

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Кыргызский национальный университет им. Жусупа Баласагына

Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П.А. Соловьева

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Российский университет транспорта

ISSN 2618-6810

МАШИНОСТРОЕНИЕ: ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№8

Санкт-Петербург, 2025

УДК 62 : 001.8895

ББК 34.41

М38

М38 **Машиностроение: инновационные аспекты развития:**
Материалы международной научно-практической конференции.
– Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2025. – № 8. – 79 с. – DOI:
10.26160/2618-6810-2025-8.

Представлены материалы VIII международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (28 марта 2025г.). Направления работы конференции: 1) Машиноведение; 2) Тяжелое машиностроение; 3) Общее машиностроение; 4) Среднее машиностроение; 5) Точное машиностроение; 6) Ремонт машин и оборудования; 7) Смежные вопросы развития машиностроения; 8) Современные проблемы инженерного образования.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием машин и механизмов различного технологического назначения.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

Жуков Иван Алексеевич – директор НИЦ «МашиноСтроение», заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

Каракеев Таалайбек Тултемирович – профессор кафедры информационных технологий и программирования КНУ, д.ф.-м.н., профессор;

Малинин Владислав Георгиевич – профессор кафедры техносферной безопасности Орловского ГАУ, д.ф.-м.н., профессор;

Надеждин Игорь Валентинович – профессор кафедры прикладной механики РГАТУ им. П.А. Соловьева, д.т.н., профессор;

Палочкин Сергей Владимирович – профессор кафедры основ конструирования машин МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., профессор;

Хакимзянов Рустам Рафитович – профессор кафедры профессор кафедры «Транспортное строительство» РУТ (МИИТ), д.т.н., профессор.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/miar.html>
<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2025-8>

ISSN 2618-6810

© Авторы, 2025
© НИЦ МС, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Машиноведение

Бирюков В.П., Якубовский А.А. Повышение износостойкости стали при лазерной закалке	5
Бирюков В.П., Горюнов Я.А. Определение триботехнических характеристик фотополимера с различным временем обработки ультрафиолетовым излучением.....	9

Тяжелое машиностроение

Губанов О.М. Влияние внутренних напряжений на потери в трансформаторной стали.....	14
Азимова Л.Г. Особенности слоевой сушки железорудных окатышей	17
Киселев П.А., Оглезнева С.А., Поздеева Т.Ю. Подготовка порошков нержавеющей стали для 3D-печати методом Metal Binder Jetting	21
Куликова Е.С., Рыжиков В.А. Совершенствование методов расчёта радиальных подшипников, работающих в условиях жидкостного трения	24
Речицкий С.В., Речицкий А.С. Инновационные аспекты развития уплотняющих машин.....	28
Решетников Д.С., Барухов С.А., Остапук С.И., Преснова Е.С., Уткина А.А. Интеллектуальные методы диагностики и прогноза технического состояния прокатных станов в условиях высоких нагрузок	31

Общее машиностроение

Бородин Н.А., Икоева А.З., Князев А.В., Ткачев В.В., Поздняков Е.В., Доманин К.А. К определению силовых характеристик фрикционного предохранителя	35
--	----

Среднее машиностроение

Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Малыгин Н.И. Разработка мехатронно-технологических комплексов на базе копировальных токарно-карусельных станков	39
Нгуен Ван Чунг, Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Зависимость показателя жесткости схемы напряженного состояния от основных технологических параметров после реверсивного выглаживания	45

Точное машиностроение

Уткина А.А., Преснова Е.С., Решетников Д.С., Барухов С.А., Остапюк С.И. Прецизионные методы механической обработки биосовместимых материалов.....	50
--	----

Ремонт машин и оборудования

Кривошеев Н.С., Жарковский А.А. Применение цифровых двойников для задач диагностики и обслуживания гидравлических приводов	55
Быков П.А., Калашников И.Е., Михеев Р.С. Технология ремонта антифрикционных слоистых композиций системы сталь-баббит.....	59

Смежные вопросы развития машиностроения

Тихонов Н.Ф., Илларионов И.Е., Стрельников И.А. Ресурсосберегающие технологии в противопригарных покрытиях	62
Чепурнова Е.К., Солецкий В.В., Чернышова Д.В. Конечно-элементное моделирование теплопереноса в дефлекторной системе охлаждения лопатки газотурбинного двигателя	67

Современные проблемы инженерного образования

Пипкин Ю.В., Зинченко А.М. Многозначность термина «технологическая оснастка» как фактор инженерной подготовки в области машиностроения	70
Тараховский А.Ю. Реверс-инжиниринг в техническом образовании: как готовить востребованных специалистов	73

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

Бирюков В.П., Якубовский А.А.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва*

Ключевые слова: лазерная закалка, микротвердость, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, износостойкость.

Аннотация. Работа посвящена определению влияния площади лазерного упрочнения образцов стали 25 на коэффициенты трения и износостойкость при испытании в паре трения с объемно закаленными контробразцами стали 40Х и введении в зону трения графитовой смазки. Установлено, что при 65% площади закалки износостойкость образцов повышалась в 3,65 раза по сравнению с образцами исходной стали. Образцы при 100% площади закалки показали несколько меньшую износостойкость, что связано с образованием зон отпуска при наложении дорожек закалки. Коэффициенты трения у образцов при 100% площади закалки имели минимальные значения, за ними по возрастанию следовали образцы с 65% площади закалки и материала основы.

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF STEEL DURING LASER HARDENING

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: laser hardening, microhardness, coefficient of friction, wear rate, wear resistance.

Abstract. The work is devoted to determining the effect of the laser hardening area of 25 steel samples on the friction coefficients and wear resistance when tested in a friction pair with volumetrically hardened 40Cr steel counter-plates and graphite lubricant is introduced into the friction zone. It was found that at 65% of the quenching area, the wear resistance of the samples increased by 3.65 times compared with the samples of the original steel. Samples with 100% of the quenching area showed slightly lower wear resistance, which is associated with the formation of tempering zones when applying quenching tracks. The friction coefficients of the samples at 100% of the quenching area were minimal, followed in ascending order by samples with 65% of the quenching area and the base material.

Образцы [1] из низкоуглеродистой нормализованной стали AISI 1012 диаметром 25 мм и толщиной 20 мм был подвержен поверхностному лазерному оплавлению при мощности излучения 10, 30, 50 и 90 Вт скорости сканирования луча 1 и 7 мм/с. Максимальная твердость поверхностного слоя, расплавленного лазером, составляла около 400-460 НВ, в то время как твердость основного металла находилась в диапазоне 170-195 НВ. Высокие значения твердости обработанной поверхности были обусловлены фазовыми превращениями, которые произошли из-за растворения первоначально существовавших фаз феррита и перлита, и были получены бейнит, мартенсит с высокой степенью закалки, образовавшимися в результате высокой скорости охлаждения из жидкой фазы. Снижение значений твердости с 450-350 НВ до 350-300 НВ наблюдалось

при снижении мощности лазерной обработки с 90 Вт до 50 Вт. Установлено, что при более высокой мощности лазерной обработки получают участки с более тонкой микроструктурой и более высокой твердостью.

При проведении экспериментов [2] применяли два типа сталей применяемых для изготовления зубчатых колес JIS-SCM415 и JIS-S45C. Для обработки образцов был использован CO₂-лазер DC-015 с диффузионным охлаждением. Наилучшие результаты были получены при мощности лазера 1000 Вт, скорости сканирования 100 мм/с и размере пятна 1 мм, что привело к получению поверхностной твердости образцов 672 HV. Испытания на износ показали, что скорость износа шестерён, закалённых лазером, была сопоставима с новыми обычными шестернями, а потеря массы составляла 10-12 мг/ч. Исследование показало, что лазерная поверхностная закалка может значительно повысить износостойкость зубчатых колёс.

В экспериментах [3] использовали прямоугольные образцы стали 65Г (0,65%), из листового металлопроката толщиной 4 мм. Средняя микротвердость образцов после объёмной закалки и отпуска с использованием для охлаждения воды и масла составили 530 и 470 HV соответственно. Лазерное упрочнение образцов было проведено на волоконном лазере ЛС-10 с диаметром волокна 100 мкм и оптической головки IPG D30W с модулем колебания луча при мощности излучения 1,0-2,25 кВт. При линейных колебаниях луча были получены максимальные значения микротвердости зоны закалки 875-904 HV, при глубине слоя 612-630 мкм. При круговых колебаниях луча микротвердость была ниже и составила 650-714 HV, а глубина слоя закалки составила 289-479 мкм. При закалке круглым пятном микротвердость была 630-850 HV, а глубина слоя составила 756-1036 мкм. Абразивная износостойкость была повышена для образцов с закалкой при линейных колебаниях луча в 2,5 и 1,7 раза по сравнению со сталью 65Г в исходном состоянии и после объёмной закалки соответственно.

Целью работы было определение износостойкости и коэффициентов трения стали 25 с различной площадью закалки в паре с контробразцом из стали 40Х при предварительном нанесении графитовой смазки на поверхности образцов.

Эксперименты по лазерному упрочнению были выполнены при удельной плотности мощности лазерного луча 15-48 Вт·с/мм² на прямоугольных образцах из стали 25 с размерами 70×20×12 мм. Были применены два режима обработки расфокусированным лучом и колеблющимся лучом по нормали к вектору скорости обработки с частотой 216 Гц. При 100% площади (S) закалки образцов лазерное упрочнение было проведено с перекрытием дорожек 15%, кроме того, вторая партия образцов была обработана с 65% площадью закалки. Для проведения металлографических исследований были применены цифровой микроскоп и микротвердомер ПМТ-3-с цифровой камерой при нагрузке на алмазную пирамиду Виккерса 0,98 Н.

Определение износостойкости и коэффициентов трения были выполнены на машине трения с вертикальной осью вращения при ступенчатом изменении нагрузки. Испытания проводили по схеме: плоский прямоугольный образец – торец кольцевого контробразца втулки (сталь 40Х, 48-53 HRC). На образцы перед испытаниями была нанесена графитовая смазка.

На рисунке 1 представлены графики коэффициентов трения образцов в зависимости от давления. Полученные результаты показали, что коэффициенты трения при 100% площади закалки имели минимальные значения коэффициентов трения 0,03-0,04, за ними следовали образцы с 65% площади закалки с коэффициентами трения 0,05-0,06 и наибольшие коэффициенты трения были у образцов исходной стали 25, которые имели значения 0,08-0,09.

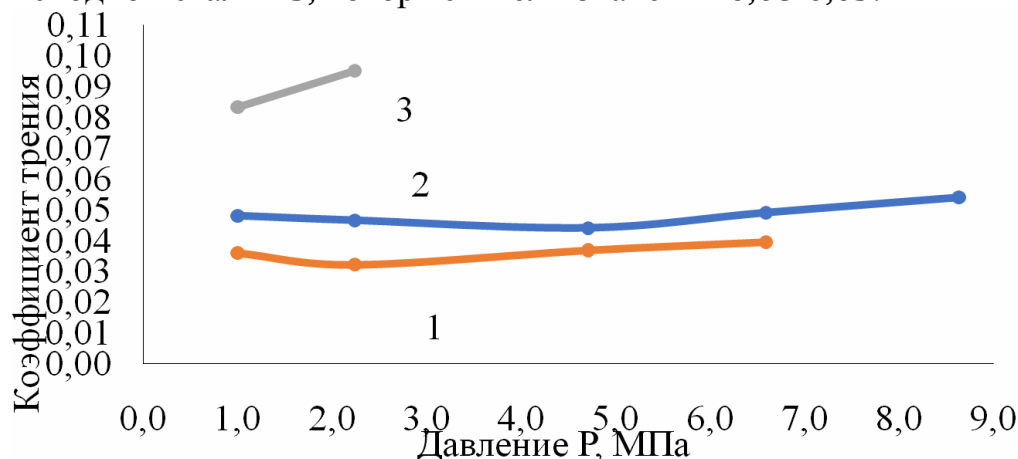


Рис. 1. Зависимость коэффициентов трения от давления на образцы стали 25:
1 – 100% S, 2 – 65% S, 3 – HB 180

В таблице 1 представлены средние значения интенсивности изнашивания образцов и контрообразцов стали 25 и 40X соответственно. Анализ результатов определения интенсивности изнашивания показал, что образцы с 65% площадью закалки имели износостойкость в 3,63 раза выше, чем материал основы, а образцы с площадью закалки 100% и 15 перекрытием дорожек уступали им по износостойкости в связи с образованием зон отпуска в местах перекрытия дорожек закалки.

Табл. 1. Интенсивность изнашивания образцов (сталь 25) и контрообразцов (сталь 40X)

№	Средняя интенсивность изнашивания	
	Образец, $I_{1cp} \times 10^{-9}$	Контрообразец, $I_{2cp} \times 10^{-9}$
1	0,64	0,48
2	0,43	0,57
3	1,65	1,07

Выводы. Определено влияние площади закалки образцов на интенсивность изнашивания и коэффициенты трения в паре с закаленными образцами стали 40X. Установлено, что наибольшей износостойкостью обладали образцы при 65% площади закалки, которая превышала износостойкость исходной стали 3,63 раза. Минимальные значения коэффициентов трения были у образцов при 100% площади закалки.

Список литературы

1. Elalem A.A., Elhamali S. Effect of Applying Nd-YAG Laser on Microstructure and Hardness of AISI 1012 Steel Surface // International Science and Technology Journal. 2024, vol. 35(1), pp. 1-9. doi.org/10.62341/ISTJ.

2. Elmanov A.B., Norkobilov A.T. Tojiev D.A. Timprovement of wear resistance properties of metal gears using laser surface hardening // Science and Innovative Development. 2024, vol. 7(4), pp. 46-56.
3. Бирюков В.П., Криворотов В.И., Луканин Б.Е. Оценка свойств образцов из стали 65Г после лазерного и традиционных методов упрочнения применительно к эксплуатации сельскохозяйственных и лесотехнических машин // Фотоника. – 2024. – Т. 18, №7. – С. 550-562.

Сведения об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Якубовский Антон Алексеевич – младший научный сотрудник.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПОЛИМЕРА С РАЗЛИЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, фотополимеризация в ванне, цифровая обработка светом, коэффициент трения, скорость скольжения.

Аннотация. Работа посвящена определению триботехнических характеристик фотополимера с различным временем обработки ультрафиолетовым излучением. Образцы, созданные на 3D-принтере по технологии Digital Light Processing, подвергались промывке в изопропиловом спирте 99,9% с последующей обработкой ультрафиолетовым излучением в течение 5, 30, 45 и 60 минут перед испытаниями. Установлено влияние шероховатости контактирующей поверхности контробразца из стали 40X на момент трения при нагрузке 1,64 МПа и скорости скольжения 0,25-2,19 м/с. Минимальные значения момента трения 0,072 Нм получены при трении в паре с контробразцом 40X с шероховатостью поверхности Ra 0,16-0,32 и смазывании гидравлическим маслом МГЕ-10А.

DETERMINATION OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PHOTOPOLYMER WITH DIFFERENT TIMES OF ULTRAVIOLET RADIATION TREATMENT

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, vat photopolymerization, digital light processing, coefficient of friction, sliding speed.

Abstract. The work is devoted to determining the tribological characteristics of a photopolymer with different ultraviolet curing treatment times. Samples printed on a 3D printer using Digital Light Processing technology were washed in 99.9% isopropyl alcohol followed by ultraviolet curing treatment for 5, 30, 45 and 60 minutes before testing. The effect of the roughness of the contacting surface of a 40Cr steel counter-sample on the friction torque under a load of 1.64 MPa and a sliding speed of 0.25-2.19 m/s was established. The minimum friction torque values of 0.072 Nm were obtained during friction in a pair with a 40Cr counter-sample with a surface roughness of Ra 0.16-0.32 and lubrication with MGE-10A hydraulic oil.

В машиностроении создание объекта по технологии Digital Light Processing (DLP) является одним из методов аддитивного производства. Аддитивные технологии занимают все более существенное место в промышленности. Наблюдается рост возможных применений в отрасли. По мимо создания функциональных прототипов, фотополимерная печать может найти применение в узлах трения. 3D-печать по технологии DLP может быть полезна в машиностроении благодаря высокой точности геометрических параметров изготавливаемых деталей, простоте использования, широкому выбору материалов для печати, времени производства, а также возможности наполнения

светочувствительной смолы различными антифрикционными компонентами. С каждым годом растет количество работ, посвященных исследованию свойств различных материалов, в том числе и для печати с применением технологии DLP. Но несмотря на обширные исследования механических свойств фотополимерных материалов, трибологические характеристики остаются недостаточно изученными. Настоящая работа погружается в данную проблему, рассматривая результаты экспериментального исследования, посвященного влиянию времени обработки образцов ультрафиолетовым (УФ) излучением на их трибологические характеристики после выращивания и промывки. Цикл экспериментов был сосредоточен на выявление корреляции между временем УФ-отверждения и износостойкостью образцов, изготовленных методом DLP в паре со стальным контробразцом.

Цикл испытаний по определению триботехнических характеристик был проведен для образцов с размерами $30 \times 30 \times 3,5$ мм из двух материалов [1] изготовленных по технологии фотополимеризации векторным сканированием (SLA) и послойной экструзии расплавленного материала (FDM). При получении образцов по технологии SLA применялся Nd: YV04-лазер мощностью 500 мВ с длиной волны 355 нм и частотой импульсов 10-150 кГц. Испытания были проведены по схеме «шар (сталь GCr15) – плоскость» при нагрузке 3 и 5 Н в течение 30 минут. Длина хода подвижной опорной плиты составляла 5 мм. Наименьший коэффициент трения 0,32 был выявлен у образцов из акрилонитрил-стирол-бутадиена (ABS), что в 2 раза ниже, чем у образцов из фотополимерной смолы 0,64. Самая малая глубина лунки износа 23 мкм зафиксирована у образцов из фотополимерной смолы, что в 1,6 раз меньше, чем у образцов из ABS 37 мкм. Найдено, что в сравнении с образцами из ABS, образцы из фотополимерной смолы имели большую износостойкость.

Образцы [2] диаметром 30 и высотой 10 мм были изготовлены из ABS смолы, на 3D-принтере по технологии SLA. Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме «шар (фотополимер) – диск (фотополимер)» при нагрузке 10 Н и скорости скольжения 157,08 мм/с в течение 30 минут. Шар, диаметром 12,7 мм, располагался на расстоянии 5 мм от центра диска. В качестве смазочного материала использовалось масло KF-96 с кинематической вязкостью 500, 1000 и 2000 сСт. Наименьший коэффициент трения 0,123 был обнаружен при испытании образцов из фотополимера с маслом, вязкостью 2000 сСт, что в 4,26 раз ниже, чем при испытании без смазочного материала 0,524. При испытании с маслом вязкостью 500 и 1000 сСт коэффициент трения составил 0,267 и 0,139, соответственно. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $1,31 \times 10^{-4}$ мм³/Нм выявлена при испытании образцов из фотополимера с маслом, вязкостью 2000 сСт, что в 2,1 раза ниже, чем при испытании без смазочного материала $2,76 \times 10^{-4}$ мм³/Нм. Установлено, что при испытании фотополимеров коэффициент трения и удельной интенсивности изнашивания уменьшаются с увеличением кинематической вязкости смазочного материала.

Для определения триботехнических характеристик были выбраны образцы [3] диаметром 30 и высотой 5 мм, изготовленные по технологии DLP из фотополимерной смолы на основе полибутиленсукцината (PBS). После

выращивания образцы подвергались дополнительной обработке ультрафиолетовым излучением в течение 4 и 12 минут. Для определения триботехнических характеристик было задействовано две схемы испытаний. Испытания с применением первой схемы «шар (сталь 100Cr6) – диск (фотополимер)» проходили при нагрузке 2 и 20 Н и скорости скольжения 250 мм/с. Шар, диаметром 6 мм, находился на расстоянии 8 мм от центра диска. Испытания с применением второй схемы «шар (сталь 100Cr6) – диск (фотополимер)» осуществлялась при нагрузке 600 мН с частотой колебаний 2 Гц. Длина хода составляла 6 мм. При испытании с применением первой схемы, при нагрузке 2 Н, наименьший коэффициент трения 0,197 был зафиксирован у образцов, подвергшихся дополнительной обработке в течение 4 минут, что в 4,74 раза ниже, чем у образцов, подвергшихся дополнительной обработке в течение 12 минут 0,934. При испытании с применением второй схемы наименьший коэффициент трения 0,216 замечен у образцов, подвергшихся дополнительной обработке в течение 12 минут, что в 1,46 раз ниже, чем у образцов, подвергшихся дополнительной обработке в течение 4 минут 0,316. Наименьшая глубина лунки износа 23,392 мкм выявлена у образца, подвергшихся дополнительной обработке в течение 12 минут. Установлено, что обработка ультрафиолетовым излучением повышает триботехнические свойства фотополимера.

Результаты обзора иностранных работ показали, что проблема определения триботехнических характеристик фотополимера недостаточно разработана и весьма слабо освещается. Целью работы являлось определение триботехнических характеристик фотополимера в зависимости от времени отверждения УФ-излучением и условий испытаний.

Образцы были спроектированы в системе автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-3D, подготовлены к печати в программе ChiTuBox и выращены на фотополимерном 3D-принтере Anycubic Photon Mono 2 по технологии DLP с заданными параметрами: высота отверждаемых слоев 40 мкм, время отверждения слоев 3 с. Плотность энергии составляла 15 мВт/см². После печати образцы подвергались очистке изопропиловым спиртом в течение 5 минут, высушивались при комнатной температуре и помещались в устройство для очистки и дополнительного УФ-отверждения Anycubic Wash & Cure 2.0 в течение 5, 30, 45 и 60 минут, что позволило получить партии образцов с разной степенью полимеризации. В качестве материала для печати использовалась фотополимерная смола Anycubic ECO UV Resin Clear на основе эпоксидированного соевого масла, в качестве контробразца была выбрана сталь 40X (48-52 HRC). Контробразец представлял из себя втулку с внешним диаметром 30 мм, внутренним 25 мм и высотой 10 мм. Выбор стали 40X обусловлен высокой распространенностью в машиностроении, приемлемой ценой, легкой обрабатываемостью, а также высокими механическими и эксплуатационными характеристиками.

Трибологические испытания были разбиты на серии экспериментов. Первая серия испытаний, выполненная по схеме «торец кольцевой оправки (сталь 40X) – широкая сторона образца (фотополимер)», была посвящена определению момента трения при фиксированной нагрузке 1,64 МПа и увеличивающейся скорости скольжения 0,25-2,19 м/с в условиях смазки маслом МГЕ-10А. Во

второй серии испытаний, проводившихся по идентичной схеме «торец кольцевой оправки (сталь 40X) – широкая сторона образца (фотополимер)», определялся момент трения при давлении 1,64-2,24 МПа и фиксированной скорости скольжения 0,25 м/с также в условиях смазки маслом МГЕ-10А. Шероховатость поверхности образцов из фотополимерной смолы составляла $Ra\ 0,32\ \mu\text{м}$. Шероховатость поверхности контрообразцов их стали 40X составляла $Ra\ 0,32$ и $Ra\ 0,08\ \mu\text{м}$. Обработка поверхности контрообразцов проводилась средней и тонкой притиркой наждачной бумагой зернистостью Р600 и Р1200. Момент трения и нагрузка на образцы определяли в непрерывном режиме с помощью тензометрических датчиков, размещенных в машине трения.

На рисунке 1 представлены результаты испытаний по определению момента трения при фиксированной нагрузке 1,64 МПа и увеличивающейся скорости скольжения 0,25-2,19 м/с. Как видно, образцы со временем обработки УФ-излучением в течение 5 минут показывали самый низкий момент трения 0,072 Нм (рис. 2, а).

На рисунке 2 приведены результаты испытаний по определению момента трения при нагрузке 1,0-2,24 МПа и постоянной скорости скольжения 0,25 м/с.

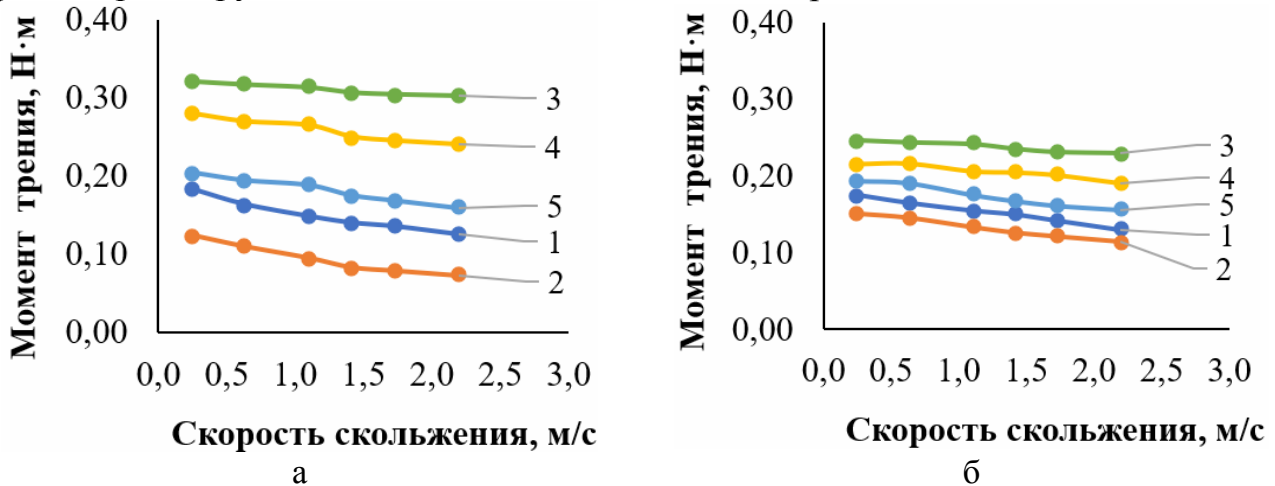


Рис. 1. Графики изменения момента трения относительно скорости скольжения при шероховатости поверхности $Ra\ 0,16-0,32$ (а) и $Ra\ 0,08$ (б) стали 40X: 1 – необработанные образцы, 2 – УФО 5 минут, 3 – УФО 30 минут, 4 – УФО 45 минут, 5 – УФО 60 минут

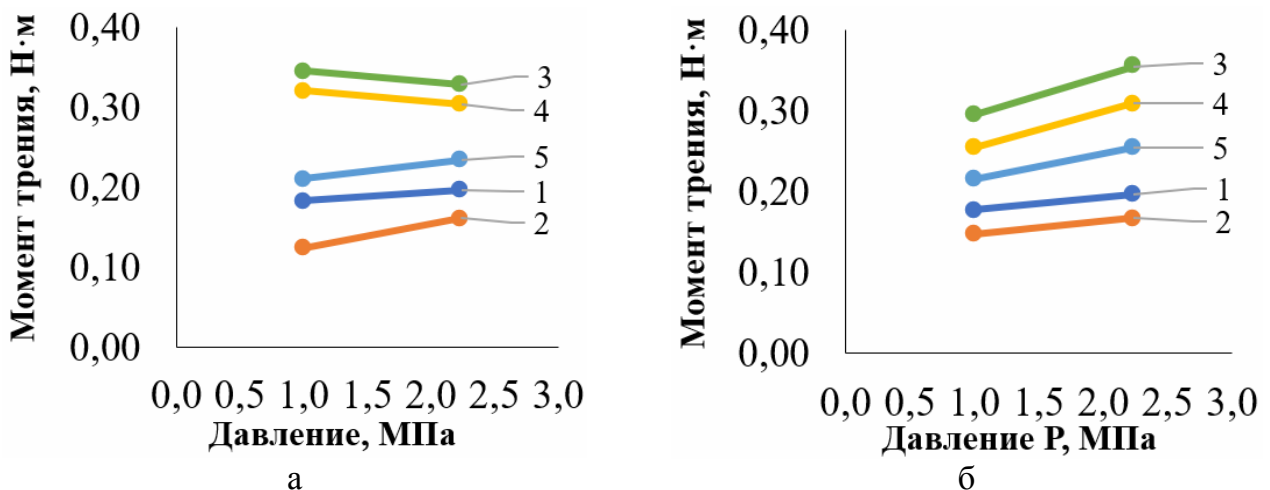


Рис. 2. Графики изменения момента трения относительно давления при шероховатости поверхности $Ra\ 0,16-0,32$ (а) и $Ra\ 0,08$ (б) стали 40X: 1 – необработанные образцы, 2 – УФО 5 минут, 3 – УФО 30 минут, 4 – УФО 45 минут, 5 – УФО 60 минут

Наименьшим моментом трения 0,147 Нм обладали образцы со временем обработки УФ-излучением в течение 5 минут, что в 2,4 раза ниже, чем у образцов со временем обработки УФ-излучением в течение 30 минут 0,355 Нм.

Выводы. В результате проведенных исследований определены закономерности изменения момента трения при испытании образцов фотополимеров в паре со сталью 40Х в зависимости от шероховатости ее поверхности при нагрузке 1,64-2,24 МПа и скорости скольжения 0,25-2,19 м/с. Наименьшим моментом трения обладали образцы, обработанные УФ-излучением в течение 5 минут.

Список источников

1. Weijun Z., Xuemei Y., Meiling W. Tribological properties of bionic surface of 3D printed UV and ABS polymer materials // Journal of Hebei University (Natural Science Edition). 2020, vol. 40 (3), pp. 204-248. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1565.2020.03.003.
2. Park S., Son J., Woo S., Ryu E., Lee H., Tribological Characteristics of ABS-like Resin According to Silicon Oil Viscosity // Tribology and Lubricants. 2020, vol. 36 (6), pp. 365-370. DOI: 10.9725/kts.2020.36.6.365.
3. Pieniak D., Michalczewsk R., Firlej M., Krzysiak Z., Przystupa K., Kalbarczyk M., Osuch-Słomka E., Snarski-Adamski A., Gil L., Seykorova M., Surface Layer Performance of Low-Cost 3D-Printed Sliding Components in Metal-Polymer Friction // Production Engineering Archives. 2024, vol. 30 (3), pp. 361-376. DOI: 10.30657/pea.2024.30.36.

Сведения об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОТЕРИ В ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Губанов О.М.

ПАО АФК «Система», Москва

Ключевые слова: трансформаторная сталь, внутренние напряжения, макронапряжения, магнитные свойства, доменная структура, магнитограммы, градиент магнитного поля.

Аннотация. В работе рассмотрено влияние внутренних напряжений на формирование магнитных свойств в готовой трансформаторной стали. Показано, что с ростом напряжений возрастают удельные магнитные потери и снижается магнитная индукция за счет «размытия» доменной структуры. Выявлено, что при вырезке образцов магнитные свойства ухудшаются за счет роста внутренних напряжений порезки, полученных на краевых участках, которые могут быть сняты при последующем отжиге. Отмечается, что в отдельных случаях, снятие внутренних напряжений при отжиге приводит к микрокороблению образцов, что препятствует получению истинной картины магнитных свойств стали.

THE INFLUENCE OF INTERNAL STRESSES ON LOSSES IN TRANSFORMER STEEL

Gubanov O.M.

PJSFC «Sistema», Moscow

Keywords: transformer steel, internal stresses, macrostresses, magnetic properties, domain structure, magnetograms, magnetic field gradient.

Abstract. The paper examines the effect of internal stresses on the formation of magnetic properties in finished transformer steel. It is shown that with increasing stresses, specific magnetic losses increase and magnetic induction decreases due to the "blurring" of the domain structure. It was found that when cutting samples, magnetic properties deteriorate due to the growth of internal cutting stresses obtained in the edge areas, which can be removed during subsequent annealing. It is noted that in some cases, the removal of internal stresses during annealing leads to micro-warping of samples, which prevents obtaining a true picture of the magnetic properties of steel.

Общеизвестным является тот факт, что воздействие упругих напряжений на ферромагнетик вызывает изменение абсолютной величины его намагниченности, что приводит к его дополнительной деформации и называется механострикцией [1].

Упругие напряжения в электротехнических сталях промышленного производства могут возникать как на границах неметаллических включений и границах раздела фаз (например, железо – форстерит), так и быть реализованными в макрообъеме стальной полосы в результате проведения отдельных технологических операций при ее производстве [2, 3].

Для оценки характера распределения напряжений в листах стали можно использовать метод магнитной памяти металла, который позволяет проводить оценку напряженно-деформированного состояния и выявлять локальные зоны концентрации напряжений [4].

Для определения влияния внутренних напряжений на уровень магнитных свойств трансформаторной стали, листы готовой стали разбивались на участки с

высокой и относительно низкой концентрацией напряжений, и из данных участков вырезались стандартные образцы размером 30×305 мм.

На полученных образцах измерялись внутренние напряжения и магнитные свойства после вырезки из листа на гильотинных ножницах, а также после отжига, проведенного для снятия напряжений, полученных при порезке.

Анализ полученных результатов показал, что с ростом внутренних напряжений происходит увеличение удельных магнитных потерь $P_{1,7/50}$ и снижение магнитной индукции B_{800} . Данные зависимости характерны как для образцов после вырезки, так и после проведения термообработки для снятия внутренних напряжений порезки при 850°С с выдержкой в течении 12 мин (рис. 1, 2).

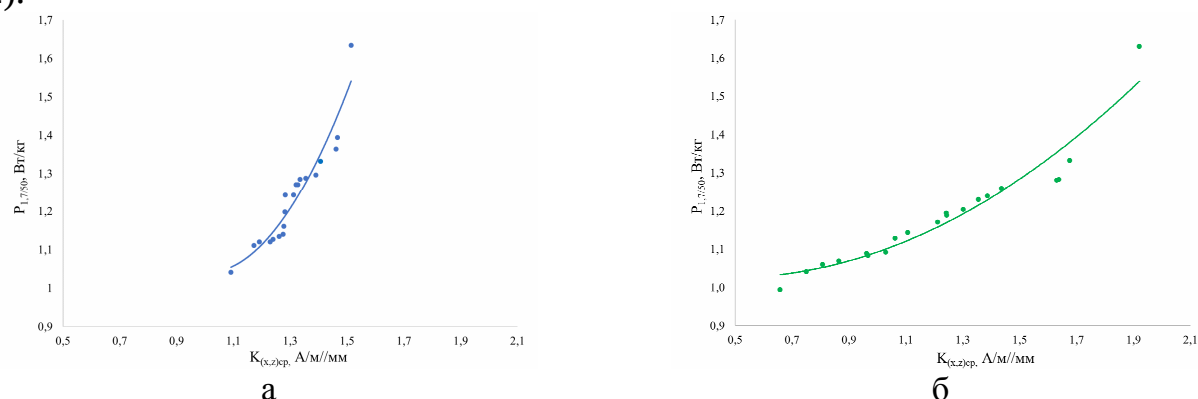


Рис. 1. Изменение удельных магнитных потерь $P_{1,7/50}$ с ростом внутренних напряжений, а) после вырезки, б) после термообработки

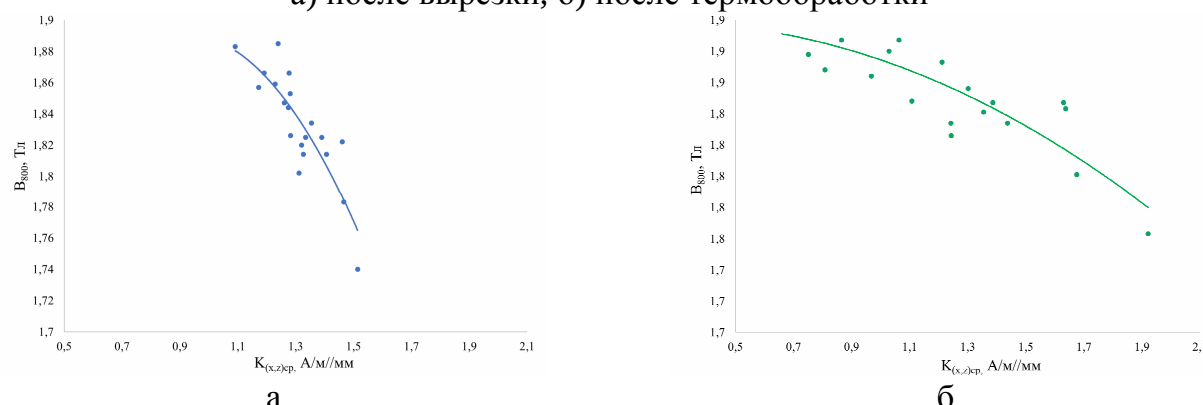


Рис. 2 Изменение магнитной индукции B_{800} с ростом внутренних напряжений: а) после вырезки, б) после термообработки

В процессе исследований было отмечено, что часть образцов с высоким исходным уровнем напряжений после отжига самопроизвольно покоробились.

Анализ результатов для образцов, снятие внутренних напряжений в которых привело к микророблению, показал, что макронапряжения, выявленные в плоскости листа, после вырезки изменяются и по большей части увеличиваются, что привело к росту общего уровня внутренних макронапряжений, удельные магнитные потери ожидаемо повышенные.

Данный эффект можно объяснить тем, что напряжения некомпенсированные в макрообъеме образца (напряжения порезки) наиболее способствуют «размытию» доменной структуры стали.

Таким образом, подтверждено, что при вырезке образцов магнитные свойства ухудшаются за счет роста внутренних напряжений порезки, полученных на краевых участках.

Показано, что термообработка вырезанных образцов приводит к релаксации напряжений порезки и улучшению магнитных свойств, однако, снятие напряжений происходит только до уровня макронапряжений, полученных в листе. Для образцов с высоким уровнем напряжений их релаксация при отжиге сопровождается микрокороблением металла, что приводит к общему росту макронапряжений, хотя и сопровождается некоторым улучшением магнитных свойств.

Список литературы

1. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Под. ред. В.Д. Дурнева. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.
2. Дубов А.А. Определение металлургических и технологических дефектов в изделиях машиностроения с использованием магнитной памяти металла // Металлург. – 2015. – № 2. – С. 62-65.
3. Дубов А.А., Дубов А.Ал., Демидов А.Н. Определение механических свойств по параметрам твердости в зонах концентрации напряжений, выявленных в изделиях методом магнитной памяти металла // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 4. – С. 45-49.
4. ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Термины и определения». – М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.

Сведения об авторе:

Губанов Олег Михайлович – к.т.н., управляющий директор.

ОСОБЕННОСТИ СЛОЕВОЙ СУШКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Азимова Л.Г.

Азербайджанский технический университет, Азербайджан, Баку

Ключевые слова: шихта, сталь, окатыш, механические свойства, сушки, удельный расход.

Аннотация. Цель настоящего исследования – анализ работы зон сушки с учетом происходящих процессов переувлажнения и влияния их на качественные показатели обожженных окатышей на примере обжиговых машин ОАО «Лебединский ГОК». Рассмотрено закономерности развития зоны переувлажнения и ее роль в формировании качества обожженных окатышей.

FEATURES OF LAYER DRYING OF IRON ORE PELLETS

Azimova L.G.

Azerbaijan Technical University, Azerbaijan, Baku

Keywords: charge, steel, pellet, mechanical properties, drying, specific consumption.

Abstract. The purpose of this study is to analyze the operation of drying zones, taking into account the ongoing processes of overmoistening and their impact on the quality indicators of fired pellets using the example of roasting machines of Lebedinsky GOK OJSC. The regularities of the development of the overmoistening zone and its role in the formation of the quality of fired pellets are considered.

Повышение технико-экономических показателей работы обжиговых машин и металлургических свойств обожженных окатышей определяется разработкой и реализацией комплексных подходов к конструкциям и режимам зон сушки, увязывающих свойства сырых окатышей с работой последующих технологических зон.

Использование приведенных в ней экспериментальных данных, а также развитых модельных представлений часто затруднено по двум причинам: либо результаты получены для условий сушки одного окатыша, либо условия слоевого процесса не увязаны ни с качеством сырых окатышей, ни с работой последующих технологических зон и в конечном счете с качеством обожженного продукта. Обширные экспериментальные данные и результаты использования математических моделей процесса сушки показывают, что зона переувлажнения после 1,0-1,5 мин выдержки появляется на высоте 140-200 мм (от постели) и перемещается в слое со скоростью 50-150 мм/мин в зависимости от удельного расхода тепла (рис. 1). Полученные данные согласуются с результатами промышленных испытаний работы зоны сушки 1 Михайловского ГОКа [1], где появление зоны переувлажнения было обнаружено на высоте. Наличие протяженной по высоте слоя и длине машины зоны переувлажнения не является обязательным для зоны сушки 1. Как видно из рисунка 1, при относительно больших значениях удельного расхода тепла ($q_1 > 1,25$ МДж/т) и высота слоя $H_c < 300$ мм зона переувлажнения может «выйти» из слоя уже в первую минуту сушки.

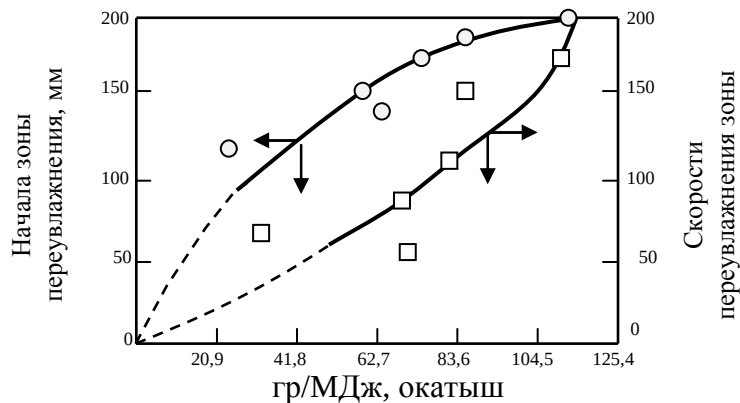


Рис. 1. Зависимость начала зоны переувлажнения и скорость передвижения зоны переувлажнения от удельного расхода тепла

В настоящее время эксплуатационные условия работы зоны сушки 1 на обжиговых машинах ЛебГОКа следующие: скорость фильтрации 1,20-1,45 м/с; температура теплоносителя 140-240°C; высота слоя сырых окатышей 310-330 мм; удельный расход тепла 62,7-125,4 МДж/т. При этих условиях зона переувлажнения формируется уже в середине первой камеры, а ее величина и высота зависят от удельного расхода тепла q_1 . Удельный расход тепла q_1 , оказался наиболее представительным параметром не только для процесса слоевой сушки, но и для определения ее эффективности. Здесь выявилась еще одна особенность: индивидуальные особенности окатышей, определяющие сушку одиночного окатыша (пористость, вещественный и гранулометрический составы), существенно не оказываются на закономерностях слоевой сушки [2, 3].

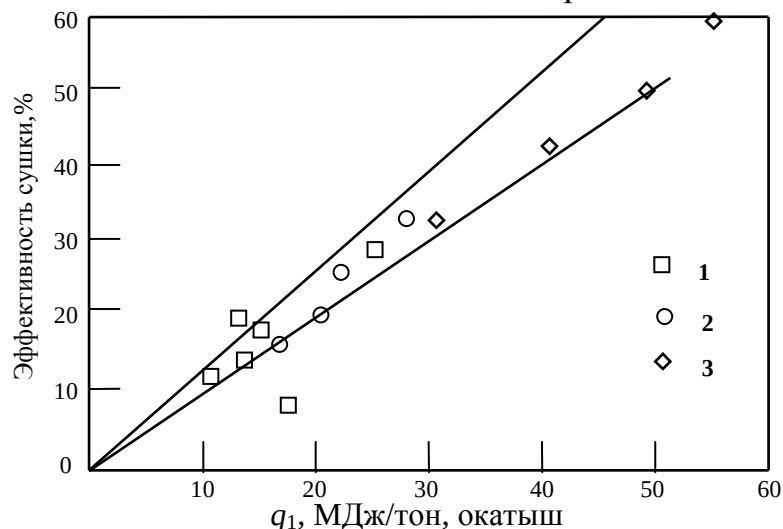


Рис. 2. Эффективность сушки окатышей от удельного расхода тепла q_1 в зоне сушки:
1 – ЛебГОК; 2 – КачГОК; 3 – КостГОК

Из данных, приведенных на рисунке 2 видно, что слоевая сушка Лебединских, качканарских и костомукшских окатышей, отличающихся и структурой, и свойствами, не только качественно, но и количественно подчиняется одной закономерности. Некоторый разброс точек обусловлен колебаниями температуры теплоносителя и его влагосодержания. Одна из характеристик процесса сушки окатышей – скорость, ее определяли по уравнению:

$$U_c = (G_{H_2O}/60)(W_H - W_k), \text{ кг/мин,}$$

где G_{H_2O} – количество влаги, удаленной из слоя, кг/ч.

Скорость сушки окатышей (средняя по высоте слоя) изменялась по длине зоны экстремально с максимумом в пределах 70-140 кг/мин. Как правило, максимальные значения U_c располагались в середине зоны, пониженные значения U_c в начале зоны обусловлены падением температур теплоносителя на входе в слой, а в конце зоны – уменьшением скоростей фильтрации теплоносителя из-за наличия перетока в соседнюю вакуум-камеру, переувлажнение окатышей оказывает негативное влияние не только на газодинамику слоя в целом, но и на структуру отдельных окатышей.

Изменение влажности окатышей, содержащих 0,35% индийского бентонита, исследовали при взаимодействии с холодной ($t = 20^\circ\text{C}$) и горячей ($t = 60^\circ\text{C}$) водой. После высушивания определяли их прочность. Начальная влажность составляла ~10%. Результаты показали, что наиболее резкое переувлажнение происходит в течение первой минуты пребывания в воде, как в холодной, так и в горячей, причём в первом случае оно составило 0,6%, во втором – 1,2%. Соответственно снизилась прочность сухих окатышей: резко в течение первой минуты пребывания в воде и слабо в последующем. Так, при переувлажнении на 1,2% прочность высушенных окатышей уменьшалась в два раза по сравнению с базовыми – с 80 до 40 Н/окатыш.

При слоевой сушке сократить или ликвидировать зону переувлажнения можно при снижении высоты слоя менее 250 мм или повышении температуры теплоносителя на входе в колосники до 400°C и выше. Однако выполнение этих реальных условий обычно связано с необходимостью модернизации тепловых схем обжиговых машин.

Данные свидетельствуют о том, что термостойкости окатышей ухудшается с увеличением удельной поверхности концентрата и диаметра окатышей. Введение повышающих пластичность и комкуемость добавок позволяет улучшить термостойкость окатышей, что объясняется ростом пластичности структуры, которая при этом способна выдержать более высокие градиенты избыточного давления без разрушения.

Как уже было отмечено, окатыши при переувлажнении разбухают в результате расклинивающего действия дополнительной влаги. В зоне сушки 2 благодаря относительно низкой температуре теплоносителя ($150-250^\circ\text{C}$) они не разрушаются, но и полностью не высыхают из-за непродолжительного пребывания в ней (2-3 мин). Несмотря на многообразие факторов, влияющих на сушку одиночного окатыша, ее продолжительность колеблется в пределах 2-3 мин. Однако в реальных условиях сушки поверхностных слоев (в зоне сушки 2) продолжительность процесса возрастает до 4-5 мин в связи с умеренными температурами и влиянием контактных поверхностей лежащих ниже слоев. Поэтому окатыши поверхностного слоя, несколько разбухшие, с определенной остаточной влажностью поступают в зону сушки 3, где температура теплоносителя колеблется в пределах $300-600^\circ\text{C}$. Результаты определения прочности сухих окатышей различного размера, прошедших приблизительно половину зоны сушки 3 при разных температурах теплоносителя, представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты определения прочности сухих окатышей

Температура в зоне, °С	570	520	330
Прочность окатышей, Н/окатыш,			
фракции, мм:			
>16	47	73	88
>14	49	56	73
>10	35	43	59
>5	36	36	41

Из этих данных видно, что целые окатыши различных фракций, отобранные в середине зоны сушки З, имели прочность тем ниже, чем выше была температура. Это свидетельствует о том, что разрушающее действие на структуру окатыша со стороны избыточного давления пара и усадки пропорционально температуре. Можно предположить, что чем выше эта температура, тем вероятнее образование дефектов структуры (трещин, расслоений и т.п.), которые не «залечиваются» при последующем обжиге, что приводит к экспериментально наблюдаемому снижению прочности обожженных окатышей.

Список литературы

1. Евстюгин С.Н., Абзалов В.М., Архипова Т.М., Клейн В.И., Тверитин В.А. Оптимизация процессов сушки окатышей на обжиговых машинных Костомукшского ГОКа // Сталь. – 1986. – №6. – С. 8-10.
2. Азимова Л.Х., Шукуров Р.И., Машаев Ш.М., Намазова С.Р., Намазов С.Н. Основные характеристики и технология слоевой сушки железорудных гранул // Научные труды АзТУ. – 2018. – №4. – С. 23-29.
3. Азимова Л.Х., Тагиев Т.А. Получение железорудных гранул с использованием технологии сушки // Международная научно-практическая конференция Азербайджана и Турции: "Образование, наука, технологии". Баку: АзТУ, 2019. – С. 336-339.

Сведения об авторе:

Азимова Лала Гаджиага кызы – докторант.

ПОДГОТОВКА ПОРОШКОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ METAL BINDER JETTING

Киселев П.А.¹, Оглезнева С.А.², Поздеева Т.Ю.¹

¹ООО «Научно-производственное объединение «Керамет», Пермь;

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь

Ключевые слова: 3D-печать, Metal Binder Jetting, нержавеющая сталь, подготовка порошков, аддитивное производство, фракционный состав.

Аннотация. В последние годы аддитивное производство становится важным направлением в промышленном производстве, где качественно подготовленные металлические порошки играют ключевую роль для получения изделий с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками. Данная статья посвящена изучению процесса подготовки порошков нержавеющей стали для применения в технологии Metal Binder Jetting.

PREPARING STAINLESS STEEL POWDERS FOR 3D PRINTING USING METAL BINDER JETTING

Kiselev P.A.¹, Oglezneva S.A.², Pozdeeva T.Yu.¹

¹LLC «Keramet Powder Metallurgy-Pump Production», Perm;

²Perm National Research Polytechnic University, Perm

Keywords: 3D printing, Metal Binder Jetting, stainless steel, powder preparation, additive manufacturing, fractional composition.

Abstract. In recent years, additive manufacturing has become an important area in industrial production, where high-quality prepared metal powders play a key role in obtaining products with high mechanical and operational characteristics. This article is devoted to the study of the process of preparing stainless steel powders for use in Metal Binder Jetting technology.

Метод Metal Binder Jetting (далее MBJ), основанный на послойном нанесении жидкого связующего на металлический порошок с последующим спеканием, демонстрирует значительный потенциал для производства высококачественных изделий из нержавеющей стали. При этом подготовка исходного порошка, его морфология, размер и распределение частиц являются важными параметрами, влияющими на свойства конечного изделия.

Нержавеющая сталь занимает особое место благодаря своим антикоррозийным свойствам, высокой прочности и износостойкости. Традиционные методы обработки данной стали требуют высоких энергозатрат и сложного технологического процесса, что делает аддитивные технологии привлекательной альтернативой. Однако для успешного применения MBJ необходима детальная оценка способов получения порошка, их доработка и оптимизация под конкретные технологические требования [1, 2].

В данной работе были использованы порошки нержавеющей стали марок 304L и 316L, полученные методом водной атомизации. Частицы порошка имели неоднородное распределение по фракционному составу от 5 до 45 мкм, что требовало дополнительной сепарации и сортировки.

Перед процессом печати для удаления влаги порошок проходил процесс предварительной сушки при 180°C в течение 2 ч в вакуумном сушильном шкафу и сухой просев согласно требованиям ISO 4497:2020 «Metallic powders – Determination of particle size by dry sieving».

Однородность размеров частиц напрямую влияет на равномерность распределения порошка в процессе его подачи во время печати, плотность спекания и, как следствие, механические свойства готового изделия. Идеальным считается узкий разброс частиц по размерам, что обеспечивает максимальную плотность и минимизацию внутренних дефектов.

Для сохранения свойств нержавеющей стали важно соблюдение химического состава и отсутствие примесей, способных ухудшить спекание или вызвать коррозионные процессы в конечном изделии. Особое внимание уделяется контролю содержания углерода и кислорода, влияющих на прочность и коррозионную стойкость материала.

Для контроля содержания углерода и кислорода использовали титриметрический метод по ГОСТ 12344-2003 и ГОСТ 27417-87 на анализаторе МЕТАВАК-CS [3-4]. По результатам установлено, что массовая доля элементов в порошке нержавеющей стали лежит в допустимых пределах: до 0,35% для углерода и до 0,1% для кислорода, соответственно.

Сферическая форма частиц способствует улучшению текучести порошка и его равномерной укладке при послойном нанесении. Дополнительно для повышения текучести в порошок добавляли тиксотропную добавку – аэросил в количестве 0,02 масс. % с последующим сухим перемешиванием в конусообразном смесителе в течение 1 ч с мелющими телами в соотношении 1:2, соответственно. Данный метод повышения текучести порошка известен из общей теории по порошковой металлургии, что применимо и для аддитивных порошков, в том числе. В приведенной работе использовали аморфный диоксид кремния марки «Ковелос» R902 (ООО «Экокремний, ТУ 2168-002-14344269-09).

Исследование морфологии частиц порошка с тиксотропной добавкой проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 (рис. 1).

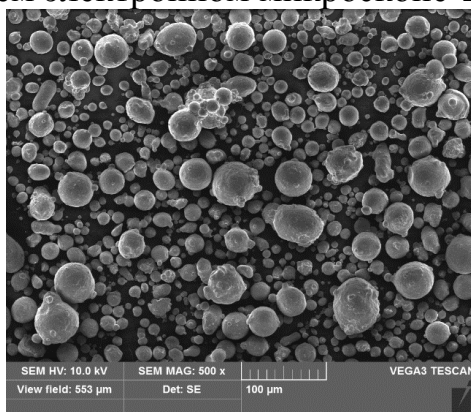


Рис. 1. СЭМ - фото порошка нержавеющей стали 316L с добавкой диоксида кремния марки «Ковелос» R902

По результатам работы следует вывод, что для успешного применения порошков в МВJ важными параметрами являются: размер и распределение частиц, морфология и их форма, а также химическая чистота, от которых зависят физические показатели порошка (текучесть, насыпная плотность и плотность

утряски), что влияет на физико-механические и структурные свойства конечного изделия.

Гомогенное распределение порошка при послойном нанесении при печати обеспечивает формирование впоследствии изделий с высокой плотностью, близкой к теоретической $7,8-7,89 \text{ г/см}^3$ для литых нержавеющей сталей марок 304L и 316L.

Для формирования высокоплотных изделий высокую роль играет текучесть порошка, которую можно улучшить с помощью тиксотропных добавок.

Кроме самих свойств порошков следует отметить их стоимость, что в аддитивном производстве является ключевым фактором рентабельности. Для уменьшения себестоимости продукции на ООО «НПО «Керамет» используются существенно более дешевые и массово производимые порошки, полученные методом распыления водой, а не высокоскоростным методом или плазменным.

Список литературы

1. Беляев Л.В., Аборкин А.В. Введение в аддитивные технологии: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2023. – 248 с
2. Dini F., Ghaffari S. A., Jafar J., Hamidreza R., Marjan S. A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition // Metal Powder Report. 2019, vol. 75, no. 2, pp. 95-100.
3. ГОСТ 12344-2003. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения углерода. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск: Стандартинформ, 2008. – 15 с.
4. ГОСТ 27417-87. Порошки металлические. Методы определения кислорода. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.

Сведения об авторах:

Киселев Павел Аркадьевич – соучредитель;

Оглезнева Светлана Аркадьевна – д.т.н., профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций;

Поздеева Татьяна Юрьевна – к.т.н., инженер-исследователь.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Куликова Е.С., Рыжиков В.А.

*Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донского государственного технического университета, Шахты*

Ключевые слова: режимы износа пар трения, геометрические параметры подшипников, подшипник радиальный, жидкостное трение, радиальный зазор, долговечность пары трения.

Аннотация. Долговечность работы подшипников скольжения во многом зависит от режимов трения и наличия масляной плёнки на поверхностях трения. Наилучшим режимом работы подшипников скольжения является режим жидкостного трения, при котором поверхности трения разделены устойчивым слоем смазочного материала. Для вычисления основных параметров подшипников скольжения с оптимизацией основных трибологических характеристик, целесообразно использовать численные методы на вычислительной машине. Проведено обоснование оптимизационных расчётов численным методом, с использованием программного продукта для расчета подшипников с модулем ступичного подшипника автомобиля. Это позволило оптимизировать геометрические параметры подшипников скольжения при работе в режиме жидкостного трения. Приведены графические зависимости геометрических параметров ступичного подшипника от скоростных режимов.

IMPROVING THE CALCULATION METHODS FOR RADIAL BEARINGS OPERATING UNDER LIQUID FRICTION CONDITIONS

Kulikova E.C., Ryzhikov V.A.

*Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch)
of Don State Technical University, Shakhty*

Keywords: wear modes of friction pairs, geometric parameters of bearings, radial bearing, liquid friction, radial clearance, durability of friction pair.

Abstract. The service life of plain bearings largely depends on the friction modes and the presence of an oil film on the friction surfaces. The best operating mode for plain bearings is the liquid friction mode, in which the friction surfaces are separated by a stable layer of lubricant. To calculate the main parameters of plain bearings with optimization of the main tribological characteristics, it is advisable to use numerical methods on a computer. The optimization calculations were substantiated by a numerical method, using a software product for calculating bearings with a hub bearing module of a car. This made it possible to optimize the geometric parameters of plain bearings when operating in the liquid friction mode. Graphic dependencies of the geometric parameters of the hub bearing on speed modes are given.

Долговечность работы динамически нагруженных механизмов во многом зависит от работы узлов трения. Одним из наиболее нагруженных элементов является подшипник [1]. На него влияют нагрузочные и скоростные факторы текущего рабочего режима. Наличие слоя смазки трущихся поверхностей является основным условием долговечности пар трения. Для снижения выработки динамически нагруженных элементов подшипника целесообразно рассмотреть его работу в условиях изменяющихся нагрузок. В качестве смазочного материала

целесообразно использовать масло соответствующей марки масла, обеспечивающей достаточную его адгезию на поверхности трения [1].

Наибольшее распространение в настоящее время получили подшипники качения. Однако в ряде случаев целесообразно использовать в узлах трения подшипники скольжения, имеющие малые габариты и высокую нагрузочную способность. Работа таких подшипников в режиме жидкостного трения практически переводит их в режим безызностной эксплуатации [2].

При расчёте основных параметров подшипников скольжения, работающих в условиях жидкостного трения, следует учитывать совокупность условий работы, геометрических параметров и трибологических факторов [3]. Изменение геометрических параметров с учётом вязкости смазочного материала, может в широких пределах изменять режимы от граничного, полужидкостного к жидкостному трению и наоборот. Оптимизация расчёта в этом случае может быть основана на минимизации коэффициента трения для режима жидкостного трения в определённом диапазоне частоты вращения и толщины масляного слоя при определённом давлении.

Для вычисления основных параметров подшипников скольжения с оптимизацией основных трибологических характеристик, целесообразно использовать численные методы на ПК, с помощью программного продукта АРМ WinMachin с модулем АРМ Plain,

Исходные данные для расчёта следующие.

1. Геометрия подшипника – диаметр вала, длина вкладыша, чистота обработки поверхности, радиальный зазор.

2. Условия работы – радиальная сила, скорость вращения, температура окружающей среды, модуль Юнга, теплопроводность, коэффициент трения при граничной смазке.

3. Параметры масла – марка масла, теплоёмкость и плотность масла.

Результаты расчёта включают в себя: реальный коэффициент трения, толщину масляной плёнки, диаметр вкладыша, среднюю температуру и давления масла в подшипнике. Оптимизация расчёта подшипника сводится к минимизации коэффициента трения в пределах 0,05-0,07, что соответствует жидкостному трению для заданного радиального зазора и марки масла.

Нами была разработана конструкция ступичного подшипника скольжения передней подвески автомобиля ВАЗ 2190. По результатам оптимизационного расчёта на рисунке 1 показана зависимость коэффициента трения от радиального зазора при частоте вращения $n = 1000$ об/мин при смазке маслом МС-20. На рисунке 2 показана гистограмма амплитуды и интервалы колебания радиального зазора при работе подшипника. Среднее изменение радиального зазора составляет 0,0081 мм и обеспечивает создание устойчивой масляной плёнки.

Для работы подшипника в режиме жидкостного трения радиальный зазор должен быть в пределах 0,08-0,15 мм. Толщина масляной плёнки в этом случае составляла 0,066 мм при давлении $P = 0,219$ МПа.

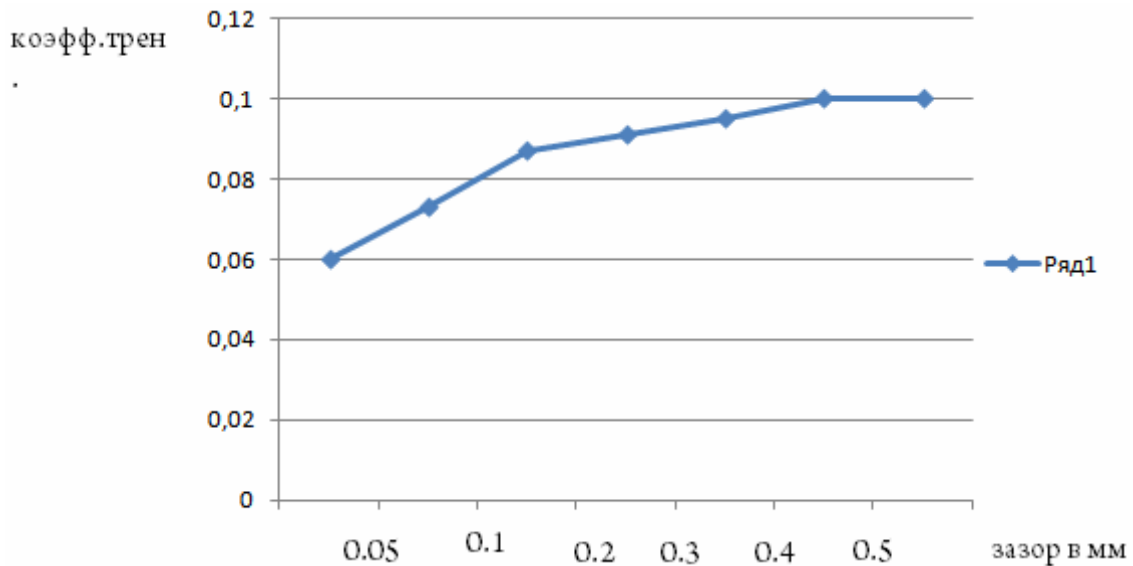


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от радиального зазора

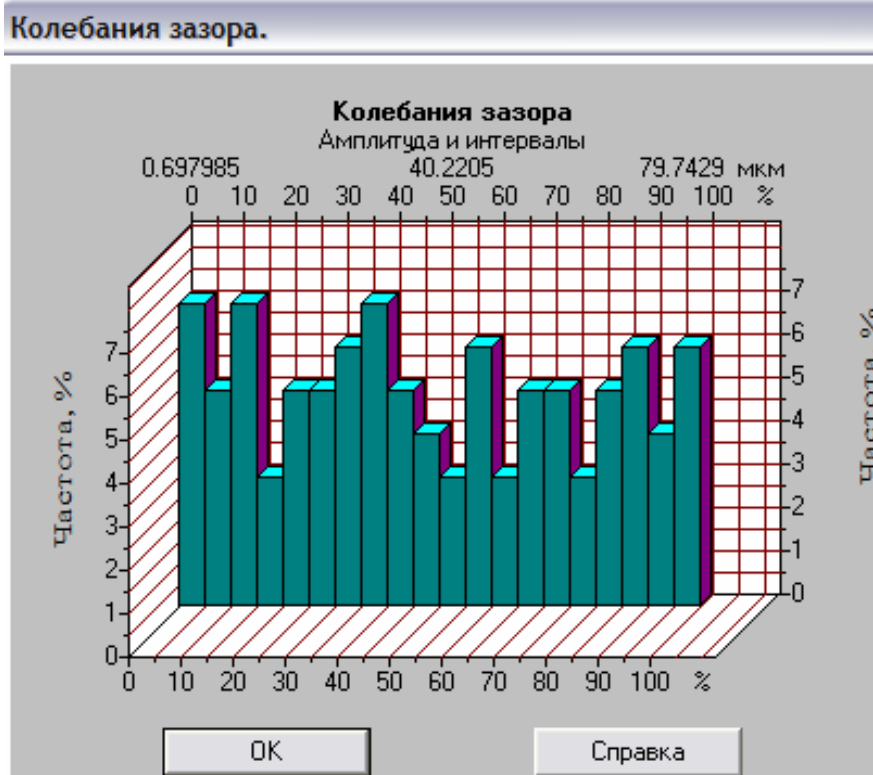


Рис. 2. Гистограмма амплитуды и интервалы колебания радиального зазора при работе подшипника

Выводы

1. Численные методы расчёта с использованием программного продукта APM WinMachin с модулем APM Plain, позволяет оптимизировать геометрические параметры подшипников скольжения при работе в режиме жидкостного трения.

2. Для заданных условий работы ступичного подшипника автомобиля ВАЗ 2190, величина радиального зазора, обеспечивающего минимальные потери на трение, составляет 0,08-0,15 мм.

3. При увеличении частоты вращения до $n = 1000$ об/мин, подшипник работает в режиме полужидкого трения. В диапазоне частот $n = 1000-1800$ об/мин подшипник переходит в режим жидкостного трения.

Список литературы

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление, эксплуатация машин): Учебник – 5-е изд. – М.: МСХА, 2002. – 632 с.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611466. Программа расчета характеристик подшипников скольжения, смазываемых водяным конденсатом "Подшипник-Водяной конденсат" / В.Л. Ильинов, В.В. Рухлинский. – Зарег. 09.04.2007.
3. Миневич А.А. Виды повреждения и разрушения подшипников качения // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сборник научных трудов. – Минск: Технопринт, 2001. – С . 428-431.

Сведения об авторах:

Куликова Елена Сергеевна – магистрант, преподаватель;

Рыжиков Владимир Александрович – д.т.н., профессор.

ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН

Речицкий С.В.¹, Речицкий А.С.²

¹*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск;*

²*Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск*

Ключевые слова: валец, дорожный каток, деформация, уплотнение, гусеницы, цепь, обечайка.

Аннотация. Чаще всего дорожно-строительные материалы уплотняются дорожными катками с помощью различных вальцов, которые аналогичны колесному движителю. Гусеничный движитель чаще всего применяется на строительных и сельскохозяйственных машинах. Уплотняющие органы дорожных катков, аналогичные гусеничному движителю не применяются. Не смотря на то, что гусеничная ходовая система отличается от колесной конструкцией, кинематикой и динамикой, она может быть применены для уплотнения дорожно-строительных материалов.

INNOVATIVE ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF COMPACTION MACHINES

Rechitskiy S.V.¹, Rechitskiy A.S.²

¹*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk;*

²*Siberian State University of Railways, Novosibirsk*

Keywords: roller, road roller, deformation, seal, tracks, chain, shell.

Abstract. Most often, road construction materials are compacted by road rollers using various drums, which are similar to a wheel propeller. The crawler propeller is most often used on construction and agricultural machines. The sealing bodies of road rollers, similar to the caterpillar propeller, are not used. Although the crawler undercarriage differs from the wheel structure, kinematics and dynamics, it can be used for compacting road construction materials.

В различных самоходных строительных машинах используют различные виды ходовых устройств (движителей), необходимых как для передвижения самих машин, так и для их работы. Самыми распространенными типами ходовых устройств в строительных машинах являются колесные и гусеничные. Эти типы ходовых устройств существенно отличаются друг от друга по конструкции, кинематике и динамике движения и имеют свои достоинства и недостатки [1].

Если рассмотреть эти два типа движителя с точки зрения их применимости в качестве уплотняющего рабочего органа, то можно отметить следующее.

Высокое удельное давление на грунт колесного движителя в связи с малой контактной площадью свойственно и вальцовым дорожным каткам, необходимо для уплотнения дорожно-строительных материалов с высокой прочностью, т.е. на заключительных стадиях уплотнения. Но эта свойство колесного движителя негативно влияет на уплотнение свежесыпанных, малопрочных дорожно-строительных материалов на начальной стадии уплотнения дорожными гладковальцовыми катками. Обычные строительные машины на колесах после проезда за собой оставляют колею на рыхлом грунте. Это же происходит при уплотнении рыхлых дорожно-строительных материалов гладковальцовым

дорожным катком, что приводит к выдавливанию уплотняемого материала из-под вальца и образованию валков этого материала вдоль уплотняемой полосы и к образованию волны перед вальцом. Поэтому для уплотнения дорожно-строительных материалов приходится применять звено, состоящее из нескольких катков различной массы.

Частично эту проблему решают пневмошинные дорожные катки. В зависимости от дорожных условий используют пневмошины высокого – 0,5...0,7 МПа, среднего – 0,3...0,4 МПа, низкого – 0,15...0,25 МПа и сверхнизкого – 0,05...0,08 МПа давления. Последние имеют большую площадь контакта с грунтом и лучшие тяговые качества, обеспечивают более плавное движение и лучшую сохранность машины. Т.е. изменяя давление в пневмошине можно изменять площадь контакта с грунтом и тем самым изменять удельное давление на грунт. Эта особенность пневмошинного движителя является преимуществом пневмошинных дорожных катков по сравнению с гладковальцовыми.

Рабочие органы современных дорожных катков – гладкие вальцы, вибровальцы, пневмошины – являются аналогами колесных движителей с их достоинствами и недостатками и не являются идеальными и универсальными. Поэтому задача разработки новых или совершенствования существующих рабочих органов дорожных катков до сих пор является актуальной.

С этой точки зрения следует обратить внимание на гусеничный движитель. Ведь одно из преимуществ гусеничных машин – низкое удельное давление на грунт – можно использовать при уплотнении свежесыпанных рыхлых материалов. Гусеницы по отношению к колесам оказывают меньшее уплотнение на грунт, следовательно, гусеничный рабочий орган уплотняющей машины будет эффективней дорожного катка с жестким гладким вальцем и даже с пневмошинами [2].

В этой связи можно обратить внимание на работы [3, 4], в которых обечайка вальца выполнена из бесконечной гусеничной цепи, состоящей из шарнирно соединенных между собой одинаковых звеньев. Процесс уплотнения заключается в перекатывании при движении катка по поверхности уплотняемого дорожно-строительного материала гусеничной обечайки, которая укладывает поочередно каждое свое звено, в результате чего происходит предварительное уплотнение грунта с постепенно увеличивающимся удельным давлением на него, что исключает волнообразование перед таким вальцом, свойственное гладковальцовым каткам, тем самым повышая эффективность и качество уплотнения.

По мере уплотнения дорожно-строительного материала его прочность увеличивается, поэтому необходимо увеличивать и удельное давление на него. Для этого бесступенчато изменяется форма обечайки, в результате чего уменьшается длина нижней ветви гусеничной обечайки, контактирующей с уплотняемым материалом, т.е. уменьшается площадь контакта и происходит увеличение удельного давления на уплотняемый материал.

По аналогии с гусеничным движителем, где гусеницы делают из крупных или мелких звеньев, гусеничные обечайки так же можно делать из звеньев разной ширины. Крупные звенья обеспечивают более равномерное и меньшее давление на грунт, гусеницы с мелкими звеньями более быстроходны и создают большее

давление на уплотняемый материал. При уплотнении предварительно уплотненных, прочных, связных грунтов, особенно на заключительном этапе уплотнения, когда необходимо создавать большее удельное давление на уплотняемый грунт, можно использовать сменную обечайку с узкими звеньями и широкими зазорами между ними, т.е. сменив гусеничную обечайку можно получить дорожный каток с решетчатым вальцом. Аналогично, используя сменную обечайку с выступами (кулачками) на звеньях можно получить дорожный каток с кулачковым вальцом.

Применение конструкции вальца [3, 4] позволит усовершенствовать любой существующий гладковальцовый каток без существенных доработок его конструкции и не создавать новые конструкции катков в целом.

Можно сделать вывод, что рассмотренная конструкция вальца с гусеничной обечайкой [3, 4] позволит модернизировать существующие дорожные катки без существенных доработок их конструкции, а так же использовать комплект сменных обечаек различной конструкции для расширения номенклатуры уплотняемых материалов одним дорожным катком, снижая номенклатуру и количество используемых на объекте дорожных катков.

Список литературы

1. Соловьев А.Н. Справочник инженера предприятия технологического транспорта и спецтехники. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – Т. 1. – 672 с.
2. Лиманский Р.Н., Дуганова Е.В., Недостатки и преимущества гусеничного транспорта в сравнении с колесным // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018003165>.
3. Патент №2784841 РФ. Валец дорожного катка / С.В. Речицкий, В.В. Лебедева, А.С. Речицкий, Е.А. Колоколкина. – Заявка №2022114117 от 24.05.2022; опубл. 30.11.2022, Бюл. №34.
4. Патент №2784842 РФ. Гусеничный валец дорожного катка для уплотнения асфальтобетона / С.В. Речицкий, В.В. Лебедева, А.С. Речицкий, Е.А. Колоколкин. – Заявка №2022114120 от 24.05.2022; опубл. 30.11.2022, Бюл. №34.

Сведения об авторах:

Речицкий Сергей Васильевич – к.т.н., доцент кафедры строительных машин, автоматизации и электротехники.

Речицкий Александр Сергеевич – студент.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ НАГРУЗОК

Решетников Д.С., Барухов С.А., Остапюк С.И., Преснова Е.С., Уткина А.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Ключевые слова: прокатный стан, диагностика, прогноз, интеллектуальные методы, машинное обучение, цифровой двойник, техническое состояние.

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к диагностике и прогнозированию технического состояния прокатных станов, эксплуатируемых в условиях высоких нагрузок. Особое внимание уделено интеллектуальным методам обработки данных, таким как машинное обучение, нейросетевые модели и построение цифровых двойников. Проведён анализ ограничений традиционных методов технического контроля и обоснована эффективность перехода к предиктивным стратегиям управления. Представлены примеры внедрения интеллектуальных систем в металлургическом производстве.

INTELLIGENT METHODS FOR DIAGNOSING AND PREDICTING THE TECHNICAL CONDITION OF ROLLING MILLS UNDER HIGH LOAD CONDITIONS

Reshetnikov D.S., Barukhov S.A., Ostapyuk S.I., Presnova E.S., Utkina A.A.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

Keywords: rolling mill, diagnostics, prediction, intelligent methods, machine learning, digital twin, technical condition.

Abstract. The article examines modern approaches to diagnosing and predicting the technical condition of rolling mills operating under high load conditions. Special attention is given to intelligent data processing methods, such as machine learning, neural network models, and the development of digital twins. The limitations of traditional technical control methods are analyzed, and the effectiveness of transitioning to predictive maintenance strategies is substantiated. The article presents examples of the implementation of intelligent systems in metallurgical production.

Прокатные станы являются основным оборудованием в металлургическом производстве, от надёжности и устойчивости функционирования которых напрямую зависит производственная эффективность и качество готовой продукции. В условиях интенсивной эксплуатации, сопровождающейся воздействием высоких механических и тепловых нагрузок, значительно возрастает риск внезапных отказов и износа ключевых элементов оборудования. Как показывают данные практики, регламентные методы технического обслуживания не всегда позволяют своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и спрогнозировать остаточный ресурс оборудования [1].

В последние годы в связи с развитием технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных активно внедряются интеллектуальные методы диагностики и прогноза технического состояния промышленных систем. Их использование позволяет реализовать переход от реактивного и

регламентного подходов к предиктивному обслуживанию, что существенно снижает вероятность внеплановых простоев и снижает эксплуатационные затраты [2].

Прокатный стан представляет собой комплекс оборудования, предназначенного для деформации металлических заготовок с целью получения продукции заданного профиля. Основными элементами прокатного стана являются рабочие и опорные валки, станины, редукторы, подшипниковые узлы, электроприводы и системы управления. В процессе эксплуатации оборудование подвергается динамическим нагрузкам, вибрационным воздействиям, термическому расширению, а также агрессивному воздействию среды (влаги, пыли, температура).

Наиболее уязвимыми узлами являются подшипники, валки, направляющие и приводы. Износ, микротрещины, люфты, перекосы и перегрев становятся причиной ухудшения качества продукции, увеличения энергозатрат и, в ряде случаев, отказа оборудования. При этом характер повреждений зачастую носит скрытый и прогрессирующий характер, что требует постоянного мониторинга состояния и применения надёжных систем диагностики [3].

Среди применяемых методов технической диагностики наиболее распространены вибродиагностика, ультразвуковой контроль, тепловизионная съёмка, акустическая эмиссия и визуальный осмотр. Эти подходы позволяют выявить явные отклонения, однако имеют ряд ограничений:

- необходимость остановки оборудования;
- высокая зависимость от квалификации оператора;
- ограниченные возможности прогноза развития дефекта;
- отсутствие интеграции с цифровыми системами управления.

Таким образом, становится очевидной необходимость применения новых, автономных методов, способных анализировать информацию в реальном времени и прогнозировать поведение оборудования с учётом его индивидуальных особенностей [4].

Интеллектуальные методы основываются на обработке эксплуатационных данных с применением алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Их применение позволяет создавать адаптивные модели, выявляющие скрытые закономерности, недоступные классическим способам анализа. В частности, широко применяются следующие подходы.

– Нейронные сети (ANN, RNN, CNN) для автоматизации технологических процессов (повышение качества управления электроприводами, составление традиционного описания которых является затруднительным, прогнозирование износа валков, автоматизация процесса прокатки, для расчета оптимального времени выдачи металлических заготовок из нагревательной печи учитывая модель нагрева металла, диагностика оборудования, для анализа состояния электропривода в работе для повышения точности и надёжности диагностирования.

– Метод опорных векторов (SVM) применяется для классификации технических состояний оборудования путём построения оптимальной разделяющей гиперплоскости в пространстве признаков. Этот подход позволяет эффективно разделять данные даже в условиях высокой размерности и

ограниченного объема обучающей выборки. За счёт использования ядерных функций SVM обеспечивает возможность нелинейного разделения классов, что особенно актуально при анализе сложных технических процессов с неоднородной структурой данных.

– Алгоритмы ансамблевого обучения, в частности случайные леса (Random Forest) и градиентный бустинг (Gradient Boosting), демонстрируют высокую точность при решении задач регрессии, связанных с прогнозированием остаточного ресурса оборудования. Эти методы формируют множество слабых моделей (деревьев решений), комбинируя их в единую прогностическую систему, устойчивую к переобучению и способную учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами эксплуатационных данных и признаками деградации.

– Методы кластеризации, такие как алгоритмы k-средних, DBSCAN или иерархическая кластеризация, используются для автоматического выделения групп наблюдений с близкими характеристиками. Их применение позволяет выявлять нетипичные режимы работы оборудования, а также скрытые аномалии, не имеющие явно выраженных признаков. Это даёт возможность своевременного обнаружения отклонений от нормального состояния, что критически важно в задачах предиктивного технического обслуживания и повышения надёжности промышленных систем [5].

Одним из перспективных направлений является построение цифрового двойника прокатного стана — виртуальной модели, синхронизированной с реальными данными датчиков и способной прогнозировать техническое состояние системы в реальном времени. Такие решения успешно применяются в ряде металлургических предприятий и демонстрируют высокую эффективность [6].

По данным [7], на ряде прокатных предприятий России внедрены системы мониторинга и прогнозирования технического состояния на базе нейросетевых алгоритмов. Например, использование ансамблевых моделей для анализа вибрационных и температурных характеристик позволило сократить количество внеплановых простоев оборудования на 25% и повысить точность прогноза технических отказов до 92%.

В другом случае [8], построение цифрового двойника стана 2000 позволило в реальном времени прогнозировать изменения геометрии валков, что привело к снижению брака и уменьшению энергозатрат на корректировку параметров прокатки. Интеграция интеллектуальной системы в АСУТП также позволила сократить время реакции на отклонения до 3-5 секунд.

Несмотря на высокую эффективность интеллектуальных методов, их внедрение сопряжено с рядом трудностей. Во-первых, требуется наличие надёжной инфраструктуры сбора и хранения данных. Во-вторых, необходимы квалифицированные специалисты, способные обучать и сопровождать модели. В-третьих, существует риск переобучения моделей на ограниченных выборках или в условиях изменения технологических режимов.

В то же время развитие технологий ИИ (промышленного интернета вещей), доступность вычислительных мощностей и рост качества сенсорных

систем создают условия для широкого распространения предиктивной диагностики в металлургии.

Таким образом, интеллектуальные методы диагностики и прогноза технического состояния прокатных станов представляют собой эффективный инструмент повышения надёжности, производительности и устойчивости металлургического оборудования. Их применение позволяет своевременно выявлять критические состояния, прогнозировать поведение системы и оптимизировать техническое обслуживание. Современные разработки в области искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников позволяют интегрировать данные методы в существующую производственную инфраструктуру, формируя основу для умных, автономных производств будущего.

Список литературы

1. Куликов И.А., Панов М.А. Современные подходы к управлению техническим состоянием промышленных систем // Вестник машиностроения. – 2020. – №7. – С. 45-49.
2. Логинов С.Н., Егорова Т.В. Прогнозирование отказов оборудования с использованием методов машинного обучения // Информационные технологии. – 2021. – №1. – С. 21-27.
3. Смирнов Ю. В. Надёжность валковых станов в условиях интенсивной эксплуатации // Металлургия. – 2019. – №4. – С. 33-38.
4. Иванов В.П., Морозов А.И. Диагностика промышленных объектов: проблемы и решения // Автоматизация в промышленности. – 2021. – №2. – С. 17-24.
5. Крылов А.Н., Фролова Е.А. Машинное обучение в технической диагностике: опыт применения // Инженерный журнал. – 2022. – №3. – С. 12-19.
6. Беляев С. П. Цифровой двойник прокатного стана как инструмент предиктивного анализа // Металлы. – 2022. – №5. – С. 25-29.
7. Применение нейросетей для анализа технического состояния валков. // Вестник НТИ. – 2021. – №8. – С. 14-20.
8. Гришин Д.Н. Практика внедрения интеллектуальных систем в металлургии // Промышленность и технологии. – 2023. – №1. – С. 9-15.

Сведения об авторах:

Решетников Даниил Сергеевич – техник кафедры 1101;

Барухов Сергей Алексеевич – техник кафедры 1101;

Остатюк Софья Ивановна – инспектор дирекции института;

Преснова Елизавета Сергеевна – инспектор отдела по работе с образовательными учреждениями;

Уткина Арина Александровна – техник учебно-научной производственной лаборатории 1101.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦИОННОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

*Бородин Н.А., Икоева А.З., Князев А.В., Ткачев В.В., Поздняков Е.В.,
Доманин К.А.*

*Воронежский государственный лесотехнический университет
им. Г.Ф. Морозова, Воронеж*

Ключевые слова: предохранитель, точность срабатывания, жесткость, динамическая нагруженность, фрикционный материал, лесохозяйственная машина.

Аннотация. Определены основные силовые характеристики фрикционной предохранительной муфты, где в качестве фрикционного материала использована прессованная древесина дуба. Отмечено то, что большие обороты влияют на определение точности ограничения нагрузки. Выявлены доказательства лучшего охлаждения предохранителя с отверстиями, чем без них, так как надо учитывать температуру рабочей поверхности ведомой полумуфты при выполнении эксперимента.

TO DETERMINE THE POWER CHARACTERISTICS OF A FRICTION FUSE

*Borodin N.A., Ikoeva A.Z., Knyazev A.V., Tkachev V.V., Pozdnyakov E.V.,
Domanin K.A.*

Voronezh State Forestry Engineering University n.a. G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: fuse, actuation accuracy, rigidity, dynamic loading, safety clutch, friction material, forestry machine.

Abstract. The main power characteristics of a friction safety clutch are determined, where pressed oak wood is used as a friction material. It is noted that high speeds affect the determination of the accuracy of load limitation. Evidence has been found for better cooling of a fuse with holes than without them, since the temperature of the working surface of the driven coupling half must be taken into account when performing the experiment.

Проектирование лесохозяйственных машин требует применять технические требования, учитывающие достижения науки и техники. Для выполнения тех или иных работ машины должны иметь те характеристики, которые соответствуют своему назначению. В процессе проектирования совершенство машин должно быть выше, чем у существующих машин.

Машины, применяемые для работы в лесном хозяйстве, подвергаются большим перегрузкам, вследствие попадания в рабочие органы всевозможных остатков лесопиления. Чтобы снизить последние, применяют разного вида предохранительные устройства, которые защищают привод и рабочие органы машины от нарушения нормального режима работы.

Максимальное значение динамической нагруженности, возникающей в приводах лесных машин при срабатывании предохранительных устройств, в процессе перегрузки определяется коэффициентом динамичности:

$$K_{\partial} = \frac{M_{\max}}{M_M}, \quad (1)$$

где $M_{\max}$ – наибольший вращающий момент возникающий во время срабатывания предохранительной муфты; M_M – настроечный момент предохранителя.

Помимо этого на динамическую нагруженность влияет точность срабатывания предохранителя, момент инерции, величина, которая характеризует распределение масс машины, жесткость, амортизационные демпфирующие сопротивления и частота вращения [1].

Для фрикционных предохранительных муфт, где в качестве фрикционных элементов используются элементы из прессованной древесины дуба, в сравнении с обычной предохранительной муфтой фрикционного типа точность срабатывания предохранительной муфты можно определить коэффициентом точности срабатывания:

$$K_T = \frac{M_{\max}}{M_{\min}}, \quad (2)$$

где $M_{\max}$ – высшее значение вращающих моментов в момент срабатывания предохранителя, $M_{\min}$ – наименьшее значение вращающих моментов в момент срабатывания предохранителя.

При больших оборотах на процесс срабатывания при определении точности ограничения нагрузки действует динамика, поэтому этот параметр надо исследовать при не очень больших оборотах, чтобы результаты были более объективными и достоверными.

Моменты инерции масс машины можно определить, используя методику [2], суть этой методики сводится к тому, что надо оценить периоды колебаний масс системы с известным моментом инерции и неизвестным. Зная моменты инерции масс предохранителя и станда, жесткость и демпфирование, на осциллограмме колебаний амплитуд замеры записи крутящего момента можно оценить момент трения, когда муфта прокручивается.

Жёсткость системы станда определяется экспериментально, для этого можно использовать приспособление (рис. 1).

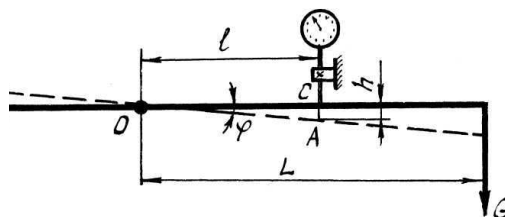


Рис. 1. Схема станда для определения коэффициента жёсткости системы

Рассмотрев треугольник АОС можно видеть, что

$$\frac{h}{l} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где φ – угол наклона рычага, равняется

$$\varphi = \frac{M}{C}, \quad (4)$$

где M – вращающий момент; C – жёсткость.

На плече L грузом G создается вращающий момент

$$M = GL, \quad (5)$$

отсюда (4) примет вид

$$\varphi = \frac{GL}{C}, \quad (6)$$

Приравняв (3) и (6)

$$\frac{h}{l} = \frac{GL}{C}, \quad (7)$$

найдем жёсткость системы

$$C = \frac{GLl}{h}. \quad (8)$$

Демпфирующие свойства системы можно определить по характеристике жёсткости системы. Систему надо нагружать и разгружать, и если есть диссипация, характеристика будет иметь вид петли Гистерезиса. Вычислив её площадь, находится коэффициент рассеивания ψ , а далее определяется параметр демпфирующих сопротивлений [3].

$$\beta = \frac{C\psi}{2\pi p}, \quad (9)$$

где p – частота собственных колебаний [4].

Анализ предохранительной муфты, в которой есть отверстия в шкиве, и без отверстий, надо выполнять в режиме пробуксовки, где необходимо учитывать температуру рабочей поверхности ведомой полумуфты, для доказательства лучшего охлаждения предохранителя с отверстиями, чем без них.

Для определения сравнительного ресурса предохранительных муфт, которые должны выдерживать до пяти тысяч срабатываний, которые должны длиться пять и более секунд, надо использовать методику, описанную в [5]. Перед началом испытаний надо осмотреть толщину фрикционного материала ведущей полумуфты, а также выполнить приработку рабочих поверхностей предохранителя. До достижения на поверхности трения температуры 60°C , выполняются срабатывания предохранителей. После перерыва надо провести до пяти тысяч срабатываний и в результате чего выполняется оценка, какое предохранительное устройство лучше.

Делая вывод надо отметить то, что определение силовых характеристик фрикционной предохранительной муфты, из прессованной древесины дуба, дает возможность оценить степень надежности работы предохранителя, а динамические нагрузки, возникающие в приводах лесных машин при срабатывании предохранительных устройств, в процессе перегрузки могут быть значительно ниже.

Список литературы

1. Карамышев В.Р., Икоева А.З. О совершенствовании предохранительного устройства л/х машин // Лес, наука, молодежь: Сборник научных трудов. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – С. 220-221.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
3. Чукичев А.Н., Варава В.И., Добрынин Ю.А. и др. Математические моделирование трансмиссий лесопожарных машино-тракторных агрегатов. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1984. – 70 с.

4. Саломатин Г.Г. Машина для посадки семян и черенков в лесных питомниках // Лесное хозяйство. – 1998. – №5. – С. 43-44.
5. Флик Э.П. Механические приводы с/х машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.

Сведения об авторах:

Бородин Николай Александрович – к.т.н., доцент;

Икоева Алла Зауровна – к.т.н.;

Князев Александр Владимирович – к.т.н., доцент;

Ткачев Виталий Викторович – к.т.н., доцент;

Поздняков Евгений Владиславович – к.т.н., доцент;

Доманин Кирилл Алексеевич – студент.

РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ КОПИРОВАЛЬНЫХ ТОКАРНО-КАРУСЕЛЬНЫХ СТАНКОВ

Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Малыгин Н.И.

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Северодвинск*

Ключевые слова: мехатроника, одноприводные станки, электромагнитные муфты, методы управления, траектория движения, автоматическое слежение, элементарный участок.

Аннотация. Рассмотрены основные особенности методов цифрового управления одноприводными мехатронными системами. Предложены технические решения по модернизации оборудования, позволяющие придать и расширить его функциональные возможности. Разработан принцип совместного цифрового управления приводами подачи одноприводных технологических комплексов. Разработаны и испытаны на практике частотно-импульсные и широтно-импульсные цифровые методы совместного управления подачами токарно-карусельного станка.

DEVELOPMENT OF MECHATRONIC AND TECHNOLOGICAL COMPLEXES BASED ON COPYING LATHES AND CAROUSELS

Skovpen S.M., Lobanov N.V., Malygin N.I.

Northern (Arctic) Federal University named by M.V. Lomonosov, Severodvinsk

Keywords: mechatronics, single-drive machines, electromagnetic clutches, control methods, motion trajectory, automatic tracking, elementary section.

Abstract. The basic features of methods of digital control of single-drive mechatronic systems are considered. Technical solutions for modernization of the equipment, allowing to give and expand its functional capabilities. The principle of joint digital control of feed drives of single-drive technological complexes is developed. Frequency-pulse and width-pulse digital methods of joint control of feed drives of the lathe-boring machine are developed and tested in practice.

Для некоторых специальных тяжёлых единичных и мелкосерийных машиностроительных производств, например судостроение, машиностроение не считается основным (для судостроения главное – стапельное производство). В этом случае для заготовительного производства – путь модернизации, в частности создание цифровых мехатронных технологических комплексов (МТК) на базе морально-устаревших токарно-карусельных копировальных станков – задача безусловно актуальная и малозатратная.

Целью данной работы является разработка цифрового мехатронного технологического комплекса на примере одноприводного токарно-карусельного станка 1525.

Общий вид и принципиальная схема разработанной конструкции [1] представлена на рис. 1 и включает: главный электропривод – 1; автоматическую коробку скоростей подачи и управления осями – 2; блок электромагнитных муфт 3 ступенчатого изменения скоростей подачи; блок электромагнитных муфт 4 управления горизонтальной осью ОХ; блок электромагнитных муфт 5 управления вертикальной осью ОZ; цифровая система управления – 6; перемещающийся по

оси OX суппорт – 7; перемещающаяся по оси OZ каретка 8, на которой в резцедержателе 9 крепится резец 10; датчик линейного перемещения суппорта по оси OX – 11; датчик линейного перемещения ползуна по оси OZ – 12; обрабатываемая деталь – 13; планшайба – 14

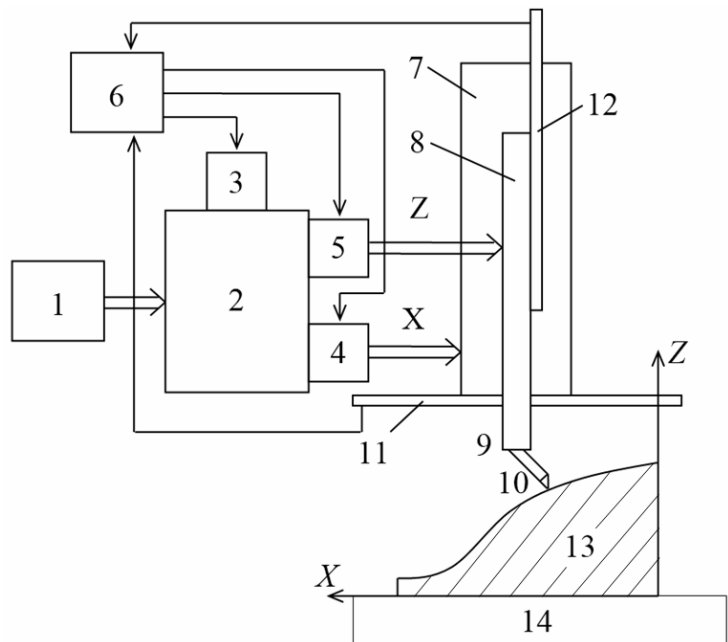


Рис. 1. Общий вид и принципиальная схема МТК

Работа комплекса с цифровой системой управления осуществляется следующим образом. На планшайбу 14 устанавливается деталь 13, в резцедержателе 9 закрепляется резец 10. После этого в цифровую систему управления 6 вводится цифровая модель обрабатываемой детали 13, запускается главный электропривод 1, и в соответствии с технологическим процессом обработки детали задаются скорость подачи, глубина резания и ширина зоны слежения. После подачи команды «ПУСК» в соответствии с управляющей программой начинается обработка по заданной программой траектории. При этом цифровая система управления генерирует сигналы, которые поступают в блоки электромагнитных муфт 4 и 5 управления осями OX и OZ , и резец 10 перемещается в соответствии с заданной программой. При этом информация с датчиков линейных перемещений 11 и 12 поступает в цифровую систему управления 6 и используется для расчётов и формирования управляющих сигналов.

Для данной цифровой системы управления комплексом с асинхронным электроприводом и автоматической коробкой управления подачами по осям с электромагнитной муфтой разработан способ импульсного управления, заключающийся в следующем:

1. На основе исходного чертежа обрабатываемой детали в САД-системе создаётся цифровая модель теоретического профиля. Профиль детали разбивается на большое число n сопрягаемых элементарных отрезков. Каждый i -й отрезок задаётся в декартовых координатах его начальной и конечной точками, которые образуют исходную матрицу цифровой модели.

2. Цифровая модель профиля вводится в память устройства числового программного управления (УЧПУ) и используется специально разработанной управляющей программой для формирования сигналов управления приводом, обеспечивающих последовательное движение рабочего органа по всем элементарным отрезкам обрабатываемого участка. На каждом i -м отрезке определяется величина рассогласования между координатами исходной матрицы цифровой модели и текущими координатами положения вершины резца, поступающими в УЧПУ с датчиков обратной связи. В соответствии с этими сигналами рассогласования обеспечивается точный выход резца в координаты исходной матрицы цифровой модели.

3. В зависимости от угла наклона каждого элементарного отрезка автоматически выбирается один из секторов обработки, внутри которого однозначно задаётся направление движения ведущей подачи (ВП) и следящей подачи (СП).

4. Траектория движения резца внутри каждого элементарного отрезка задаётся программно, путём формирования управляющих импульсов, поступающих на соответствующие электромагнитные муфты управления (ЭМУ) подачами по осям.

У комплексов с отдельными электроприводами по каждой оси переход резца из точки начала в конечную точку отрезка можно задать по любой требуемой траектории за счёт использования различных типов интерполяторов, так как можно отдельно задавать требуемую скорость подачи по каждой оси. В токарно-карусельных станках (ТКС) с одним асинхронным электроприводом для двух управляемых координат ЭМУ применение интерполяторов невозможно, так как скорость подачи по обеим осям будет одинаковой и зависит от частоты вращения главного привода. Такой вариант не приемлем, так как не может обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности.

Поэтому целесообразно при движении резца внутри каждого отрезка ввести дополнительно автоматическое отслеживание траектории движения резца. При этом также возможны два варианта траектории движения резца – при раздельном и совместном управлении подачами по осям [1]. При использовании данного способа задаётся глубина резания t и ширина зоны слежения δ , величина которой может быть достаточно малой (до 1 мкм). При раздельном управлении подачами система управления формирует импульсы с определённой частотой и длительностью, зависящей от заданной скорости подачи, угла наклона элементарного отрезка, ширины зоны слежения, постоянной времени электромагнитной муфты (ЭМУ), величины перебега по осям OX и OZ . При этом величина перебега, в свою очередь, зависит от динамических характеристик ЭМУ и приводов подач, учесть которые в каждом конкретном случае затруднительно.

Недостатками рассмотренного способа слежения с раздельным управлением подач по осям являются:

- относительно большая шероховатость обработанной поверхности;
- отклонение режима работы приводов подач по осям OX и OZ из-за периодического переключения электромагнитных муфт;

– возможное появление перебегов при больших значениях скорости подач, приводящих к пропускам отдельных циклов слежения, и, как следствие, к ухудшению качества обработанной поверхности.

При использовании совместного управления подачами по осям OX и OZ влияние указанных недостатков проявляется в меньшей степени. Основная особенность данного способа состоит в том, что ведущая подача работает непрерывно, и резец перемещается с постоянной скоростью, а следящая периодически включается в расчётных точках. Такой способ импульсного управления следящей подачей обеспечивает плавную траекторию движения резца вдоль линии обрабатываемого отрезка траектории. Увеличивается также длительность работы следящей подачи по сравнению с предыдущим способом, что снижает динамическую нагрузку приводов.

Как показали экспериментальные исследования, такой способ импульсного слежения даёт хорошие результаты и обеспечивает высокую точность и качество обработанной поверхности при малых значениях скоростей подачи. Однако, при больших значениях, как и в предыдущем способе, также наблюдаются перебеги. Для устранения указанного недостатка разработан широтно-импульсный режим регулирования скорости подачи в интервалах работы следящей подачи [2].

При использовании данного способа система управления следящей подачей формирует импульсы управления. При этом первый формирующий импульс имеет длительность за время действия которого подача резца в направлении оси OZ разгоняется примерно до половины от установленной скорости. После этого вступает в работу широтно-импульсный модулятор (ШИМ), который формирует импульсы управления. Длительность формируемых импульсов в значительной степени зависит от индивидуальных особенностей станка и состояния его механических узлов, установить которые можно только экспериментально.

Способ слежения методом широтно-импульсного модулирования позволяет регулировать скорость следящей подачи и по своей эффективности приближается к работе линейных интерполяторов в станках с автономными электроприводами по каждой оси. Недостатком этого способа является относительная сложность его программной реализации, так как требуется учитывать многие факторы и индивидуальные особенности работы конкретного станка. При этом усложняются алгоритмы и структура управляющей программы за счёт введения большого числа дополнительных расчётов.

Перспективным является способ реализации слежения за траекторией с использованием частотно-импульсного режима (ЧИР) управления следящей подачи [3]. Особенность этого способа слежения за линией отрезка траектории заключается в том, что на ЭМУ следящей подачи (ось OZ) подаются импульсы напряжения с постоянной длительностью, которые определяются экспериментально с учётом особенностей динамики работы ЭМУ и технического состояния приводов. Длительность импульса должна выбираться такой, чтобы за время его действия резец успел отойти на минимальное расстояние от линии отрезка.

Далее следящая подача отключается с одновременным включением тормозной муфты и, после небольшого перемещения резец останавливается и продолжает движение в направлении ведущей подачи (ось OX) с постоянной

скоростью до точки пересечения с исходной линией отрезка. В момент пересечения на короткое время вновь включается следящая подача, и осуществляется очередное перемещение и т.д. до конечной точки обрабатываемого отрезка.

Следует отметить, что в данном случае используются только участок разгона и участок торможения, где скорость подачи не постоянна и всегда меньше заданной. Поэтому траектория движения резца в отличие от ранее рассмотренного способа будет сглаженной, что улучшает качество обработанной поверхности. В отличие от широтно-импульсного метода в частотно-импульсном момент начала очередного такта слежения строго синхронизирован с моментом прихода резца в точку пересечения оси ОХ с линией отрезка и не зависит от многих (ранее рассмотренных) факторов. С этой точки зрения частотно-импульсный способ управления является адаптивным.

Преимуществами рассмотренного способа являются: упрощение системы управления и управляющей программы, так как в каждом такте слежения рассчитывается и контролируется только одна точка пересечения оси ОХ с линией отрезка; отсутствие необходимости задания ширины зоны слежения δ и частоты работы импульсного модулятора, так как зона слежения определяется автоматически и зависит от динамики работы электропривода следящей оси; эффективность слежения за линией отрезка с использованием частотно-импульсного регулятора средней скорости следящей подачи приближается к системам управления электроприводами с линейными интерполяторами; возможность получить высокую точность и качество с минимальным припуском обработки поверхности.

К недостаткам следует отнести необходимость экспериментального определения на каждом станке минимально необходимой длительности импульса по осям ОХ и ОZ.

Программное обеспечение, реализующее все функции управления в режиме слежения, было проверено на микропроцессорной модели станка 1525, специально разработанной для проведения лабораторных испытаний цифровой системы управления [4-6], Результаты цифрового моделирования подтверждают принципиальную возможность создания мехатронного комплекса, расширяющего функциональность существующего технологического оборудования на примере одноприводного токарно-карусельного станка модели 1525.

Список литературы

1. Патент №2504456 РФ. Способ автоматизированного управления копировальным токарным станком / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов, В.Т. Харитоненко, Д.А. Ульяничев. – Заявка №2012116175 от 20.04.2012; опубл. 20.01.2014.
2. Патент №2543020 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подач станка / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов. – Заявка №2013122789 от 20.05.2013; опубл. 27.02.2015.
3. Патент №2649353 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подач / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Л.В. Кремлева, Н.В. Лобанов. – Заявка №2017101701 от 19.01.2017; опубл. 02.04.2018.

4. Malygin V.I., Cherepenin F.V., Skovpen' S.M., Lobanov N.V., Ul'anchev D.A. Control of metal-cutting machines with a single primary drive and an automatic gearbox // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 3, pp. 163-167.
5. Malygin V.I., Cherepenin F.V., Skovpen' S.M., Ul'anchev D.A.. Digital models of solids of revolution in duplicate machining // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 2, pp. 119-121.
6. Malygin V.I., Cherepenin F.V., Skovpen' S.M., Lobanov N.V., Ul'anchev D.A. Digital control system for a 1525 turret lathe // Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 12, pp. 799-803.

Сведения об авторах:

Сковпень Сергей Михайлович – к.т.н., доцент, доцент кафедры судовой электроэнергетики и автоматизации;

Лобанов Николай Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования подъемно-транспортного и технологического оборудования;

Малыгин Никита Игоревич – студент.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ЖЕСТКОСТИ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОТ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕ РЕВЕРСИВНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Нгуен Ван Чунг¹, Нгуен Хыу Хай¹, Зайдес С.А.²

¹*Офицерское училище Военно-Воздушных Сил, Нячанг, Вьетнам;*

²*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, поверхностное пластическое деформирование, конечно-элементное моделирование, реверсивное выглаживание, показатель жесткости схемы напряженного состояния.

Аннотация. Целью данной работы является определение влияния основных технологических параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния. В работе установлено, что показатель жесткости схемы временных напряжений достигает своего максимального значения при следующих режимах упрочнения: продольная подача $0,07 \div 0,08$ мм/об; величина радиального натяга $0,25 \div 0,28$ мм; реверсивная частота вращения РИ $270 \div 300$ дв.ход/мин.

THE DEPENDENCE OF THE STRESS STATE SCHEME RIGIDITY INDICATOR ON THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS AFTER REVERSE BURNISHING

Nguyen Van Chung¹, Nguyen Huu Hai¹, Zaides S.A.²

¹*Air Force Officer College, Nha Trang, Viet Nam;*

²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Keywords: stress-strain state, surface plastic deformation, finite element modeling, reverse burnishing, stiffness index of the stress state scheme.

Abstract. The purpose of this work is to determine the influence of the main technological parameters of reversible burnishing on the rigidity index of the stress state diagram. The work established that the rigidity index of the temporary stress diagram reaches its maximum value at: longitudinal feed of $0.07 \div 0.08$ mm/rev; radial interference of $0.25 \div 0.28$ mm; reverse rotation frequency of the tool of $270 \div 300$ double strokes/min.

Современные методы обработки деталей машин требуют постоянного совершенствования для повышения их эксплуатационных характеристик. Одним из ключевых направлений улучшения свойств поверхностного слоя является обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД), способствующая увеличению прочности, износостойкости и усталостной долговечности деталей машин [1]. Важной задачей является улучшение показателя жесткости напряженного состояния, что позволяет повысить сопротивление материала внешним нагрузкам [1].

Однако традиционные методы ППД, такие как выглаживание шариком или роликом, накатка и дробеструйная обработка, обладают рядом недостатков. Основные из них включают высокую шероховатость поверхности после обработки некоторыми способами ППД и недостаточную напряженность в очаге

деформации, особенно при обработке нежестких деталей. Эти недостатки требуют поиска более эффективных методов. В Иркутском НИТУ разработан новый способ ППД на основе реверсивного выглаживания поверхностного слоя тороидальным роликом [2]. В проведенных исследованиях [3, 4] установлено, что разработанный способ упрочнения способствует повышению механической прочности деталей и временных напряжений сжатия, особенно в поверхностном слое, что оказывает положительное влияние на вероятность снижения усталостного разрушения и на повышение долговечности деталей машин.

Цель работы – определить влияние основных технологических параметров параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния в очаге деформации.

Результаты компьютерного моделирования.

Реверсивное выглаживание заключается в пластической деформации поверхности детали со следующими основными параметрами: продольная подача ($S_{пр}$), радиальный натяг (t), реверсивная частота вращения рабочего инструмента (n_p). Эти параметры оказывают неоднозначное влияние на показатель жесткости схемы напряженного состояния в очаге деформации.

Расчёт напряжённого состояния является важнейшей задачей при проектировании конструкций, позволяя оценивать их надёжность и безопасность. Метод конечных элементов (МКЭ) выделяется своей универсальностью среди различных подходов к методам расчёта. Одним из наиболее эффективных инструментов, применяемых для реализации МКЭ, считается программа Ansys [5]. Методика для проведения компьютерного моделирования процесса реверсивного выглаживания представлена в работе [3].

В большинстве исследований рассматривается тип напряженного состояния, который характеризуется показателем жесткости схемы напряженного состояния по В.Л. Колмогорову в виде:

$$P_{\sigma p} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma_z^{\sigma p} + \sigma_r^{\sigma p} + \sigma_{\phi}^{\sigma p}}{\sqrt{(\sigma_z^{\sigma p} - \sigma_{\phi}^{\sigma p})^2 + (\sigma_{\phi}^{\sigma p} - \sigma_r^{\sigma p})^2 + (\sigma_r^{\sigma p} - \sigma_z^{\sigma p})^2}}} \quad (1)$$

где $\sigma_z^{\sigma p}, \sigma_r^{\sigma p}, \sigma_{\phi}^{\sigma p}$ – главные компоненты временных напряжений в цилиндрической системе координат.

Положительное значение коэффициента P указывает на преобладание одноосного или объемного растяжения. В этом случае материал разрушается по механизму хрупкого разрушения. Отрицательные значения коэффициента P соответствуют сжатию или объемному сжатию, что способствует пластическому течению материала.

На рисунке 1 представлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на главные компоненты тензора максимальных временных напряжений.

Из рисунка 1 видно, что при постепенном увеличении значений основных технологических параметров реверсивного выглаживания значения главных компонентов тензора максимальных временных напряжений увеличиваются и уменьшаются неравномерно. Например, увеличение радиального натяга первоначально способствует росту главных компонентов напряжений (см. рис. 2,

а). Однако при увеличении радиального натяга до определенного предела наблюдается снижение главных компонентов напряжений. Это объясняется тем, что при достижении критического значения натяга происходит перенапряжение и перераспределение напряжений вглубь материала.

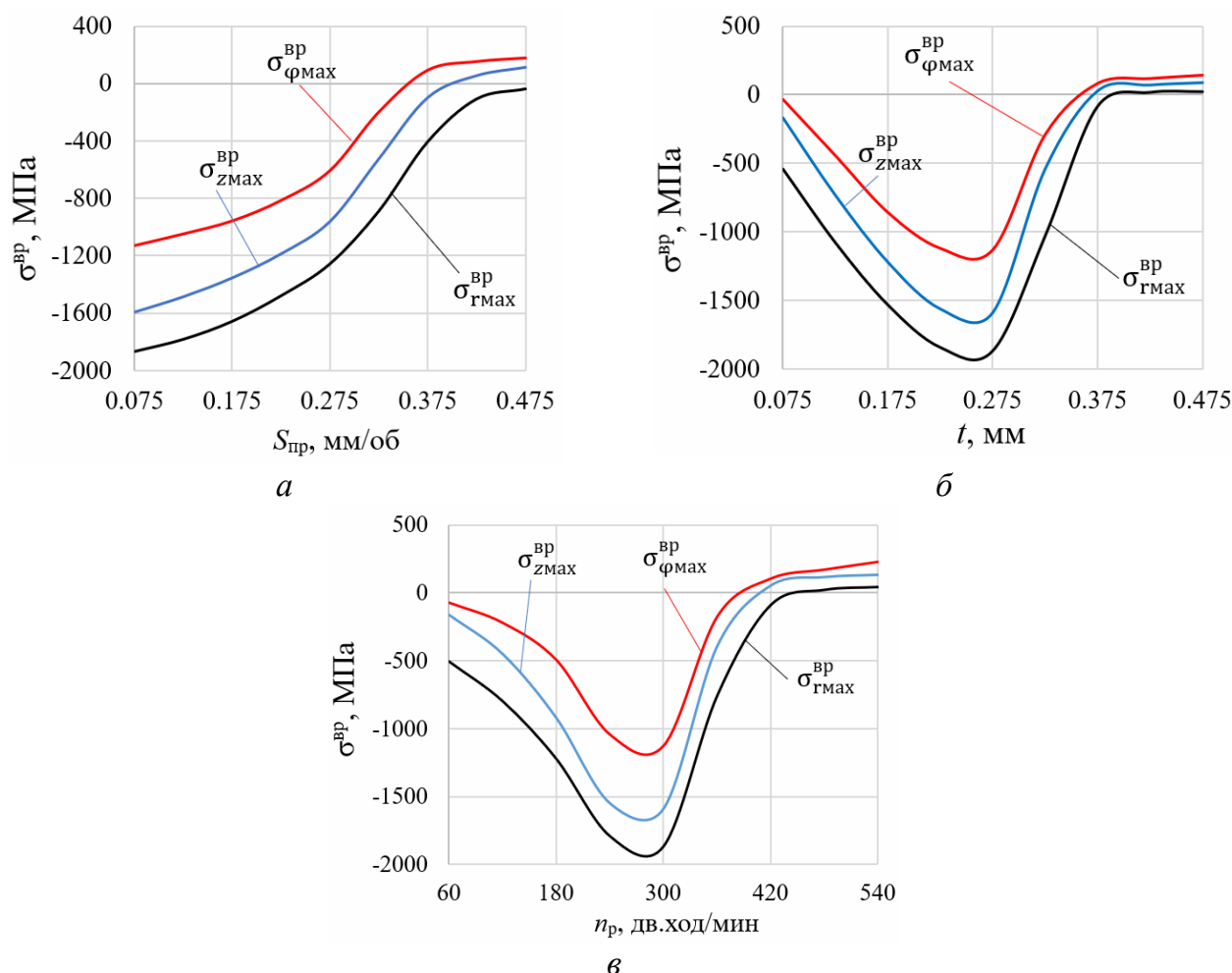


Рис. 1. Влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на главные компоненты тензора максимальных временных напряжений: а – продольная подача ($S_{пр}$); б – радиальный натяг (t); в – реверсивная частота вращения ролика (n_p)

На рисунке 2 представлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы временных напряжений. Из рисунка 2 видно, что в начальной стадии процесса увеличение радиального натяга, частоты вращения заготовки, амплитуды реверса РИ и реверсивной частоты вращения РИ приводит к росту значений показателя жесткости схемы напряжений на 84-96%. При дальнейшем увеличении этих параметров упрочнения значения показателя жесткости схемы напряжений уменьшается и затем выравнивается. Это связано с динамическими процессами в системе: увеличение радиального натяга приводит к росту контактных напряжений, что может вызвать пластическую деформацию или перераспределение напряжений, снижая жесткость системы. Реверсивная частота вращения инструмента вызывает циклические нагрузки и способствуя усталостным явлениям в материале.

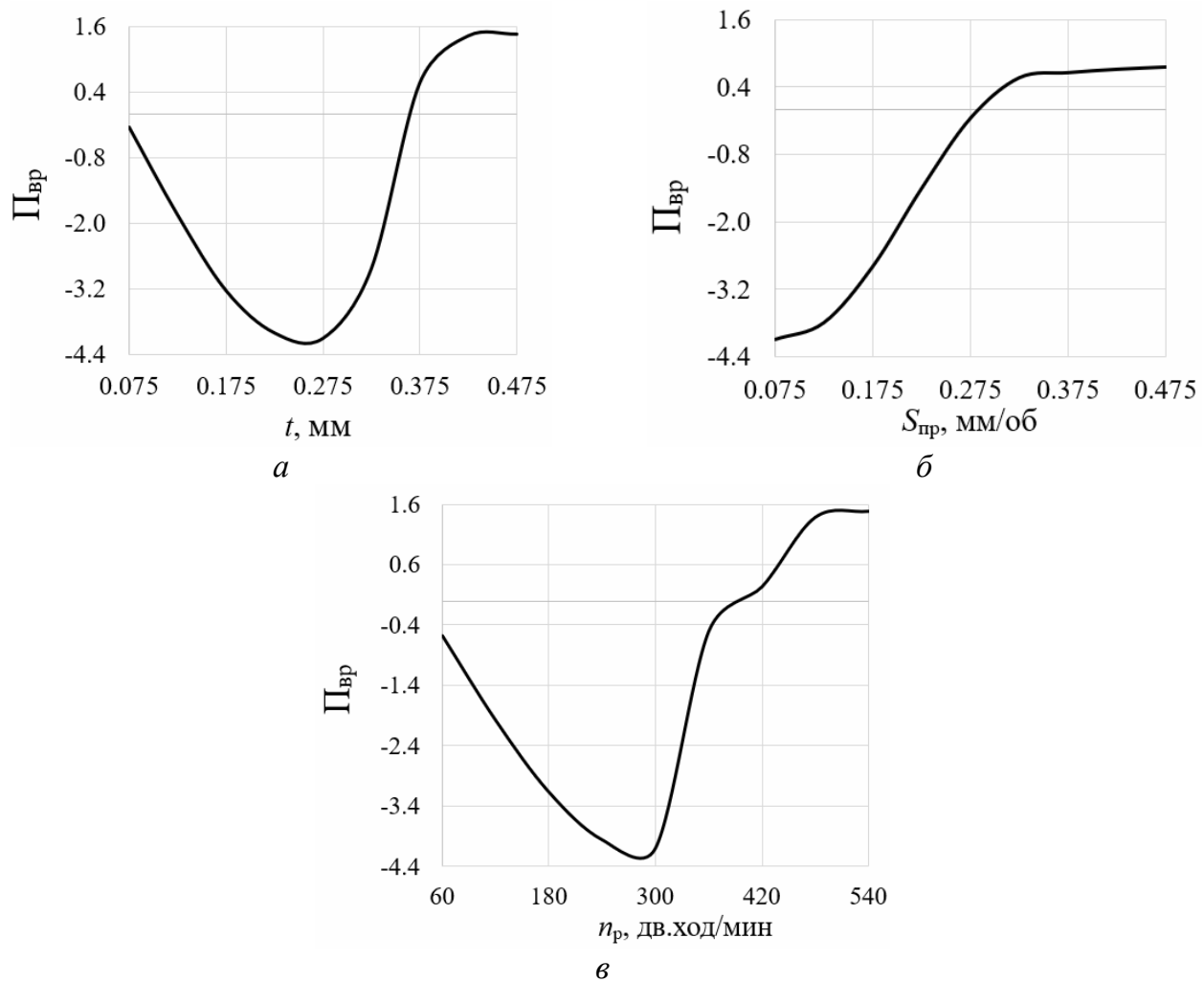


Рис. 2. Влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы временных напряжений: *а* – радиальный натяг (t); *б* – продольная подача ($S_{пр}$); *в* – реверсивная частота вращения ролика (n_p)

По данным рисунка 2 следует, что показатель жесткости схемы временных напряжений достигает своего максимального значения ($\Pi_{вр} \approx -4$) при: продольная подача $0.07 \div 0.08$ мм/об; величина радиального натяга $0.25 \div 0.28$ мм; реверсивная частота вращения РИ $270 \div 300$ дв.ход/мин.

Заключение

В результате конечно-элементного моделирования процесса реверсивного выглаживания установлено влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния. Анализ показал, что варьирование основных технологических параметров процесса, таких как радиальный натяг, продольная подача, реверсивная частота вращения ролика, оказывает значительное влияние на формирование показателя жесткости схемы временных напряжений упрочненных деталей. Показатель жесткости схемы временных напряжений достигает своего максимального значения ($\Pi_{вр} \approx -4$) при следующих режимах: продольная подача $0.07 \div 0.08$ мм/об; величина радиального натяга $0.25 \div 0.28$ мм; реверсивная частота вращения РИ $270 \div 300$ дв.ход/мин.

Список литературы

1. Нотин И.А., Киселев И.А., Синавчиан С.Н. Влияние метода механической обработки на усталостную прочность деталей машиностроения из дисперсно-упрочненных полимерных

- композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №6(96). – С. 12-16.
2. Патент №2758713 РФ. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С.А. Зайдес, Нгуен Хыу Хай. – Заявка от 14.01.2021; опубл. 01.11.2021, Бюл. № 31.
 3. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 3 (55). – С. 7-15.
 4. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали // Черные металлы. – 2023. – № 6. – С. 61-70.
 5. Wen Yan Yu, Lei Qiang. Finite Element Analysis of Finishing Mill Roll Based on ANSYS // Applied Mechanics and Materials. 2013, vol. 321-324, pp. 226-229.

Сведения об авторах:

Нгуен Ван Чунг – к.т.н., декан факультета базовой техники;

Нгуен Хыу Хай – к.т.н., преподаватель;

Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БИОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Уткина А.А., Преснова Е.С., Решетников Д.С., Барухов С.А., Остапюк С.И.
Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Москва*

Ключевые слова: прецизионная обработка, биоматериалы, имплантология, микроточность, титан, керамика, ультразвуковая обработка, алмазный инструмент.

Аннотация. В статье рассмотрены современные прецизионные методы механической обработки биосовместимых материалов, применяемых в медицинской технике и имплантологии. Проведен анализ характеристик наиболее востребованных биоматериалов, таких как титановые сплавы, циркониевая керамика и полимеры. Особое внимание уделено технологиям высокоточной шлифовки, электроэрозионной и ультразвуковой обработки, а также применению алмазного инструмента. Рассмотрены проблемы обработки труднообрабатываемых материалов, особенности обеспечения микронной точности и минимизации повреждений структуры. Подчеркнута актуальность комплексного подхода к выбору режимов и инструмента, а также роль технологической базы и станочного оборудования.

PRECISION METHODS OF MECHANICAL PROCESSING OF BIOCOMPATIBLE MATERIALS

*Utkina A.A., Presnova E.S., Reshetnikov D.S., Barukhov S.A., Ostapyuk S.I.
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow*

Keywords: precision processing, biomaterials, implantology, micro-precision, titanium, ceramics, ultrasound processing, diamond tools.

Abstract. The article discusses modern precision methods of mechanical processing of biocompatible materials used in medical technology and implantology. An analysis of the characteristics of the most in-demand biomaterials, such as titanium alloys, zirconia ceramics, and polymers, is presented. Special attention is given to high-precision grinding technologies, electroerosion, and ultrasonic processing, as well as the use of diamond tools. The issues of processing hard-to-machine materials, the peculiarities of ensuring micron precision, and minimizing structural damage are examined. The relevance of a comprehensive approach to the selection of processing modes and tools, as well as the role of the technological base and machine equipment, is emphasized.

Современное развитие медицинской техники и биоинженерии сопровождается широким применением биосовместимых конструкционных материалов, используемых для изготовления имплантатов, протезов, хирургических инструментов и микроустройств. Наиболее распространёнными среди них являются титановые и кобальтовые сплавы, оксидная и циркониевая керамика, биоинертные полимеры. Основными требованиями к таким материалам являются высокая коррозионная стойкость, биосовместимость, прочность и стойкость к износу. Однако их высокая твёрдость, вязкость и низкая теплопроводность затрудняют механическую обработку, особенно в условиях необходимости достижения микронной точности поверхностей [1].

Прецизионная механическая обработка становится ключевым этапом в производстве медицинских изделий, поскольку напрямую влияет на геометрию, шероховатость, остаточные напряжения и, как следствие, на срок службы и безопасность эксплуатации готового изделия. Это обуславливает необходимость разработки и внедрения эффективных технологических решений, обеспечивающих стабильное качество при обработке сложных в технологическом отношении материалов.

Биосовместимые материалы – это материалы, которые при контакте с живыми тканями не вызывают нежелательных или вредных реакций организма, таких как токсичность, воспаление, аллергия, иммунный ответ или отторжение имплантата. Среди биоматериалов, наиболее часто применяемых в имплантологии и медицинской технике, выделяют:

- 1) титан и сплавы на его основе (например, BT6, Ti-6Al-4V);
- 2) оксидные керамики (ZrO₂, Al₂O₃);
- 3) кобальто-хромовые сплавы;
- 4) полиэфирэфиркетон (PEEK) и сополимеры.

Титановые сплавы характеризуются высокой прочностью, малым весом, высокой коррозионной стойкостью и отличной биосовместимостью. Однако они склонны к образованию наростов на режущей кромке, имеют низкую теплопроводность и высокий коэффициент упругости, что создаёт трудности при обработке. Керамика отличается исключительной твёрдостью, хрупкостью и химической инертностью, что требует применения специализированных абразивов и режимов обработки [2].

Прецизионные методы механической обработки

1. Шлифование и суперфинишная обработка

Традиционное шлифование с применением алмазных кругов на металлической или керамической связке является эффективным методом обработки титановых и керамических заготовок.

Для достижения высокой точности и качества поверхности применяются методы суперфиниширования с использованием мелкозернистых абразивов. Контроль параметров подачи, давления и охлаждения позволяет достичь шероховатости $Ra < 0,05$ мкм.

Выбор между шлифованием и суперфинишной обработкой зависит от требований к качеству поверхности детали, необходимой точности и производительности. Если требуется просто улучшить геометрию детали и добиться определенной шероховатости поверхности, то достаточно шлифования. Если же необходимо получить очень высокую чистоту и точность поверхности, улучшить физико-механические свойства поверхности, то применяется суперфинишная обработка. Во многих случаях суперфинишная обработка применяется после шлифования для достижения наилучшего результата.

2. Ультразвуковая обработка

Метод заключается в использовании высокочастотных колебаний, передаваемых на режущий инструмент. Основные методы ультразвуковой обработки:

– Ультразвуковая очистка

Наиболее распространенный метод. Деталь помещается в жидкость (обычно водный раствор с добавками), через которую пропускаются ультразвуковые волны. Кавитация эффективно удаляет загрязнения, жиры, масла, окалину, ржавчину и другие отложения с поверхности детали, даже в труднодоступных местах.

– Ультразвуковая резка

Используется для резки твердых, хрупких и труднообрабатываемых материалов, таких как стекло, керамика, композиты, полупроводники и полимеры. Режущий инструмент (обычно металлический нож или проволока) вибрирует с ультразвуковой частотой и постепенно прорезает материал.

– Ультразвуковая сварка

Применяется для соединения металлических и пластиковых деталей. Детали сжимаются вместе, и к ним прикладываются ультразвуковые колебания. В зоне контакта возникает локальный нагрев за счет трения и пластической деформации, что приводит к образованию сварного соединения.

– Ультразвуковое упрочнение поверхности

Обработка поверхности детали ультразвуком может повысить ее твердость, износостойкость и усталостную прочность. Ультразвуковые колебания вызывают пластическую деформацию поверхностного слоя материала, что приводит к образованию остаточных напряжений сжатия.

– Ультразвуковое диспергирование (эмульгирование)

Используется для получения стабильных дисперсий или эмульсий (смесей несмешивающихся жидкостей или твердых частиц в жидкости). Ультразвук разбивает крупные частицы на более мелкие и предотвращает их агрегацию.

– Ультразвуковое сверление (абразивная обработка)

Применяется для сверления отверстий сложной формы в твердых и хрупких материалах. Инструмент (обычно стержень или трубка) вибрирует с ультразвуковой частотой и воздействует на абразивную суспензию, которая постепенно удаляет материал с поверхности.

Особенно эффективен при обработке хрупких материалов (оксидная керамика, стеклокерамика). Совмещенные процессы, например, ультразвуковое шлифование или сверление, позволяют существенно снизить силу резания, избежать трещин и сколов, повысить стойкость инструмента и улучшить качество поверхности [3].

3. Электроэрозионная обработка (EDM)

Для токопроводящих биоматериалов, в частности титановых и кобальтовых сплавов, широко применяется метод электроэрозии. Электроэрозионная обработка (EDM) – это процесс удаления материала с заготовки с помощью электрических разрядов (искр), возникающих между электродом-инструментом и заготовкой, которые находятся в диэлектрической жидкости.

Он позволяет изготавливать тонкостенные и сложнопрофильные детали с высокой точностью без механического контакта с инструментом. Однако существует риск образования изменённых поверхностных слоёв, требующих дополнительной обработки или контроля.

4. Алмазная обработка и микрошлифование

Алмазные инструменты (шлифовальные круги, боры, фрезы) являются основой большинства процессов прецизионной обработки твёрдых и труднообрабатываемых материалов. Микрошлифование можно рассматривать как один из видов алмазной обработки, при котором используются алмазные абразивы с очень мелким зерном для достижения максимально возможной чистоты поверхности. В большинстве случаев микрошлифование применяется после других видов алмазной обработки, таких как шлифование или точение, для удаления поверхностных дефектов и достижения финишной чистоты.

Выбор между алмазной обработкой и микрошлифованием зависит от требуемой точности и чистоты поверхности, а также от характеристик обрабатываемого материала и формы детали.

Их применение позволяет формировать точные и чистовые поверхности без структурных повреждений. Микрошлифование, в частности, применяется для создания поверхностей с заданной микротопографией, что важно для интеграции с живыми тканями.

Обеспечение микронной точности ($1 \text{ мкм} = 0,001 \text{ мм}$) в производстве является сложной задачей, требующей учёта множества факторов и применения специализированных методов и технологий. Микронная точность критически важна в производстве хирургических инструментов, имплантатов и диагностического оборудования.

Достижение микронной и субмикронной точности при обработке биоматериалов требует высокой стабильности станочного оборудования, жёсткости технологической системы и точного контроля параметров обработки. Современные обрабатывающие центры, оснащённые системами ЧПУ, виброизоляции и прецизионными приводами, позволяют достигать допусков порядка 2-5 мкм. Немаловажным фактором является термостабильность и точное управление охлаждением зоны резания [4].

Кроме того, внедрение обратной связи от измерительных систем в режиме реального времени (интеллектуальные датчики, оптические и лазерные измерители) позволяет оперативно корректировать процесс и исключать накопление погрешностей.

Прецизионная обработка биосовместимых материалов является важной областью науки и техники, от которой зависит качество и безопасность медицинских изделий. Несмотря на достигнутые успехи, существует ряд нерешённых задач в области прецизионной обработки биосовместимых материалов:

- ограниченная стойкость режущего инструмента при работе с керамикой и титаном;
- повреждение структуры поверхности при термическом или вибрационном воздействии;
- необходимость дорогостоящего оборудования и контроля окружающей среды;
- сложности в обработке композитных и многослойных материалов.

В перспективе ожидается активное развитие адаптивных и интеллектуальных систем управления процессом обработки, применение цифровых двойников и прогнозирующих моделей, использование гибридных

технологий (лазерно-абразивная обработка, УЗ+EDM) и развитие микрофлюидных систем охлаждения инструмента.

Прецизионные методы механической обработки играют ключевую роль в производстве изделий из биосовместимых материалов, обеспечивая необходимую точность, качество поверхности и надёжность работы медицинских устройств. Современные технологии обработки позволяют эффективно работать с трудными материалами, однако требуют комплексного подхода к выбору режимов, инструмента и оборудования. Развитие цифровых и интеллектуальных решений в данной области открывает новые горизонты в медико-техническом производстве.

Список литературы

1. Ключев В.В., Самойлов А.И. Биосовместимые материалы и особенности их обработки // Вестник машиностроения. – 2021. – №9. – С. 34-39.
2. Зуев Н.В., Потапов А.И. Технологии обработки титана и его сплавов в медицинской промышленности // Медтехника. – 2020. – №3. – С. 45-50.
3. Гусев М.П., Лаврентьев А.С. Ультразвуковые методы обработки керамических материалов // Современные технологии. – 2022. – №1. – С. 22-27.
4. Иванова Т.В., Марков Ю.Н. Прецизионное оборудование для микрообработки твёрдых материалов // Приборы и системы. – 2021. – №6. – С. 10-16.

Сведения об авторах:

Решетников Даниил Сергеевич – техник кафедры 1101;

Барухов Сергей Алексеевич – техник кафедры 1101;

Остапюк Софья Ивановна – инспектор дирекции института;

Преснова Елизавета Сергеевна – инспектор отдела по работе с образовательными учреждениями;

Уткина Арина Александровна – техник учебно-научной производственной лаборатории 1101.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Кривошеев Н.С., Жарковский А.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидравлический привод, автоматизация, гидропривод, обслуживание гидроприводов, эксплуатация гидроприводов.

Аннотация. В данной работе рассматривается применение цифровых двойников для задач диагностики и обслуживания гидравлических приводов. Цифровые двойники представляют собой инновационное решение, способное значительно улучшить процессы диагностики и обслуживания гидравлических приводов. Эти виртуальные модели обладают потенциалом для революционизации подхода к управлению и поддержке сложных систем. Применение цифровых двойников позволяет создать точные виртуальные реплики физических объектов, что обеспечивает глубокое понимание их поведения в реальном времени. Это критически важно для гидравлических приводов, которые играют ключевую роль в различных отраслях, от машиностроения до авиации.

APPLICATION OF DIGITAL TWINS FOR DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF HYDRAULIC DRIVES

Krivosheev N., Zharkovskij A.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: hydraulic drive, automation, hydraulic actuation, hydraulic drive maintenance, hydraulic drive operation.

Abstract. This paper examines the application of digital twins for diagnostics and maintenance of hydraulic drives. Digital twins represent an innovative solution capable of significantly enhancing the diagnostic and maintenance processes of hydraulic drives. These virtual models have the potential to revolutionize the approach to managing and supporting complex systems. The use of digital twins allows for the creation of accurate virtual replicas of physical objects, providing a deep understanding of their behavior in real-time. This is critically important for hydraulic drives, which play a key role in various industries, from engineering to aviation.

Современные гидроприводы широко применяются в промышленности, строительстве, транспорте и других сферах. Надежность их работы во многом зависит от своевременной диагностики и технического обслуживания [1]. Однако традиционные методы диагностики требуют значительных затрат времени и труда.

К традиционным методам диагностики:

- статопараметрический;
- термодинамический;
- спектральный;
- акустический;
- силовой.

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяет автоматизировать контроль состояния гидроприводов, предсказывать возможные

неисправности и оптимизировать их обслуживание. В данной статье рассматриваются основные принципы применения ИИ в диагностике гидроприводов, его преимущества и перспективы внедрения в промышленность. Кроме того, приведены примеры успешного использования ИИ в различных отраслях, а также рассмотрены методы интеграции ИИ с существующими системами технического обслуживания [2]. Благодаря цифровым двойникам специалисты могут проводить детальный анализ данных, получаемых с датчиков, что позволяет выявлять потенциальные неисправности на ранних стадиях и принимать превентивные меры. Это способствует снижению простоев оборудования и увеличению его срока службы. Кроме того, цифровые двойники облегчают процесс планирования и оптимизации технического обслуживания, предоставляя возможность моделировать различные сценарии и прогнозировать их результаты. Интеграция цифровых двойников в системы управления гидравлическими приводами также способствует повышению их эффективности и надежности [3]. Виртуальные модели позволяют тестировать новые стратегии управления без риска для реального оборудования, что открывает новые горизонты для инноваций и улучшения производительности. Таким образом, использование цифровых двойников становится неотъемлемой частью современных практик диагностики и обслуживания, обеспечивая конкурентное преимущество на рынке и способствуя долгосрочному успеху компаний.

Искусственный интеллект в диагностике гидроприводов базируется на анализе данных, получаемых от различных датчиков, установленных в системе. Основные технологии ИИ, используемые в этом процессе:

- Машинное обучение (ML) – позволяет выявлять закономерности и флуктуации в работе гидросистем, анализируя исторические данные;
- Обработка больших данных (Big Data) – помогает анализировать поток информации с датчиков давления, температуры, расхода жидкости и вибраций;
- Нейросетевые алгоритмы – применяются для прогнозирования отказов на основе больших объемов информации;
- Системы предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance) – основаны на прогнозировании износа и возможных поломок, что позволяет минимизировать незапланированные простои оборудования.

ИИ анализирует данные в режиме реального времени, выявляет отклонения от нормальных рабочих параметров и сигнализирует о необходимости обслуживания или ремонта.

Гидроприводы подвержены различным видам неисправностей, таким как утечки, кавитация, износ уплотнений и перегрев масла. Искусственный интеллект помогает:

- автоматически распознавать нестандартные режимы работы;
- определять ранние признаки неисправностей, исключая необходимость ручного контроля;
- исключать человеческий фактор при диагностике, повышая точность прогнозов;
- анализировать изменение параметров работы гидросистемы с учетом условий эксплуатации.

Примером успешного применения ИИ является использование предиктивного анализа в гидростанциях, где алгоритмы машинного обучения анализируют вибрации и шум для выявления возможных отказов насосов, запорно-регулирующей арматуры. Кроме того, системы ИИ могут проводить анализ данных в облаке и интегрироваться с другими промышленными системами управления. Примеры диагностики неисправностей с помощью ИИ представлены в таблице 1.

Табл. 1. Примеры диагностики неисправностей

Неисправность	Традиционные методы	Методы ИИ
Утечки	Визуальный осмотр	Анализ давления и расхода
Кавитация	Акустический контроль	Анализ частотных спектров
Износ уплотнений	Плановые проверки	Нейросетевой анализ вибраций
Перегрев масла	Контроль температуры	Анализ исторических данных

Традиционные методы обслуживания гидроприводов базируются на регламентных интервалах технического обслуживания. Искусственный интеллект позволяет перейти к сервису по состоянию (Condition-based maintenance, CBM), при котором обслуживание проводится только при фактической необходимости. Это дает:

- снижение затрат на ремонт и замену деталей;
- уменьшение времени простоя оборудования;
- продление срока службы гидросистем за счет более точного контроля;
- возможность интеграции с цифровыми двойниками (Digital Twins) для моделирования работы оборудования в виртуальной среде.

ИИ также позволяет персоналу получать рекомендации по эксплуатации оборудования на основе текущего состояния системы, снижая вероятность аварий. Более того, современные системы ИИ могут взаимодействовать с ERP-системами предприятий, что способствует повышению общей эффективности управления техническим обслуживанием.

Применение ИИ в промышленности требует модернизации оборудования, установки датчиков и разработки программного обеспечения. Внедрение ИИ требует значительных инвестиций, но окупается за счет сокращения затрат на ремонт и обслуживание. В ближайшем будущем ожидается расширение применения ИИ в различных отраслях, таких как авиация, судостроение и энергетика.

Фактически применение ИИ в работе с гидроприводами базируется на двух ключевых моментах. Первым является непосредственное внедрение нейронных сетей в работу гидравлических приводов. Второй шаг внедрение необходимого оборудования, способного выдавать обратную связь и снабжать нейронную систему потоком входных данных. В этом случае обучение сети идет на основе заранее созданной математической модели цифрового двойника, что позволяет сократить время на обучение модели, в связи с отсутствием необходимости собирать данные с реальных машин.

Фокусирующая сеть решает задачу прогнозирования момента отказа гидрооборудования. Исходя из имеющейся статистики фактической наработки до

отказа, строятся теоретические кривые износа агрегатов, которые будут применяться в качестве обучающей выборки для сети. Впоследствии сеть будет переобучена на реальных данных, собранных при мониторинге. Впоследствии по мере обучения сети на основе реальных результатов, результаты станут точнее, так как она будет учитывать флуктуации реальных компонентов привода.

Одним из традиционных решений для обратной связи по линейному перемещению гидроцилиндров является использование магнитострикционного датчика штокового типа, который монтируется на задней части цилиндра. Для его установки в штоке цилиндра высверливается отверстие, соответствующее длине зонда, а на торце поршня закрепляется магнит. Через специальное гидравлическое отверстие в торцевой крышке выполняется нарезка резьбы, позволяющая интегрировать трубку датчика, рассчитанную на рабочее давление.

Заключение

Применение цифровых двойников в диагностике и обслуживании гидроприводов открывает новые возможности для повышения надежности оборудования и снижения затрат. Использование интеллектуальных систем позволяет прогнозировать поломки, оптимизировать техобслуживание и минимизировать аварийные остановки. В будущем ожидается дальнейшее развитие технологий ИИ, расширение их возможностей и интеграция с автоматизированными системами управления производством. Также важно учитывать вопросы кибербезопасности при работе с ИИ, поскольку обработка данных в облаке требует защиты от внешних угроз. Развитие отечественных решений в данной области поможет повысить технологическую независимость и конкурентоспособность предприятий. Весомым недостатком внедрения ИИ в область гидромашиностроения является высокая входная стоимость в данную область, также необходим высококвалифицированный персонал, способный работать как с гидравликой, так и с программным обеспечением, которого в данный момент не хватает на рынке.

Список литературы

1. Воробьев Д.И., Кузин А.О., Ерисов Я.А. Разработка цифрового двойника пресса для кузнечно-штамповочного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 365-371. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-365-372.
2. Пузанов А.В. Элементы концепции цифрового двойника гидропривода / А. В. Пузанов // Математическое моделирование: Тезисы II Международной конференции, Москва, 21-22 июля 2021 года. – М.: Издательство "Перо", 2021. – С. 72-73.
3. Крук А.Р., Егоров А.Л., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Обзор методов контроля состояния элементов гидропривода // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2-2. – С. 267-270.

Сведения об авторах:

Жарковский Александр Аркадьевич – д.т.н., профессор;

Кривошеев Никита Сергеевич – аспирант.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА АНТИФРИКЦИОННЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ СИСТЕМЫ СТАЛЬ-БАББИТ

Быков П.А.¹, Калашников И.Е.¹, Михеев Р.С.²

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова*

Российской академии наук, Москва;

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва*

Ключевые слова: дуговая наплавка, интерметаллиды SnSb, погонная энергия, система сталь-баббит, антифрикционные покрытия.

Аннотация. Предложена технология ремонта антифрикционных слоистых композиций системы сталь-баббит с применением процесса дуговой наплавки. Получены функционально-организованные композиции триботехнического назначения с промежуточным слоем из баббита Б83. Показано, что термическое воздействие процесса аргонодуговой наплавки с погонной энергией 3780 Дж/мм, приводит к диспергированию структуры промежуточного слоя. В частности, доля кристаллов β -фазы (SnSb) площадью поперечного сечения менее 500 мм² возрастает на 4%, при одновременном уменьшении их среднего размера с 31,1 до 5,4 мкм по сравнению с исходным состоянием.

THE REPAIR TECHNOLOGY OF ANTIFRICTION LAYERED COMPOSITES OF STEEL-BABBITT SYSTEM

Bykov P.A.¹, Kalashnikov I.E.¹, Mikheev R.S.²

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences,
Moscow;*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow;*

Keywords: arc surfacing process, intermetallic SnSb, heat input, steel-babbitt system, antifriction coatings.

Abstract. A technology for repairing antifriction layered composites of the steel-babbitt system using the arc surfacing process is proposed. Functionally organized compositions for tribotechnical purposes with an intermediate layer of B83 babbitt were obtained. It is shown that the thermal effect of the argon-arc surfacing process with a energy of 3780 J/mm leads to dispersion of the intermediate layer structure. In particular, the proportion of β -phase (SnSb) crystals with a cross-sectional area of less than 500 mm² increases by 4%, while simultaneously decreasing their average size from 31,1 to 5,4 μ m compared to the initial state.

Покрyтия антифрикционного назначения для узлов трения скольжения (подшипников, опор, втулок и т.д.), являются неотъемлемым конструктивным элементом большинства машин и механизмов. Базовым материалом для формирования антифрикционного слоя на поверхности стальной подложки, является сплав баббита марки Б83 [1]. Однако, по истечении гарантированного срока эксплуатации подобных узлов трения требуется проведение плановых ремонтных работ для восстановления изношенного антифрикционного слоя. Несмотря на трудоемкость и относительную дороговизну в настоящее время самым распространенным технологическим способом ремонта является перезаливка баббита Б83 [2]. С другой стороны применение процесса дуговой наплавки может

стать весьма многообещающим и перспективным способом ремонта подобных подвижных опор скольжения. Причем в качестве материала наплавляемого антифрикционного покрытия особый интерес представляют разработанные за последние годы дисперсно упрочненные композиционные материалы на основе алюминия (КМ), позволяющие расширить диапазон трибонагружения узлов трения [3]. Поэтому формирование функционально-организованных слоистых композиций, состоящих из стальной основы, промежуточного слоя баббита и рабочего покрытия из КМ является актуальной задачей. При этом особое внимание следует уделять сохранению благоприятной структуры промежуточного слоя, чему и посвящена данная работа.

Рабочее покрытие из КМ состава $AK12M2MgH+10\%SiC$ наносили на поверхность биметаллического образца процессом дуговой наплавки с погонной энергией 3780 Дж/мм. Биметаллический образец, изготовленный по традиционной литейной технологии, представлял собой пластину размером 300x150 мм, состоящую из подложки (сталь 20 по ГОСТ 1050) и промежуточного слоя (баббит Б83 по ГОСТ 1320) толщиной 10 и 4 мм соответственно. Структуру промежуточного слоя из сплава Б83 исследовали методами оптической микроскопии с помощью микроскопа Leica DMILM, а размер кристаллов β -фазы (SnSb) оценивали с помощью системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D v18.1.

После формирования рабочего покрытия площадь поперечного сечения кристаллов β -фазы (SnSb) в области промежуточного слоя, прилегающей к наплавленному рабочему покрытию, не превышает 2000 мкм^2 , в то время как в исходном состоянии данный параметр достигает 5000 мкм^2 (рис. 1). В результате рекристаллизации доля кристаллов β -фазы минимального размера (площадь поперечного сечения менее 500 мкм^2) увеличилась на 4%, а крупные включения β -фазы (площадью от 2000 до 5000 мкм^2) не обнаружены в сравнении с исходным состоянием. Средний размер кристаллов β -фазы в промежуточном слое после дуговой наплавки рабочего покрытия и в исходном состоянии составляет 31,1 и 5,4 мкм соответственно. Следует отметить непрерывность границы раздела между наплавленным рабочим покрытием из КМ, а также промежуточным слоем и стальной подложкой при отсутствии несовершенств – пор, несплошностей и т.д. (рис. 1, а).



Рис. 1. Микроструктура промежуточного слоя из сплава Б83 после дуговой наплавки рабочего покрытия (а) и в исходном состоянии (б); выделена область для исследования и анализа размера кристаллов β -фазы

Таким образом, по результатам проведенной работы предложена технология ремонта антифрикционных слоистых композиций системы сталь-баббит и изготовлены функционально-организованные слоистые композиции с рабочим покрытием из КМ. Установлено, что за счет термического воздействия процесса дуговой наплавки с погонной энергией 3780 Дж/мм происходит диспергирование структуры промежуточного слоя: доля малых по размеру (площадью поперечного сечения менее 500 мм²) кристаллов β -фазы (SnSb) возрастает на 4%, а их средний размер уменьшается с 31,1 и 5,4 мкм по сравнению с исходным состоянием.

Список литературы

1. Leszczynska-Madej B., Madej M., Hrabia-Wisnios J. Effect of chemical composition on the microstructure and tribological properties of Sn-based alloys // The Journal of Materials Engineering and Performance. 2019, vol. 28, pp. 4065-4073.
2. Панфилов Е.А., Капустин В.В., Шевелева Е.В., Пилюшина Г.А. Повышение износостойкости узлов скольжения технологических машин // Вестник машиностроения. – 2022. – № 4. – С. 38-42.
3. Михеев Р.С. Инновационные пути в создании антифрикционных композиционных покрытий на основе цветных сплавов с повышенными триботехническими свойствами // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – № 5. – С. 204-210.

Сведения об авторах:

Быков Павел Андреевич – научный сотрудник Лаборатория прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов;

Калашиников Игорь Евгеньевич – д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатория прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов;

Михеев Роман Сергеевич – д.т.н., профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника».

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Тихонов Н.Ф., Илларионов И.Е., Стрельников И.А.

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии, вторичные материалы, противопригарные покрытия, методы переработки, шлаки, отходы.

Аннотация. Проведен обзор существующих ресурсосберегающих технологий, применяемых в производстве противопригарных покрытий. Особое внимание уделено анализу свойств высокодисперсных шлаков, которые содержат высокотеплопроводящие окислы и могут значительно улучшить охлаждение металла, а также предотвратить образование пригара. Использование шлаков в качестве альтернативного материала может минимизировать экологический след, связанный с извлечением и обработкой традиционного сырья.

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES IN NON-STICK COATINGS

Tikhonov N.F., Illarionov I.E., Strelnikov I.A.

I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary

Keywords: resource-saving technologies, recycled materials, non-stick coatings, recycling methods, slags, waste.

Abstract. The review of the existing resource-saving technologies used in the production of non-stick coatings is carried out. Special attention is paid to the analysis of the properties of highly dispersed slags, which contain highly heat-conducting oxides and can significantly improve metal cooling, as well as prevent burn formation. The use of slags as an alternative material can minimize the environmental footprint associated with the extraction and processing of traditional raw materials.

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительное внимание к вопросам устойчивого развития и рационального использования ресурсов в различных отраслях промышленности. Одной из ключевых задач, стоящих перед современным обществом, является поиск эффективных решений для снижения негативного воздействия на окружающую среду и оптимизации производственных процессов. В этом контексте ресурсосберегающие технологии становятся важным инструментом, позволяющим не только сократить потребление природных ресурсов, но и улучшить качество конечной продукции. В частности, применение вторичных, недефицитных и неорганических материалов в производстве противопригарных покрытий представляет собой актуальную и перспективную область исследований.

Противопригарные покрытия находят широкое применение в различных отраслях, включая пищевую, химическую и металлургическую промышленности. Они играют важную роль в обеспечении долговечности и надежности оборудования, а также в повышении эффективности производственных процессов. Однако традиционные методы создания таких покрытий часто требуют использования дефицитных и экологически неблагоприятных материалов, что приводит к увеличению затрат и негативному воздействию на окружающую среду.

В связи с этим, разработка ресурсосберегающих технологий, основанных на использовании вторичных материалов, становится особенно актуальной.

Обзор ресурсосберегающих технологий [1-3]

Современные условия производства требуют постоянного поиска эффективных и экономически обоснованных решений, направленных на минимизацию расхода природных ресурсов. Применение вторичных, недефицитных и неорганических материалов в противопопригарных покрытиях представляет собой интересную альтернативу традиционным источникам сырья. Многообразие доступных материалов и возможностей их переработки позволяет существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также сокращает затраты на производственные процессы.

Основной задачей при выборе вторичных материалов является оценка их адекватности по сравнению с традиционными компонентами. К высокоэффективным эквивалентам можно отнести различные виды шлаков и отходов производства, которые зачастую обладают свойствами, схожими с теми, что имеются у природных минералов. К примеру, использование высокодисперсных шлаков может улучшить адгезию, термостойкость и износостойкость противопопригарных покрытий. Анализ этих материалов должен основываться на комплексной оценке их химического состава, гранулометрического состава, а также физико-механических характеристик.

При проектировании противопопригарных покрытий также важна возможность адаптации вторичных материалов к существующим технологиям нанесения. Современные методы производства противопопригарных покрытий часто требуют высокой степени однородности и стабильности состава, что является необходимым условием для достижения желаемых эксплуатационных характеристик. Таким образом, необходима тщательная предварительная подготовка вторичных материалов, включая их очистку, измельчение и в некоторых случаях модификацию. Это помогает обеспечить необходимую дисперсность и улучшить взаимодействие с полимерными матрицами.

Непосредственная замена природных компонентов вторичными материалами требует понимания того, как различные добавки влияют на конечные свойства покрытий. Научные исследования показывают, что низкая критическая температура и плавкость некоторых шлаков могут способствовать образованию однородной структуры покрытия, что, в свою очередь, улучшает его антиадгезионные свойства. Стоит отметить, что для достижения максимальной эффективности таких замен необходимо учитывать, как технологический процесс, так и конечные эксплуатационные характеристики, которые должны соответствовать заданным стандартам.

Экономические аспекты внедрения ресурсосберегающих технологий в производственные процессы также играют важную роль. Сокращение затрат на покупку природного сырья, уменьшение расходов на утилизацию отходов и снижение затрат на обработку загрязняющих веществ – все это способствует созданию более устойчивой производственной модели. Кроме того, замена дорогих природных компонентов на дешевые вторичные материалы может быть значительным подспорьем для малых и средних предприятий, позволяя им снизить себестоимость производимой продукции.

Однако, чтобы процесс замещения природных исходных материалов был действительно эффективным, необходимо учитывать и экологические аспекты. Применение вторичных материалов не только снижает нагрузку на природные ресурсы, но и способствует сокращению образуемых отходов. Важно отметить, что многие вторичные материалы являются побочными продуктами активной хозяйственной деятельности и, следовательно, их переработка может значительно снизить объемы складирования и негативное воздействие на экосистему.

Перспективы развития ресурсосберегающих технологий обширны. Постоянно растущая осведомленность об экологических проблемах способствует тому, что производители становятся все более заинтересованными в переходе на экономичные и экологически безопасные технологии. Новые исследования в области композиционных материалов открывают возможности для разработки уникальных покрытий, использующих тогда, когда это возможно, уже существующие вторичные материалы.

Вырождение и недостаток традиционных ресурсов создают предпосылки для поиска альтернативных решений. Устойчивое развитие и снижение экологического следа производств могут быть достигнуты только путем интеграции вторичных ресурсов в технологические схемы. Этот процесс требует не только научных усилий, но и активного взаимодействия с промышленностью, правительством и образовательными учреждениями для создания нормативной базы, поддержки инноваций и стимулирования внедрения ресурсосберегающих технологий.

Дальнейшие шаги могут включать исследование новых методов переработки отходов и шлаков, а также разработку новых рецептур покрытия, которые наиболее эффективно используют вторичные компоненты. Инновации в области науки наноматериалов предоставляют дополнительные возможности для создания более прочных и эффективных противопопригарных покрытий, что в свою очередь будет способствовать улучшению эксплуатационных показателей и снижению себестоимости.

Таким образом, применение ресурсосберегающих технологий в производстве противопопригарных покрытий служит важным направлением, которое соединяет в себе экологические, экономические и технические аспекты. Эффективное использование вторичных и недефицитных материалов станет важной частью стратегии устойчивого развития в современных условиях, позволяя не только улучшить качество продукции, но и сохранить природные ресурсы для будущих поколений.

Анализ свойств высокодисперсных шлаков [4-6]

Современные высокодисперсные шлаки, получаемые в процессе переработки минерального и металлургического сырья, открывают новые горизонты для применения в противопопригарных покрытиях. Данные материалы отличаются высокой активностью благодаря своей многофункциональной природе. Включение высокодисперсных шлаков в состав покрытий позволяет значительно повысить их эксплуатационные характеристики. Их использование в качестве добавок приносит не только экономическую эффективность, но и экологическую целесообразность за счет замещения дефицитных природных ресурсов.

Одной из ярких особенностей высокодисперсных шлаков является их способность улучшать механические свойства покрытий. В частности, они способствуют увеличению прочности и устойчивости к истиранию, что актуально для предметов, подверженных интенсивной эксплуатации. Эти материалы содержат в своем составе оксиды, которые в процессе термической обработки образуют структуру, обладающую высокой прочностью. Благодаря этому покрытия, содержащие высокодисперсные шлаки, показывают лучшую стойкость к физическому воздействию по сравнению с традиционными аналогами.

Коэффициент трения, который играет важную роль в процессе применения противопригарных покрытий, также может улучшаться за счет добавления шлаков. Это связано с тем, что их дисперсная структура позволяет значительно уменьшить площадь контакта рабочего элемента с исполняемой поверхностью. В результате уменьшается единичное давление, что приводит к снижению коэффициента трения и, тем самым, облегчает эксплуатацию. Сочетание низкого коэффициента трения и высокой прочности делает такие покрытия весьма перспективными для использования в различных отраслях, включая пищевую, химическую и машиностроительную.

Сравнительный анализ различных типов шлаков демонстрирует, что их физико-химические свойства могут варьироваться в зависимости от источника получения и содержания нескольких компонентов. Например, шлаки, полученные в процессе плавки, часто имеют улучшенные свойства благодаря однородной структуре и высокой степени дисперсии. Установлено, что введение в состав покрытия ртутных шлаков или доменных шлаков позволяет значительно снизить температуру прилипания и улучшить антипригарные характеристики без ущерба для прочности покрытия.

Эксперименты показывают, что шумы, образующиеся в процессе эксплуатации покрытий, могут быть снижены при использовании высокодисперсных шлаков. Это очень важно для технических областей с целью обеспечения комфортной работы оператора и уменьшения уровня загрязнения окружающей среды шумами. Кроме того, шлаки способны служить естественными веществами-абсорбентами, способствуя снижению образования запахов и токсичных выбросов при высоких температурах.

На уровне молекулярной структуры высокодисперсные шлаки показывают активное взаимодействие с другими компонентами покрытия, что обуславливает их удивительные адгезивные свойства. За счёт образующихся силикатных связей, они обеспечивают прочное сцепление с конгломератными материалами, что существенно увеличивает срок службы покрытий. При этом важно отметить, что стабильность данных соединений позволила существенно уменьшить риск выделения вредных веществ в процессе эксплуатации.

В бесконечных перспективах применения высокодисперсных шлаков в противопригарных покрытиях открываются возможности для более глубокого изучения их свойств. Например, текущее направление исследований нацелено на оптимизацию состава шлаков для достижения еще более высоких антипригарных качеств. Разработка новых, более эффективных технологий переработки этого материала также может стать важным шагом в устойчивом развитии индустрии.

С точки зрения ресурсосбережения, применение высокодисперсных шлаков позволяет снизить зависимость от природных ископаемых. Это важный аспект в

условиях дефицита природных ресурсов, когда каждый килограмм закладывает основу для нового подхода к производству. Использование шлаков в качестве альтернативного материала может минимизировать экологический след, связанный с извлечением и обработкой традиционного сырья [7].

Выводы

Преимущества, которые предоставляет использование высокодисперсных шлаков в противопопригарных покрытиях, не ограничиваются лишь их функциональными свойствами. Эти материалы имеют дополнительное преимущество: их переработка и использование в качестве вторичного сырья способствуют минимизации отходов и поддерживают замкнутый цикл производства. В результате комплексного подхода к формированию свойств, обеспечивающему оптимальные результаты в эксплуатации, противопопригарные покрытия с высокодисперсными шлаками демонстрируют высокую эффективность и многочисленные преимущества для промышленности [8, 9].

Список литературы

1. Ровин С.Л., Ровин Л.Е. Ресурсосберегающие технологии в литейном и металлургическом производствах // Семинар-презентация «Научно-технические разработки Беларуси, Казахстана, России для многостороннего сотрудничества». – М., 2016. – С. 16-22.
2. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Кадышев Е.Н. Ресурсосбережение в литейном производстве // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 20-21 апреля 2017 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2017. – С. 76-82.
3. Вагин Г.Я., Коровин В.А., Леушин И.О., Лоскутов А.Б. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве: учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2022. – 254 с.
4. Шабанов Д.Н., Иваненко А.М. Исследование структурно-механических свойств отходов литейного производства // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – № 3. – С. 20-22.
5. Темников В.В., Калимулина Е.Г., Тлеугабдулов Б.С. Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» // Черные металлы. – 2018. – № 7. – С. 32-37.
6. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахпазов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 352 с.
7. Пугин К.Г., Вайсман Я.И., Юшков Б.С., Максимович Н.Г. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии: монография. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. – 316 с.
8. Патент №2615429 РФ. Противопопригарная краска для литейных форм и стержней / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников, А.В. Королёв, И.О. Леушин, В.А. Коровин, Е.С. Соколов, Н.Ф. Тихонов. – Заявка № 2016105438 от 17.02.2016; опубл. 04.04.2017.
9. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Тихонов Н.Ф., Королёв А.В. Современные противопопригарные покрытия для литейных форм и стержней // Литейщик России. – 2025. – № 3. – С. 6-12.

Сведения об авторах:

Тихонов Николай Федорович – старший преподаватель кафедры робототехники и прикладной механики;

Илларионов Илья Егорович – д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии машиностроения;

Стрельников Игорь Анатольевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии машиностроения.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ДЕФЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Чепурнова Е.К., Солецкий В.В., Чернышова Д.В.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре

Ключевые слова: турбинная лопатка, дефлектор, теплоперенос, охлаждение, метод конечных элементов.

Аннотация. В исследовании рассматривается проблема оценки теплопереноса в системе охлаждения лопаток газотурбинных двигателей для снижения вероятности развития трещин в результате термической усталости. На основании метода конечных элементов проведен расчет температурных полей в дефлекторных каналах элемента лопатки газотурбинного двигателя, выявлены наибольшее теплонагруженные области.

FINITE ELEMENT MODELING OF HEAT TRANSFER IN THE DEFLECTOR COOLING SYSTEM OF A GAS TURBINE ENGINE BLADE

Chepurnova E.K., Soletsky V.V., Chernyshova D.V.

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure

Keywords: turbine blade, deflector, heat transfer, cooling, finite element method.

Abstract. The study examines the problem of assessing heat transfer in the cooling system of gas turbine engine blades to reduce the likelihood of cracks as a result of thermal fatigue. Based on the finite element method, the calculation of temperature fields in the deflector channels of the blade element of a gas turbine engine was carried out, and the most heat-stressed areas were identified.

Проблема обнаружения трещин в лопатках газотурбинных двигателей сегодня является одной из актуальных в сфере турбомашиностроения, поскольку влияет на эффективность работы газотурбинного двигателя. Сегодня существуют различные способы обнаружения трещин и снижения риска их развития. В исследованиях [1-3] рассмотрена модель системы обнаружения трещин в лопатках газотурбинных двигателей в условиях нестационарного режима работы на основании условия тепловой ионизации. Вопросы оптимизации данной системы за счет выбора рационального давления при различных температурных и циклических условиях работы исследованы в трудах [4-6], однако малоисследованным остается вопрос снижения вероятности развития трещин в условиях термической усталости. Решение данного вопроса во многом связано с обеспечением рационального теплоотвода в лопатках газотурбинного двигателя. Для его решения предлагается применить систему внутреннего охлаждения турбинных лопаток с использованием дефлекторных вставок.

На рисунках 1, 2 представлен элемент оболочки лопатки с дефлектором, по каналам которого течет охлаждающая газовая среда. При построении конечно-элементной модели в системе Ansys было создано 20745 узлов и 9327 элементов. На граничных поверхностях оболочки задавались условия теплоподвода и теплоотведения с помощью коэффициентов теплоотдачи и температуры

нагревающей и охлаждающей газовых сред. На рисунке 3 представлены результаты расчета температурных полей в дефлекторных каналах охлаждения.



Рис. 1. Выделенный элемент турбинной лопатки с дефлекторной вставкой

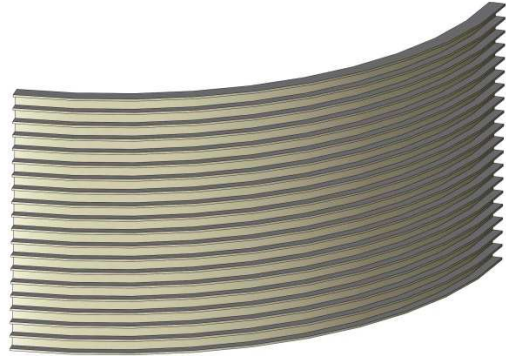


Рис. 2. Элемент дефлекторной вставки в системе внутреннего охлаждения

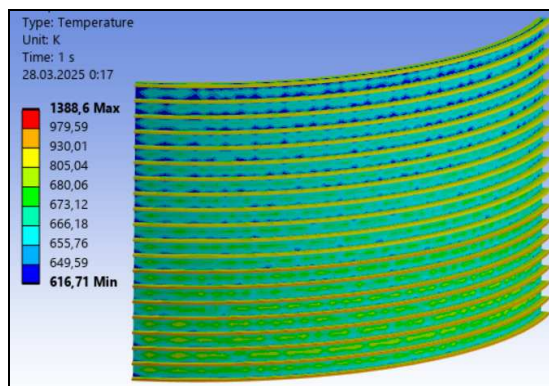


Рис. 3. Температурное поле на поверхностях каналов дефлектора

Согласно проведенному анализу теплового состояния в каналах теплоотвода дефлекторной лопатки температурное поле варьируется в пределах 635-950 K для поперечной схемы охлаждения, когда охлаждающая газовая среда поступает через область входной кромки. Наименьшая температура достигается в области входной кромки в области периферийного сечения, которая является менее нагруженной, а наибольшие температуры достигаются в области выходной кромки корневого сечения, которая подвержена наибольшему тепловому нагружению. Таким образом, тепловое состояние является неравномерным. Для решения проблемы температурной неравномерности требуется использовать систему дефлекторных каналов переменной ширины, что позволит повысить интенсивность охлаждения в более нагруженных областях.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости» (<https://rscf.ru/project/22-79-10114/>).

Список литературы

1. Гринкруг М.С., Андрианов И.К., Кара Б.М., Ткачева Ю.И. Система регистрации трещин в лопатках газотурбинного двигателя с применением ионизирующего вещества в нестационарных условиях // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, № 10(316). – С. 59-64. – DOI: 10.14489/td.2024.10.pp.059-064.

2. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К. Математическая модель условной оптимизации давления в системе обнаружения трещин лопаток газовых турбин // Математическое моделирование и численные методы. – 2024. – № 2(42). – С. 3-16. – DOI: 10.18698/2309-3684-2024-2-316.
3. Андрианов И.К., Кара Б.М., Чепурнова Е.К. Применение плоских и сеточных электродов в системе регистрации трещин лопаток газотурбинного двигателя // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 3. – С. 204-208. – DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-3-204-208.
4. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К. Оценка предельного давления и геометрии капсул в системе обнаружения трещин лопаток газотурбинного двигателя в условиях нестационарности и температурной неравномерности // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, №9. – С. 725-730. – DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-9-725-730.
5. Andrianov I.K., Chepurnova E.K. Optimizing Crack Detection in Gas Turbine Blades Using Implanted Capsules of Ionizing Gas in Nonsteady Operation at Nonuniform Temperature // Russian Engineering Research. 2023, vol. 43, no. 11, pp. 1361-1366. DOI: 10.3103/s1068798x23110035.
6. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К. Оценка предельного давления и геометрии капсул в системе обнаружения трещин лопаток газотурбинного двигателя в условиях нестационарности и температурной неравномерности // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, №9. – С. 725-730. – DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-9-725-730.
7. Андрианов И.К., Гринкруг М.С., Карабалли М. Разработка подхода к обнаружению трещин в лопатках авиационных газотурбинных двигателей на рабочих режимах // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2024. – № 1(148). – С. 4-20.

Сведения об авторах:

Чепурнова Елена Константиновна – аспирант, младший научный сотрудник;

Солецкий Вячеслав Вадимович – аспирант, младший научный сотрудник;

Чернышова Дарья Витальевна – аспирант, младший научный сотрудник.

МНОГОЗНАЧНОСТЬ ТЕРМИНА «ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА» КАК ФАКТОР ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Пипкин Ю.В., Зинченко А.М.

Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Ключевые слова: технологическая оснастка, инженерная подготовка, система стандартов, станочные приспособления, методика проектирования.

Аннотация. Материал посвящен терминологическим особенностям формирования дисциплины «Технологическая оснастка» при применении стандартной терминологии ЕСТД и системы стандартов технологической оснастки. Рассматривается многозначность термина «технологическая оснастка» как фактора, влияющего на организацию инженерной подготовки в области машиностроения. Характеризуются станочные приспособления как один из видов технологической оснастки.

AMBIGUITY OF THE TERM "TECHNOLOGICAL ARRANGEMENT" AS A FACTOR OF ENGINEERING EDUCATING IN THE FIELD OF MECHANICAL ENGINEERING

Pipkin Yu.V., Zinchenko A.M.

Donbass State Technical University, Alchevsk

Keywords: technological arrangement, engineering educating, system of standards, machine retaining device, design methodology.

Abstract. The material is devoted to the terminological features of the formation of the discipline "Technological arrangement" when using the standard terminology of the USTD and the system of standards for technological arrangement. The ambiguity of the term "technological arrangement" as a factor influencing the organization of engineering educating in the field of mechanical engineering is considered. Machine retaining device are characterized as one of the types of technological arrangement.

Подготовка инженерных кадров для машиностроения, в частности направлений 15.03.03 «Прикладная механика», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», и других [1], включает в себя изучение дисциплины «Технологическая оснастка» (или аналогичных – таких как «Проектирование технологической оснастки», «Оснастка машиностроительного производства», «Современная технологическая оснастка»). Одной из методических сложностей преподавания дисциплины является весьма обширное содержание термина «технологическая оснастка». Следует отметить, что этот термин определяется в межотраслевом стандарте «Единой системы технологической документации» ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий» и с учетом вложенности определений терминов «технологическая оснастка», «средства технологического оснащения» и «технологическое оборудование» формулируется следующим образом [2].

Технологическая оснастка – это совокупность орудий производства, дополняющих технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса и размещающихся совместно с материалами или заготовками и средствами воздействия на них.

Более широко содержание термина раскрывается в межотраслевой системе стандартов технологической оснастки (ССТО), правила наполнения которой определены ГОСТ 31.0000.01-90 «Технологическая оснастка. Основные положения». В ГОСТ 31.0000.01-90 при задании правил обозначения документов выделены 8 разновидностей технологической оснастки (ТО) по областям применения и разновидностям ТО:

- 1) для металлорежущих и деревообрабатывающих станков;
- 2) для сварочных, термических, сборочных, строительных, плотничных, столярных работ;
- 3) для обработки давлением;
- 4) для литейных работ;
- 5) вспомогательные инструменты и приспособления;
- 6) для обработки резанием (режущий инструмент);
- 7) для измерения.

Несмотря на то, что все перечисленные виды работ могут выполняться в машиностроении в основном производстве, они существенно отличаются друг от друга по сфере применения, решаемым технологическим задачам, методикам проектирования. Охват всей совокупности указанных областей применения в рамках единой дисциплины является достаточно сложной задачей, рациональность которой сомнительна.

Кроме того, в части выделенных стандартом областей, а именно в области обработки давлением [3] и литейных работ [2] «дополнительный» характер штампов листовой и объемной штамповки или литейных моделей, плит, опок создает методическую коллизию. Режущий инструмент, несомненно, является средством воздействия на материалы и заготовки, его «дополнительность» также под вопросом. Инструмент для измерений на контрольных операциях выступает в роли технологического оборудования.

Многозначный характер термина «технологическая оснастка» соответствует задачам ССТО по обеспечению системного подхода рационального использования производственных фондов, материальных и трудовых ресурсов. Однако в учебном процессе такая многозначность означает недостаточность одной дисциплины «Технологическая оснастка» и требует учета соответствующих специализированных дисциплин, таких как «Режущий инструмент», «Штамповая оснастка» и тому подобных.

В тоже время один из ранних стандартов ССТО ГОСТ 31.010.01-84 «Приспособления станочные. Термины и определения» посвящен только одному подвиду технологической оснастки – станочным приспособлениям. Причем функциональное назначение станочных приспособлений в полной мере имеет дополнительный характер, так как в большей степени ориентировано на часто изменяющуюся по форме заготовку, решая, например, задачи базирования. Однако проектирование станочных приспособлений имеет свою специфическую методику, включающую взаимосвязанные силовой расчет и расчет на точность. В

методическом плане приравнивание в образовательном процессе понятий технологической оснастки и станочных приспособлений может приводить к поверхностному переносу знаний, когда невозможность применить методы проектирования для одного типа ТО (например, станочных приспособлений) на другой тип ТО (например, штамповую оснастку) приведет к закреплению только внешнего содержания и потере внутренних смыслов. В тоже время такой перенос знаний может способствовать унификации подходов к созданию технологической оснастки в целом, то есть является одной из целей ССТО.

В этих условиях содержание дисциплины «Технологическая оснастка» сильно зависит от контекста специальности, по которой ведется подготовка. А общее название при различном содержании может негативно влиять на взаимодействие между специалистами разных машиностроительных специальностей, владеющих разными методиками проектирования при одинаковом терминологическом подтексте.

Заключение

Многозначность термина «технологическая оснастка» является фактором, оказывающим влияние на качество инженерной подготовки, при учете которого является предпочтительным выделение отдельных инженерных дисциплин для отдельных видов технологической оснастки, определенных ЕСТД и ССТО.

Список литературы

1. Группа направлений подготовки и специальностей (ФГОС): Машиностроение // Российское образование. Федеральный портал [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://edu.ru/vuz/speciality/fgos-15/mashinostroenie>.
2. Пипкин Ю.В., Кучма С.Н. Анализ применения системы стандартов технологической оснастки в области металлургии // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации: Сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции, Алчевск, 13-14 октября 2022 г. Часть 1. – Алчевск: ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2022. – С. 147-149.
3. Пипкин Ю.В., Зинченко А.М. Анализ применения системы стандартов технологической оснастки в области обработки металлов давлением // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации: Сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции, Алчевск, 13-14 октября 2022 г. Часть 1. – Алчевск: ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2022. – С. 144-146.

Сведения об авторах:

Пипкин Юрий Владимирович – к.т.н., доцент кафедры технологии и организации машиностроительного производства;

Зинченко Андрей Михайлович – к.э.н., заведующий кафедрой технологии и организации машиностроительного производства.

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ В ТЕХНИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: КАК ГОТОВИТЬ ВОСТРЕБОВАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Тараховский А.Ю.

*Севастопольский государственный университет, Севастополь;
Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь*

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, подготовка инженеров, конкурентоспособность на рынке труда, образовательные программы, компьютерное моделирование, измерительные инструменты, 3D-сканирование, практикоориентированное обучение, компетенции инженера, инновационные образовательные технологии, интеграция теории и практики, современные подходы в инженерии, анализ и деконструкция.

Аннотация. В статье рассматривается значимость реверс-инжиниринга для повышения конкурентоспособности выпускников технических вузов на современном рынке труда. Подчеркивается проблема недостаточной подготовки студентов в традиционных образовательных программах, где акцент делается на узких аспектах дисциплин без должного внимания к системному мышлению и комплексному решению задач. Для преодоления этих трудностей кафедра «Цифрового проектирования» Севастопольского государственного университета внедрила новую учебную дисциплину «Реверс-инжиниринг». Эта программа предлагает комплексный подход к обучению, охватывающий как теоретические, так и практические аспекты, начиная от анализа изделий и заканчивая созданием твердых моделей и конструкторской документации.

REVERSE ENGINEERING IN TECHNICAL EDUCATION: HOW TO TRAIN IN-DEMAND SPECIALISTS

Tarakhovskiy A.Yu.

*Sevastopol State University, Sevastopol;
Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol*

Keywords: reverse engineering, engineering training, competitiveness in the labor market, educational programs, computer modeling, measuring tools, 3D scanning, practice-oriented learning, engineering competencies, innovative educational technologies, integration of theory and practice, modern approaches in engineering, analysis and deconstruction.

Abstract. The article examines the importance of reverse engineering for increasing the competitiveness of graduates of technical universities in the modern labor market. The problem of insufficient preparation of students in traditional educational programs is emphasized, where the emphasis is on narrow aspects of disciplines without due attention to systems thinking and complex problem solving. To overcome these difficulties, the Department of Digital Design at Sevastopol State University has introduced a new academic discipline, Reverse Engineering. This program offers a comprehensive learning approach covering both theoretical and practical aspects, ranging from product analysis to the creation of solid models and design documentation.

В текущей ситуации большую конкурентоспособность на рынке труда приобретают выпускники технических ВУЗов, которые кроме классической конструкторской подготовки получили подготовку в области реверс-инжиниринга [1].

Теоретические основы реверс-инжиниринга базируются на ряде принципов и подходов, которые объединяют различные дисциплины, такие как инженерия, физика, математика и информационные технологии [2]. Целью реверс-инжиниринга является восстановление первоначальной конструкции объекта или системы путем анализа его структуры, функций и характеристик. Рассмотрим ключевые теоретические аспекты, лежащие в основе этого процесса.

1. Анализ и деконструкция. Процесс реверс-инжиниринга начинается с тщательного изучения и анализа объекта, что включает в себя исследование физических свойств объекта (материалы, структура, форма), анализ функциональности и назначения каждого элемента, и определение взаимодействия отдельных компонентов внутри системы.

2. Методы измерения и моделирования. После анализа объекта важно собрать необходимые данные для создания точной модели [3, 4]. Для этого используются следующие методы.

– Физическое измерение: Контактные и бесконтактные измерительные приборы, такие как штангенциркули, микрометры, координатно-измерительные машины (КИМ), лазерные сканеры и т.п., позволяют получить точные данные о размерах и формах объекта.

– Компьютерное моделирование: После сбора данных создаются виртуальные модели объектов с использованием CAD-систем. Моделирование позволяет визуализировать конструкцию и провести симуляции поведения объекта в различных условиях.

3. Принципы обратимости. Ключевым понятием в реверс-инжиниринге является обратимость – способность восстанавливать исходные проектные решения на основании готового продукта. Теория обратимости предполагает, что если известна функция объекта и его физическая реализация, возможно восстановить концепцию дизайна и производственные процессы, которые привели к созданию этого объекта.

4. Математический анализ и оптимизация. На этапе моделирования применяются математические методы для анализа и оптимизации полученных данных.

5. Концептуальное моделирование. После сбора всех необходимых данных и проведения анализа формируется концептуальная модель объекта. Она описывает общие принципы функционирования системы и её структуру.

6. Синтез новой конструкции. Заключительным этапом реверс-инжиниринга является синтез новой конструкции [5]. На основе восстановленных данных и моделей создается новая версия объекта, которая может обладать улучшенными характеристиками или быть адаптирована под конкретные требования. Важно учесть экономические и технологические ограничения при создании нового продукта.

Инженерное образование сталкивается с рядом серьезных вызовов, связанных с недостаточной подготовкой выпускников к требованиям современного рынка труда и отсутствием гибкости учебных программ [6, 7]. Рассмотрим один из основных недостатков существующих образовательных программ – неподготовленность к решению комплексных задач. Большинство курсов сосредоточено на изучении конкретных технических аспектов, игнорируя

обучение системному мышлению и навыкам комплексного решения проблем. Это препятствует выпускникам успешно справляться с многозадачными проектами, характерными для современной инженерной деятельности что ведет к существенному снижению уровня подготовки студентов в ключевых областях инженерного дела.

Уменьшение количества часов, отведённых на проведение практических и лабораторных занятий по важнейшим техническим дисциплинам, таким как Теоретическая и прикладная механика, Сопротивление материалов, а также Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения влечёт за собой недостаточную подготовку студентов в области фундаментальных инженерных знаний и навыков, что может отразиться на их способности решать практические задачи в профессиональной деятельности [8]. Эти дисциплины закладывают основу понимания физических законов, действующих в конструкциях, и формируют навыки расчета и проектирования деталей и узлов. Сокращение практических занятий и отсутствие курсовых проектов в этих областях оставляет студентов без необходимого опыта, что негативно сказывается на их способности решать реальные инженерные задачи.

В ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» на кафедре «Цифрового проектирования» разработана дисциплина «Реверс-инжиниринг», которая читается в 4-м семестре студентам Политехнического института [9].

Структура учебной дисциплины

Лекция 1: Введение в реверс-инжиниринг

Цель: познакомить студентов с основными задачами и технологиями реверс-инжиниринга.

Темы: Что такое реверс-инжиниринг? Задачи и сферы применения (машиностроение и другие отрасли). Современные технологии: 3D-сканирование, автоматизация, использование ИИ. Этапы реверс-инжиниринга.

Практическое занятие 1: Анализ и деконструкция изделия

Цель: научить студентов проводить подробный анализ конструкции изделия через его разборку, измерение компонентов и создание эскизов.

Задания: разборка изделия на составные части. Измерение элементов и создание эскизов для дальнейшего моделирования.

Лекция 2: Методы и инструменты измерения

Цель: ознакомление с современными методами измерения.

Темы: Повторение базовых инструментов измерения. Координатно-измерительные машины (КИМ). Лазерное сканирование: принципы, точность, ограничения. Оптические и контактные методы измерений.

Практическое занятие 2: Работа с измерительными инструментами

Цель: научиться измерять сложные детали и подготавливать данные для 3D-моделирования.

Задания: измерение сложной детали с криволинейными поверхностями. Создание эскиза с учётом допусков и посадок. Построение 3D-модели в программе Компас 3D.

Лекция 3: Основы 3D-сканирования

Цель: знакомство с технологиями 3D-сканирования.

Темы: Принципы работы лазерных и оптических сканеров. Типы сканеров (ручные, стационарные, портативные). Подготовка объекта к сканированию (маркеры, фон). Форматы данных (облако точек, полигональная модель).

Практическое занятие 3: Работа с ручным 3D-сканером Scanform L5

Цель: освоить процесс сканирования сложных объектов.

Задания: провести калибровку сканера. Провести сканирование объекта с криволинейными поверхностями. Сохранить данные в виде облака точек.

Лекция 4: Обработка данных 3D-сканирования

Цель: изучение методов обработки данных после сканирования.

Темы: Использование программного обеспечения Scanform для обработки облаков точек. Фильтрация и очистка данных. Создание полигональной модели. Оптимизация модели для дальнейших работ.

Практическое занятие 4: Обработка облака точек

Цель: научиться обрабатывать данные сканирования в ПО Scanform.

Задания: загрузить облако точек. Выполнить фильтрацию и очистку данных. Создать полигональную модель.

Лекция 5: Создание твердотельных моделей

Цель: изучение методов преобразования полигональных моделей в твердотельные.

Темы: Принципы реконструкции твёрдотельных моделей. Программы для реконструкции. Особенности работы в Компас 3D.

Практическое занятие 5: Создание твердотельной модели в Компас 3D

Цель: научиться строить твердотельную модель по полигональным данным.

Задания: импорт полигональной модели. Реконструировать твердотельную модель. Внести корректировки в модель.

Лекция 6: Оптимизация и анализ моделей

Цель: изучение методов оптимизации и анализа моделей.

Темы: Анализ геометрии модели. Упрощение геометрии для производственного процесса. Проверка соответствия стандартам ГОСТ.

Практическое занятие 6: Оптимизация и подготовка документации

Цель: научиться оптимизировать модели и готовить конструкторскую документацию.

Задания: оптимизировать модель. Создать рабочий чертёж по 3D-модели.

Лекция 7: Применение реверс-инжиниринга в производстве

Цель: рассмотреть практические примеры использования реверс-инжиниринга.

Темы: Применение в машиностроении. Оптимизация производственных процессов. Восстановление утраченных документов.

Практическое занятие 7: Комплексное задание (Модуль 1)

Цель: закрепить навыки работы с измерениями и моделированием.

Задания: измерить деталь. Создать 3D-модель и чертёж.

Лекция 8: Современные тенденции в реверс-инжиниринге

Цель: знакомство с новейшими тенденциями.

Темы: Искусственный интеллект в реверс-инжиниринге. 3D-печать и её роль в реверс-инжиниринге. Автоматизация процессов.

Практическое занятие 8: Комплексное задание (Модули 2 и 3)

Цель: закрепление навыков работы с 3D-сканированием и реконструкцией.

Задания: Отсканировать объект. Создать полигональную и твердотельную модели. Подготовить чертёж.

Лекция 9: Итоговые результаты курса

Цель: подведение итогов и повторение основных моментов.

Темы: Ключевые моменты курса. Ответы на вопросы. Подготовка к зачёту.

Практическое занятие 9: Зачетное занятие

Цель: проверка знаний и навыков студентов.

Задания: выполнение комплексного задания по всему курсу.

По итогам курса студенты освоят основные аспекты реверс-инжиниринга – от анализа до создания конструкторской документации. Курс включает разнообразные методики и технологии, такие как использование современных измерительных инструментов, работа с 3D-сканером и специализированным программным обеспечением, что позволяет студентам эффективно применять полученные знания на практике. В процессе занятий учащиеся осваивают полный цикл реверс-инжиниринга – от измерений до создания готовой продукции, что способствует формированию комплексного понимания данной области и готовит специалистов к решению реальных производственных задач.

Список литературы

1. Панфилова Е.Е. Реверс-инжиниринг как инструмент устойчивого развития промышленных организаций // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы : Сборник научных трудов по материалам XI Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 23 января 2025 года. – М.: Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Центр развития образования и науки», 2025. – С. 36-40.
2. Тигров В.П., Боброва О.А., Тигров В.В. Моделирование изобретательских умений в условиях дополнительного технологического образования: Учебное пособие. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – 98 с.
3. Евсеев Е.Ю., Кочеткова Т.Ю. Интеграция нового оборудования в образовательную систему университета // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Сборник тезисов 22 Международной научно-технической конференции, посвящённой 90-летию со дня рождения Ю.А. Гагарина, Рязань, 17-19 апреля 2024 года. – Рязань: Московский политехнический университет, 2024. – С. 725-727.
4. Доброквашин А.В. Особенности практического использования 3D принтеров в технологическом образовании // Профессионально-технологическая и экономическая подготовка обучающихся в условиях модернизации и стандартизации образования : Сборник статей по итогам III Международной научно-практической конференции преподавателей, студентов, аспирантов и докторантов, Волгоград, 21-22 ноября 2024 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. – С. 125-129.
5. Тараховский А.Ю. Трёхмерное моделирование объекта на основе данных лазерного 3D сканирования // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2023. – № 14. – С. 16-19. – DOI: 10.26160/2309-8864-2023-14-16-19.
6. Лудушкина Е.Н. Высшее образование в изменяющемся мире: стратегическое, диверсифицированное, справедливое, эффективное и устойчивое // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2024. – Т. 20, №5(434). – С. 965-988. – DOI: 10.24891/ni.20.5.965.

7. Качество образовательного процесса: проблемы и пути развития: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Минск, 16 мая 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024. – 98 с.
8. Алибеков С.Я., Довыденков В.А., Крашенинникова Н.Г. Особенности преподавания технических дисциплин // Современные проблемы технического образования : Материалы XIX Всероссийской научно-методической конференции, Йошкар-Ола, 22–23 марта 2019 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – С. 5-8.
9. Саса Д.А., Тараховский А.Ю. Использование многофункционального измерительного манипулятора для контроля параметров получаемых после механической обработки // Вестник современных технологий. – 2020. – № 3(19). – С. 54-59.
10. Тараховский А.Ю., Тараховский, А.А. Внедрение дисциплины «Реверс инжиниринг» в учебный процесс студентов инженерной подготовки // Современные технологии и реверс-инжиниринг: Сборник статей Всероссийских научно-практических конференций,. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2023. – С. 197-202.

Сведения об авторе:

Тараховский Алексей Юрьевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Цифровое проектирование» СевГУ, старший научный сотрудник научно-производственного центра инжиниринговых технологий КИПУ им. Февзи Якубова.

Научное периодическое издание

Машиностроение: инновационные аспекты развития:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№ 8

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60х84 1/16. Усл. печ. л. 4,59.
Подписано в печать 28.03.2025г. Заказ №25-06.
<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2025-8>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г. Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.
<http://srcms.ru>
E-mail: spbf@srcms.ru