических покрытий Ni-WC как альтернативы покрытиям Co-WC для изделий авиационной и космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3. С. 121–134. doi: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-121-134
5. Surender M., Balasubramaniam R., Basu B. Electrochemical behavior of electrodeposited Ni-WC composite coatings // Surface and Coatings Technology. 2004. Vol. 187, № 1. P. 93–97.
6. Zhang Y. G. [et al.]. Electrodeposition, microstructure and property of Co-WC composite coatings // Materials Research Express. 2020. Vol. 6, № 12.
7. Liu Y. [et al.]. Wear and heat shock resistance of Ni-WC coating on mould copper plate fabricated by laser // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9, № 4. P. 8283–8288.
8. Bratan S., Novikov P. Theoretical determination of cutting forces during machining holes in parts made of alloy iron-carbon alloys // Materials Today: Proceedings. 2021. Т. 38. С. 2009–2012.

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Юрьевич Киреев

доктор технических наук, профессор,
декан факультета промышленных
технологий электроэнергетики
и транспорта, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: sergey58_79@mail.ru

Sergey Yu. Kireev

Doctor of technical sciences,
professor, dean of the faculty
of industrial technologies of electric
power engineering and transport,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геннадий Васильевич Козлов
доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov
Doctor of technical sciences,
professor, director of the
Polytechnic Institute, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Светлана Николаевна Киреева
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Химия», Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: svetlana58_75@mail.ru

Svetlana N. Kireeva
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate
professor of the department of
chemistry, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Софья Руслановна Синенкова
студентка, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)
e-mail: sofya.sinenkova@mail.ru

Sofya R. Sinenkova
Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.3.06

ГРАФОВАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ STEP-МОДЕЛЕЙ КАК ОСНОВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

**Александр Николаевич Феофанов¹,
Эдуард Эдуардович Веселов²,
Инна Евгеньевна Колошкина³**

^{1,2}Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

³ООО «Адем-инжинирнг», Москва, Россия

Аннотация. Предлагается метод преобразования CAD/STEP-моделей в много-уровневые графовые структуры, включающие геометрию, технологические признаки, параметры качества и сведения о материале. Такой подход ориентирован на формализацию изделия в машиночитаемом виде, пригодном для анализа и интеграции в цифровые подсистемы управления технологическими процессами. Архитектура обработки проектируется как конвейер с шагами: чтение STEP-файла, исправление топологических ошибок, генерация идентификаторов, построение графа и расширение его параметрами PMI и материалами. Получаемая модель может использоваться для оценки технологичности конструкции, выбора маршрутов обработки и согласования инженерных и производственных данных.

Ключевые слова: STEP-модель, графовое представление, машиночитаемая модель, цифровая подготовка производства, интеллектуальные системы управления, станки с ЧПУ

GRAPH-BASED FORMALIZATION OF STEP MODELS AS A FOUNDATION FOR INTELLIGENT SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL

Alexander N. Feofanov¹, Eduard E. Veselov²,
Inna E. Koloshkina³

^{1,2}Moscow State Technological University «STANKIN», Moscow, Russia

³LLC «Adem-Engineering», Moscow, Russia

Abstract. A method is proposed for transforming CAD/STEP models into multi-level graph structures that integrate geometry, technological features, quality parameters, and material data. This approach is aimed at formalizing a product in a machine-readable form suitable for analysis and integration into digital subsystems of technological process control. The processing architecture is designed as a pipeline including STEP file parsing, topology correction, identifier generation, graph construction, and enrichment with PMI parameters and material information. The resulting model can be applied to assess manufacturability, select processing routes, and align engineering and production data.

Keywords: STEP model, graph representation, machine-readable model, digital process planning, intelligent control systems, CNC machines

Введение

Цифровизация машиностроения и развитие концепций «Индустрия 4.0/5.0» формируют запрос на машиночитаемое и формализованное представление изделий, пригодное для автоматизированного анализа и интеграции в системы цифровой подготовки производства. Современные обзоры по цифровым двойникам прямо подчёркивают, что для интеллектуальной поддержки проектирования и производства нужна богатая цифровая модель изделия с возможностью алгоритмической обработки и связности данных [1].

Существуют решения, позволяющие преобразовывать CAD/STEP-модели в графовую форму, однако многие из них работают на уровне базовой топологии (например, Face Adjacency Graph) и/или узких задач. Обзор по геометрическому дип-обучению для CAD отмечает, что интеграция атрибутов поверх геометрии остаётся вызовом [2], а исследования по семантическому обогащению CAD показывают, что традиционные подходы не улавливают функциональные зависимости без добавления семантики [3].

В данной работе предлагается концепция микросервиса Step2Graph, выполняющего преобразование STEP-модели в расширенную графовую структуру. Вершины графа отражают не только геометрические элементы (грани, рёбра, вершины), но и технологические признаки, аннотированные параметры качества и данные о материале. Такая модель служит универсальной основой для применения методов анализа структуры изделия, включая алгоритмы на графах и графовые

нейронные сети. При этом формализованное графовое представление проектируется как элемент информационного обеспечения систем управления технологическими процессами, где требуется машиночитаемая и связная модель изделия для обеспечения функционирования станков и роботизированных комплексов. Таким образом, предлагаемое решение можно рассматривать как часть инфраструктуры управления, обеспечивающей согласованность инженерных моделей и производственных систем.

Научная значимость подхода заключается в формализации пути «STEP → Graph» как недостающего звена между инженерной моделью и подсистемами проектирования. Практический эффект – сокращение времени на подготовку производства и создание основы для автоматизированного анализа и поддержки решений.

Предлагаемый подход

В отличие от существующих решений, которые ограничиваются построением графа смежности граней и плохо учитывают инженерные атрибуты, предлагаемый метод Step2Graph ориентирован на формирование многоуровневого графа. Такая структура должна объединять геометрию, технологические признаки, параметры качества и материалы, обеспечивая целостное представление изделия. Предполагается, что модель будет включать несколько уровней:

- уровень B-Rep, где узлы соответствуют граням, рёбрам и вершинам, а связи отражают смежность;
- уровень технологических признаков, включающий отверстия, карманы, пазы и другие элементы, связанные с базовой геометрией;
- уровень параметров PMI, содержащий размеры, допуски, обозначения шероховатости и другие характеристики качества;
- уровень сведений о материале и производственных атрибутах, где фиксируются материал и возможные технологические подсказки.

Предлагаемая архитектура микросервиса проектируется как конвейер обработки. На первом шаге должен использоваться парсер, выполняющий чтение STEP-файла и извлечение геометрической модели. При необходимости будет применяться модуль «лечилки», исправляющий ошибки топологии и обеспечивающий корректность связей. Для сохранения согласованности данных предусматривается генерация детерминированных идентификаторов граней и рёбер. Построитель графа формирует структуру с учётом как стандартных, так и дополнительных связей. На следующем этапе данные расширяются признаками, параметрами PMI и материалами. В качестве завершающего шага предполагается экспорт в машиночитаемом виде, пригодном для последующей загрузки в системы управления производственными процессами: матрица смежности граней, взвешенная матрица длин общих рёбер, JSON-файл с полным описанием структуры и отчёт для визуальной проверки.

Проектируемая модель ориентирована на дальнейшую интеграцию в интеллектуальные подсистемы, обеспечивающие управление и сопровождение работы станков и роботизированных комплексов. Предполагается, что графовая структура будет служить источником данных для оценки технологичности конструкции, выбора маршрутов обработки и анализа совместимости с имеющимся оборудованием. Кроме того, единый формат открывает возможность для применения методов обработки графов, включая нейросетевые подходы, но уже в контексте поддержки принятия решений в АСУТП и АСУП.

Ключевое отличие предлагаемого подхода заключается в его комплексности. В отличие от решений, ограниченных только графом смежности граней, Step2Graph проектируется как система, которая сразу формирует многоуровневое представление с признаками, параметрами качества и материалами, что позволяет снизить разрыв между САД-моделью и системами технологической подготовки. В отличие от семантических или иерархических графов, ориентированных на уровень сборок, данный метод задуман как универсальный: он должен позволять преобразовывать как отдельные детали, так и сборочные модели в целостное графовое представление с едиными правилами описания связей. Это делает его перспективным для задач цифровой подготовки производства, где требуется не только анализ геометрии, но и учёт параметров качества и производственных ограничений.

Ожидаемые результаты и обсуждение

Предлагаемый метод позволит перейти от разрозненных инженерных данных к единой графовой структуре, пригодной для автоматизированного анализа и встроенной в цифровые подсистемы, обеспечивающие работу станков и роботизированных комплексов. Такой подход упростит интеграцию STEP-моделей в системы управления производственными процессами, повысит автоматизацию при выборе технологий обработки и проверке совместимости изделий с оборудованием. Многоуровневое представление создаст основу для интеллектуальной поддержки решений: от выявления конструктивных особенностей до проверки, возможно ли выполнить обработку детали на конкретном станке с учётом его ограничений. Это соответствует задачам АСУТП и АСУП и способствует более тесной интеграции конструкторской и технологической подготовки с управлением эксплуатацией оборудования.

Заключение

Предложенный метод преобразования STEP-моделей в многоуровневое графовое представление открывает возможность для их использования в системах управления и сопровождения функционирования станков и роботизированных комплексов и может стать инструментом для развития цифровой подготовки производства и интеллектуального управления технологическими процессами.

Планируемые направления дальнейшей работы включают:

- завершение проектирования и практическая реализация микросервиса Step2Graph, что станет основой для дальнейших исследований и интеграции с производственными подсистемами;
- обучение графовых нейронных сетей на реальных производственных данных для задач оценки технологичности и выбора оптимальных технологий обработки.

Список литературы

1. Huang Z., Shen Y., Li J. [et al.]. A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics // Sensors (Basel). 2021. Vol. 21, № 19. P. 6340. doi: 10.3390/s21196340 URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8512418/> (дата обращения: 20.09.2025).
2. Heidari N., Iosifidis A. Geometric Deep Learning for Computer-Aided Design: A Survey. Denmark, 2024. 43 p. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.17695> (дата обращения: 15.09.2025).
3. Taba R., Schonlau A. L., Falkenhain J. [et al.]. From CAD Data to semantic Graphs: A Framework for Classification. 2025. 6 p. URL: https://elib.dlr.de/212454/1/paper_final.pdf (дата обращения: 15.09.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Феофанов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерная
графика», Московский государственный
технологический университет
«Станкин» (Россия, г. Москва,
Вадковский пер., 3А)
e-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Alexander N. Feofanov
Doctor of technical sciences,
professor, professor of the department
of engineering graphics, Moscow
State Technological University
"Stankin" (3A Vadkovsky lane,
Moscow, Russia)

Эдуард Эдуардович Веселов
аспирант, Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский пер., 3А)
e-mail: Eduuaarrdd@yandex.ru

Eduard E. Veselov
Postgraduate student, Moscow State
Technological University "Stankin"
(3A Vadkovsky lane, Moscow,
Russia)

Инна Евгеньевна Колошкина
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по подготовке кадров,
ООО «Адем-инжинирнг» (Россия,
г. Москва, ул. Иркутская, 11)
e-mail: 3inna.koloshkina@yandex.ru

Inna E. Koloshkina
Candidate of technical sciences,
deputy general director for personnel
training, LLC «Adem-Engineering»
(11 Irkutskaya street, Moscow,
Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»

Утенков В. М., Ягопольский А. Г., Макеев А. А. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШПИНДЕЛЯ	3
Алешин А. К., Кондратьев И. М., Рашоян Г. В., Романов А. А., Филиппов Г. С., Шалюхин К. А., Алёшин В. М. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ СТАНКОВ ЦИКЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ	8
Шишкарёв М. П., Гавриленко М. Д. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ.....	14
Кокарев Д. С., Нестеров С. А., Зверовщиков В. З., Сорокина Н. В., Вьюговский А. А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУМОИЗОЛЯЦИИ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕННОЙ КАБИНЕТНОЙ ЗАЩИТЫ	21
Литвинов А. Н. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ	28
Севостьянова Т. М., Черепенникова А. А., Миронычев Н. А., Гурин П. А. АНАЛИЗ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	33
Гуляева Д. С., Верхушин Д. А., Курдюмов Д. С., Кудрявцева Ю. С. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕСС-ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯ ТИПА «БЛОК НАТЯЖЕНИЯ НИТИ» ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТА «МИНИТПА-100»	39
Верхушин Д. А., Гуляева Д. С., Курдюмов Д. С., Головин Е. Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛА СМЫКАНИЯ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТА ПРИ ЛИТЬЕ ДЕТАЛЕЙ С РАЗНОЙ МАССОЙ И ПРОЕКЦИОННОЙ ПЛОЩАДЬЮ НА ПРИМЕРЕ «МИНИТПА-100»	46
Бедоидзе М. В., Кругликова М. А., Степаницын А. С., Чукарин А. Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЦИРКУЛЯРНЫХ ЛЕСОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ	54

Богомоленко Д. В., Батищенко Я. А., Холодова С. Н. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ КОМПЛЕКТУЮЩИХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ М/М/1	59
Денисенко А. Ф., Ладягин Р. В. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ	63
Крылов В. В., Бекренёв Н. В. ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ИЛИ КАЛИБРОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	67
Скрябин В. А., Гусев С. А. ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ	72
Далечин А. С., Феофанов А. Н. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР КОМПОНОВКИ АГРЕГАТНОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКЕ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА	76
Овсянников В. Е., Губенко А. С., Писарев Д. Е. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ 3D-ПРИНТЕРА.....	81
Хандожко А. В., Хандожко В. А., Щербаков А. Н., Капустин В. В. СТЕНД ДЛЯ ОБКАТКИ И ДИАГНОСТИКИ МОДУЛЬНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ	86
Янюшкин А. Р., Лобанов Д. В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	92
Попок Н. Н., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Башлачев Д. А. МОДЕРНИЗАЦИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ СКОРОСТНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	96
Зверовщиков В. З., Нестеров С. А., Антонов Д. С. СТАНОК ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	103

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ СТАНКОСТРОЕНИЯ»

Попок Н. Н., Тихон Е. М., Шелепень Д. А. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТАНКАХ И ИНСТРУМЕНТАХ.....	110
Зверовщиков А. Е., Борисов Д. А. ОБ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ МЕХАНООБРАБОТКИ ДЛЯ НУЖД ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	116
Борисов Д. А. ПЕРСПЕКТИВЫ КОНЦЕПЦИИ ПЕРЕДАЧИ НОВИКОВА В СОВРЕМЕННУЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ЭПОХУ	119
Образцов А. Е., Утенков В. М., Кузнецов П. М. ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ.....	124
Грошев А. А., Воячек И. И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЕВИДНОГО ФРИКЦИОННО-ПРОФИЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ	131
Юсупов Н. Т., Воячек И. И. КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ....	137
Лапко О. А., Прач С. И. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ.....	141
Кочетков Д. В., Воячек И. И., Пучков А. М., Власов В. В. ВЛИЯНИЕ АНАЭРОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	146
Зотов Е. В., Тюрин Д. А., Рожков В. И. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ AISI 430 И AISI 304 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	152
Зотов Е. В., Федорова Е. В., Масленников Д. А. ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА ТМЖ-1М ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО КЛАПАНА DN15/PN1.6	157
Зверовщиков А. Е., Кошелева Ю. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ПРОЦЕСС ГЛУБИННОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	161

Зверовщиков А. Е., Мищенко М. Г. СТАБИЛИЗАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА МЕМБРАН ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	165
Воячек И. И., Кочетков Д. В., Власов В. В., Пучков А. М. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕЗЬБЫ В СОЕДИНЕНИИ СО СЖАТО-РАСТЯНУТОЙ ГАЙКОЙ	169
Наумов Л. В., Вантеев А. Н., Орещенко П. Ю. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА НИКЕЛИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВИБРАЦИИ КАТОДА	175
Бурлаков В. И., Бурлакова Г. Ю., Артюх В. Г., Китаева Д. А., Корихин Н. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	180
Бутенко В. И. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ	186
Лебедев В. А., Коваль Н. С. ВИБРАЦИОННАЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ	190
Волков Д. И., Цветков Б. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ СТАНКЕ	196
Захаров О. В. КРИТЕРИИ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА	203
Унянин А. Н., Чуднов А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ И РЕЖИМАХ.....	208
Казанцев С. Н., Дурина Т. А., Юрасов А. С. ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ	213
Зверовщиков А. Е., Родионов В. С., Сакара И. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОСТРОЕНИЯ	218
Сорокина Н. В., Хренов С. Ю. МОДЕРНИЗАЦИЯ КЛАПАНА ПОЖАРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	222

Чуйков В. Е., Меланин Н. Н., Кудашева М. С., Хохлов Д. А., Золкин А. Н.	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ	230
Макаров В. Ф., Песин М. В., Норин А. О.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ МНОГОКООРДИНАТНОГО ПЯТИОСЕВОВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ	234
Артемов И. И., Нестеров С. А., Кочкин С. В., Сорокина Н. В., Акимов Д. А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ	244
Зотов Е. В., Кузнецов А. С., Рожков В. И.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРАНУЛ С ОБРАБАТЫВАЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ДЕТАЛИ В СИСТЕМЕ «ROCKY DEM» ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ANSYS».....	252

СЕКЦИЯ «ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ОБСЛУЖИВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И РЕМОНТ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТАНКОВ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ»

Бржозовский Б. М., Бровкова М. Б., Филиппов Г. Б.	
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ КИНЕМАТИКОЙ	260
Бочкарев П. Ю.	
ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГРАФОВ.....	265
Бочкарев П. Ю., Малинин П. В.	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАЛАДКИ БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ	269
Рогачев А. В., Фролов Е. М.	
СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ.....	274
Мирошина Т. В., Голубовский В. В.	
АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ЦИЛИНДРОМ ПОДАЧИ СИЛОВОЙ ГОЛОВКИ АГРЕГАТНОГО СТАНКА	278

Демиденко Н. Е. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ КИТАЙСКИХ КОМПОНЕНТОВ В СТАНКОСТРОЕНИИ И ПУТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В РАМКАХ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА	284
Пищухин А. М., Ахмедьянова Г. Ф., Кулешов И. В. МЕТАСИСТЕМНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ РЕСУРСОВ В ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ.....	287
Палкина Е. С., Шумилов Ю. М. ОСОБЕННОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	292
Щегольков А. В., Щегольков А. В., Ельцова В. А., Ельцов Я. В. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ СТАНКОСТРОЕНИЯ.....	297
Акинцева А. В., Переверзев П. П. КОМПЕНСАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАЗМЕРНОЙ НАСТРОЙКЕ ИНСТРУМЕНТА НА СТАНКАХ С ЧПУ.....	301
Гузев В. И., Нуркенов А. Х., Нестерюк Е. В. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЖЕСТКОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	306
Киреев С. Ю., Штепа В. Н., Шинкевич К. С., Крылов В. А., Камардина Н. В., Маркина М. А., Балыбердин А. С. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ФЕРРАТА БАРИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В СТАНКОСТРОЕНИИ	313
Зверовщиков А. Е., Кривоносов К. В., Черепенников И. В. ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА СТАНКА 16K25Б НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУДО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПОДШИПНИКОВ	318
Зверовщиков А. Е., Черепенников И. В., Кривоносов К. В. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ	323
Сердюков Е. Д., Сабиров Ф. С. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ НА ЛАЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ	328

Киреев С. Ю., Киреева С. Н., Синенкова С. Р. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ КОБАЛЬТ-КАРБИД ВОЛЬФРАМА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА.....	333
Киреев С. Ю., Козлов Г. В., Киреева С. Н., Синенкова С. Р. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ-КАРБИД ВОЛЬФРАМА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА.....	338
Феофанов А. Н., Веселов Э. Э., Колошкина И. Е. ГРАФОВАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТЕП-МОДЕЛЕЙ КАК ОСНОВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	342

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТАНКОСТРОЕНИЯ – 2025

Сборник статей по материалам
II Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием

Под общей редакцией
д.т.н., профессора **Зверовщикова** Александра Евгеньевича;
к.т.н., доцента **Нестерова** Сергея Александровича;
к.т.н., доцента **Кочеткова** Дениса Викторовича;
к.т.н., доцента **Большакова** Германа Сергеевича

Материалы публикуются в авторской редакции

Корректор *В. В. Чувашова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*
Дизайн обложки *И. В. Шваревой*

Подписано в печать 27.12.2025.
Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 20,58.
Тираж 21. Заказ № 845.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru