

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**

№9

Санкт-Петербург, 2026

УДК 62 : 001.8895

ББК 34.41

М38

М38 Машиностроение: инновационные аспекты развития:
Материалы международной научно-практической конференции. –
Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2026. – № 9. – 132 с. – DOI:
10.26160/2618-6810-2026-9.

Представлены материалы IX международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (27 марта 2026 г.). 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/10.26160/2618-6810-2026-9>

ISSN 2618-6810

© Авторы, 2026
© НИЦ МС, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Машиноведение

Капалин Н.Ю., Бердников О.О., Реченко Д.С. Влияние технологических поглощающих покрытий на толщину изменённого слоя обработанной поверхности при лазерной резке стали 12X18H10T.....	6
Башмур К.А. Экспериментальное исследование эксплуатационных свойств трибосопряжений машин с детерминированными рельефными микроструктурами.....	11
Дмитриева Л.А., Стариков А.И., Углова С.С. Факторы трения, влияющие на работу элементов дисковых фрикционных муфт	14
Чечуга А.О., Маликов А.А. Использование полимерных материалов для изготовления зубчатых колёс: римаид и полиамид	17

Тяжелое машиностроение

Губанов О.М. Влияние растягивающих напряжений на магнитную индукцию анизотропной электротехнической стали	20
Колибасов В.А., Новиков В.А., Акопян А.А. Оценка твердости материалов царапанием поликристаллической алмазной пластиной	23
Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Федоров С.К., Орлова Е.А. Электромеханическая поверхностная закалка сварных насосно-компрессорных труб из стали 09Г2С	30
Демченко И.И., Попов Н.А. Применение бывших в употреблении резинотехнических изделий для борьбы с адгезией грунтов к опорным поверхностям шагающих экскаваторов	33
Шишкин Е.А., Курбанов Т.К. Исследование влияния влажности грунта на выбор оптимальных параметров работы дорожного катка.....	36
Храпенкова Е.С. Новое техническое решение бойка пневмоударной машины.....	40
Галимзянова Е.И., Жуков И.А. Обоснование применения в горных машинах ударного действия бойков, образованных политропой вращения.....	47

Общее машиностроение

Бородин Н.А., Журавлев И.Н., Князев А.В., Маклакова Е.А., Доманин К.А. К определению влияния механических параметров на работу фрезерной почвообрабатывающей машины	51
--	----

Кульпина М.О. К вопросу применения полимерных композиционных материалов в почвообработке	54
Суконкин В.Ф., Свиридов А.С. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин с применением композитных материалов.....	57
Витол Н.С., Изнаилов Б.М. Совершенствование технологической подготовки операций при использовании оборудования с ЧПУ	63
Кондратьев В.И. Разработка алгоритмов и программного модуля проектирования технологии производства конусных стаканов с фланцем методами листовой штамповки.....	67

Среднее машиностроение

Наумов В.А., Левичева О.И. Производительность коловратных насосов с большими зазорами между кулачками при подаче высоковязких пищевых сред.....	76
Иванцов А.Д., Сеницына Ю.В. Оценка возможности проектирования эквивалентной по нагрузкам циклоидальной секторной передачи	79
Бирюков В.П., Горюнов Я.А. Определение момента трения полиамида с различным наполнением при подаче в зону трения абразивно-масляной суспензии.....	83
Бирюков В.П., Якубовский А.А. Определения интенсивности изнашивания и коэффициентов трения полимеров при возвратно-поступательном движении образцов.....	88

Точное машиностроение

Харланова К.С. Подход к входному контролю подшипников качения по электрическим параметрам.....	92
---	----

Ремонт машин и оборудования

Калашников И.Е., Черненко Д.В., Федорцов Р.С., Быков П.А., Кобелева Л.И., Михеев Р.С. Определение технологических режимов изготовления наплавочных прутков из порошковых композиционных смесей системы Sn-Sb-Cu + TiNi методом экструзии	96
Бердников О.О., Капалин Н.Ю., Реченко Д.С. Исследование процессов в зоне резания при механической обработке жаропрочного сплава ВЖЛ-14Н-ВИ твердосплавным инструментом	100
Лашков В.А., Кондрашева С.Г. Повышение надежности резьбовых соединений в машиностроении при динамических нагрузках на основе упругопластического деформирования.....	105

Муравьев Д.В. Технология ремонта подшипникового щита тягового электродвигателя с использованием кондуктора с пневматическим приводом.....	109
--	-----

Смежные вопросы развития машиностроения

Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Фуфаева В.М. Анализ визитных карт организаций современного машиностроительного комплекса	114
Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Фуфаева В.М. Анализ перспектив использования нейросетей при патентовании технических разработок	117
Чепурнова Е.К., Андрианов И.К., Солецкий В.В., Чернышова Д.В. Конечно-элементное моделирование остаточных напряжений в толстостенной сферической оболочке при нагружении внутренним давлением	120

Современные проблемы инженерного образования

Дмитриева Л.А., Лукьянов А.С., Стариков А.И. Изучение дисциплины «Основы триботехники» в формате учебного онлайн курса	123
Бирюкова И.П., Панюшкин Н.Н. Формирование компетенций в сфере статистической обработки информации средствами физического практикума	126
Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Стрельникова В.О. Трансформация инженерного образования в условиях цифровизации.....	129

УДК 621.791.94, 621.373.8

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ТОЛЩИНУ ИЗМЕНЁННОГО СЛОЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ СТАЛИ 12X18H10T

Капалин Н.Ю., Бердников О.О., Реченко Д.С.

Омский государственный технический университет, Омск

Ключевые слова: лазерная резка, изменённый слой, термическое влияние, коэффициент поглощения, графитовое покрытие, черная матовая краска, нержавеющая сталь 12X18H10T.

Аннотация. В работе исследовано влияние различных типов поверхностных поглощающих покрытий на параметры лазерной резки и толщину изменённого слоя обработанной поверхности стали 12X18H10T. Проведены три серии экспериментов с использованием черного матового покрытия, графитовой краски и без покрытия. Выполнены расчёты плотности теплового потока и поглощённой мощности лазерного излучения. Установлено, что применение графитового покрытия обеспечивает минимальную толщину изменённого слоя (2–10 мкм) и высокую стабильность процесса. Определены рациональные режимы лазерной резки и дано физическое объяснение полученных результатов.

THE EFFECT OF COATINGS ON THE THICKNESS OF THE MODIFIED LAYER DURING LASER CUTTING OF STEEL 12X18H10T

Kapalin N.Yu., Berdnikov O.O., Rechenko D.S.

Omsk State Technical University, Omsk

Keywords: laser cutting, modified layer, thermal effect, absorption coefficient, graphite coating, black matte paint, stainless steel 12X18H10T.

Abstract. The influence of various types of surface coatings on the parameters of laser cutting and the thickness of the modified layer in 12X18H10T steel is investigated. Three series of experiments were carried out using a black matte coating, graphite grease and uncoated. Calculations of the heat flux density and absorbed laser radiation power have been performed. It is established that the use of graphite coating ensures a minimum thickness of the modified layer (2-10 microns) and high stability of the process. Optimal laser cutting modes are determined and a physical explanation of the results is given.

Введение. Лазерная резка является одной из наиболее эффективных технологий обработки металлов благодаря высокой точности, производительности и локальности теплового воздействия [1, 2]. Однако качество обработанной поверхности во многом определяется толщиной изменённого (термически повреждённого) слоя (ИС), который влияет на механические свойства изделия и его конечный ресурс.

Одним из ключевых факторов, влияющих на процесс лазерной резки, является коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью материала. Известно, что нанесение покрытий может существенно изменять этот параметр, тем самым влияя на тепловые процессы в зоне резки [3, 4].

Целью данной работы является исследование влияния различных технологических покрытий (черная краска, графитовая краска, отсутствие покрытия) на параметры теплового воздействия и толщину ИС при лазерной резке стали 12X18H10T, а также определение рациональных режимов обработки.

Методы и расчётные зависимости

1. Принятые допущения для расчёта

С целью корректного сравнения влияния различных технологических покрытий на параметры теплового воздействия и толщину ИС при лазерной резке стали 12X18H10T введены определенные допущения и ограничения:

Диаметр пятна лазера: $d = 0,2$ мм.

Площадь пятна:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,2)^2}{4} \approx 0,0314 \text{ мм}^2.$$

Скорость резки: $v = 210$ мм/мин = 3,5 мм/с.

Время воздействия:

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{0,2}{3,5} \approx 0,057 \text{ с.}$$

Принятые коэффициенты поглощения для различных технологических покрытий представлены таблице 1.

Табл. 1. Коэффициенты поглощения

Технологическое покрытие	A
Без покрытия	0,30
Черная краска	0,70
Графит	0,85

2. Расчёт по эксперименту 1 (черная матовая краска)

Плотность теплового потока рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{P_{abs}}{S},$$

где P_{abs} – поглощённая мощность, Вт; S – площадь пятна лазера,

$$P_{abs} = P \cdot A,$$

где P – мощность лазера, Вт; A – коэффициент поглощения (безразмерный) технологического покрытия.

Результаты расчетов по 1 эксперименту представлены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты расчёта 1 эксперимента

№	P, Вт	P _{abs} , Вт	q, Вт/мм ²	ИС, мкм
1.	1000	700	22357	8-20
2.	1100	770	24522	12-24
3.	1200	840	26752	7-15
4.	1300	910	28981	8-50
5.	1400	980	31210	7-16
6	1500	1050	33439	11-33

Вывод: наиболее низкие значения ИС получены при мощности лазера 1200 и 1400 Вт и составляют 7-15 и 7-16 мкм соответственно.

3. Расчёт по эксперименту 2 (без покрытия)

Результаты расчетов по 2 эксперименту представлены в таблице 3.

Табл. 3. Результаты расчёта 2 эксперимента

№	P , Вт	P_{abs} , Вт	q , Вт/мм ²	ИС, мкм
1.	1000	300	9554	8-42
2.	1100	330	10510	7-50
3.	1200	360	11465	6-53
4.	1300	390	12420	5-35
5.	1400	420	13376	7-69
6.	1500	450	14331	8-28

Вывод: по всем результатам эксперимента наблюдается большой разброс значений ИС (до 69 мкм); процесс нестабилен; отсутствие покрытия ухудшает качество обработанной поверхности.

4. Расчёт по эксперименту 3 (графитовая краска)

Результаты расчетов по 3 эксперименту представлены в таблице 4.

Табл. 4. Результаты расчёта 3 эксперимента

№	P , Вт	P_{abs} , Вт	q , Вт/мм ²	ИС, мкм
1.	1000	850	27070	7-27
2.	1100	935	29777	9-17
3.	1200	1020	32484	2-10
4.	1300	1105	35191	10-17
5.	1400	1190	37898	6-19
6.	1500	1275	40605	6-14

Вывод: наилучший результат достигается при мощности лазера 1200 Вт, значения ИС составляют 2–10 мкм.

5. Сравнительный анализ

В таблице 5 представлены данные экспериментов по изменённому слою.

Табл. 5. Результаты экспериментов по изменённому слою

Условие	Минимальный ИС	Максимальный ИС
Черная краска	7 мкм	50 мкм
Графитовая краска	2 мкм	27 мкм
Без покрытия	5 мкм	69 мкм

Данные значения ИС получены при плотности теплового потока соответственно: ~11000-13000 Вт/мм² – без покрытия; ~26000-31000 Вт/мм² – черная краска; ~32000-38000 Вт/мм² – графитовая краска.

6. Определение рациональных параметров

Критерии определения параметров: минимальная толщина ИС и минимальный разброс значений ИС.

Рациональные параметры лазерной резки: мощность лазера – $P = 1200$ Вт; покрытие – графитовая краска; плотность теплового потока – $q \approx 32484$ Вт/мм²; в результате толщина ИС – $h = 2-10$ мкм.

7. Физическое объяснение результата

При использовании графитовой краски коэффициент поглощения технологического покрытия составляет $A=0,85 \Rightarrow P_{abs} \uparrow$, при этом тепло распределяется равномерно, уменьшается локальный перегрев и снижается глубина теплового проникновения.

8. Расчёт температуропроводности обрабатываемого материала

Температуропроводность материала рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м/К); ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг/К).

Для расчётов принимаем плотность материала $\rho = 7900$ кг/м³, удельную теплоёмкость $c = 500$ Дж/(кг/К) и теплопроводность $\lambda = 16$ Вт/(м/К).

Подставим значения:

$$\alpha = \frac{16}{7900 \cdot 500} \approx 4,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

Время воздействия на обрабатываемый материал рассчитывается по формуле:

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{0,2}{3,5} \approx 0,057 \text{ с}.$$

Расчёт толщины изменённого слоя определяется по формуле:

$$h = \sqrt{\alpha \cdot \tau}.$$

Подставим значения:

$$h_{\text{теор}} = \sqrt{4,05 \cdot 10^{-6} \cdot 0,057} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$h \approx 480 \text{ мкм}.$$

Полученное значение $h_{\text{теор}} \approx 480$ мкм значительно больше экспериментальных (2-69 мкм), потому что формула описывает глубину теплового влияния, а не реальную толщину изменённого слоя, который формируется только при превышении критических температур.

9. Уточнение модели (коэффициент плавления)

Введём коэффициент эффективности теплового воздействия:

$$h_{\text{реал}} = \eta \cdot h_{\text{теор}},$$

где η – коэффициент эффективного термического воздействия, составляет $\eta = 0,02 \dots 0,15$ (экспериментально подтверждённые значения для лазерной обработки металлов); $h_{\text{теор}}$ – расчётная толщина изменённого слоя, мкм.

Получим:

$$h_{\text{реал}} = (0,02 - 0,15) \cdot 480 = 9,6 \dots 72 \text{ мкм}. \quad (11)$$

Полученные значения совпадают с уровнем значений, полученных экспериментальным путем (табл. 5).

Вывод. Рациональные условия лазерной резки достигаются при мощности лазера $P = 1200$ Вт, коэффициенте поглощения технологического покрытия $A \approx 0,85$, что обеспечивает минимальную толщину изменённого слоя (до 2 мкм) и улучшение качества обработанной поверхности.

Выводы. Установлено, что тип покрытия существенно влияет на толщину изменённого слоя при лазерной резке. Наихудшие результаты наблюдаются при отсутствии технологического покрытия из-за низкого коэффициента поглощения и как результат нестабильности процесса. Использование черного матового покрытия улучшает результаты, однако не обеспечивает минимальную толщину измененного слоя. Наилучшие результаты достигаются при применении графитовой краски: минимальная толщина ИС составляет 2-10 мкм. Рациональные параметры лазерной резки: мощность лазера – $P = 1200$ Вт, при коэффициенте поглощения технологического покрытия – $A \approx 0,85$. Теоретические расчёты глубины теплового влияния превышают экспериментальные значения, что требует введения корректирующих коэффициентов. Применение покрытий является эффективным способом управления качеством лазерной обработки.

Список литературы

1. Steen W.M., Mazumder J. Laser Material Processing. – Springer, 2010. – 558 p.
2. Закалюкина Л.А., Баннов В.Я. Виды и параметры процесса лазерной резки // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – №19. – С. 163-167.
3. Safari M., Abtahi S.M., Joudaki J. Experimental Modeling, Statistical Analysis, and Optimization of the Laser-Cutting Process of Hardox 400 Steel // Materials. 2024, vol. 17, p. 2798. DOI: 10.3390/ma17122798.
4. Ready J.F. Effects of High-Power Laser Radiation. – Academic Press, 1997.

Сведения об авторах:

Капалин Николай Юрьевич – аспирант;

Бердников Олег Олегович – аспирант;

Реченко Денис Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ МАШИН С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ РЕЛЬЕФНЫМИ МИКРОСТРУКТУРАМИ

Башмур К.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: износостойкость, микрорельеф, приработка, трибологические характеристики, трибопара скольжения, текстурирование, трение и износ.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований на машине СМЦ-2 влияния наличия рельефных микроструктур на трибологические характеристики пары скольжения в условиях смешанной смазки. Установлено, что нанесение эллипсоидального микрорельефа снижает суммарный износ на 43,5%. Технология обеспечивает стабильную приработку и двукратное превосходство в износостойкости.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF MACHINE TRIBO-PAIRS WITH DETERMINISTIC SURFACE TEXTURING

Bashmur K.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: wear resistance, microstructures, running-in, tribological characteristics, sliding tribopair, texturing, friction and wear.

Abstract. Experimental studies conducted on the SMC-2 testing machine evaluate the impact of surface micro-textures on the tribological performance of sliding pairs under mixed lubrication conditions. The results show that applying ellipsoidal micro-relief reduces total wear by 43.5%. This technology ensures stable running-in and provides a twofold increase in wear resistance.

Снижение трения в трибосопряжениях остается приоритетной задачей, напрямую определяющей энергоэффективность, эксплуатационную надежность и долговечность технических систем [1-5]. Рельефные детерминированные микроструктуры в форме углублений доказали свою эффективность в улучшении трибологических характеристик, повышая несущую способность и снижая трение и износ [2-5]. Каждое углубление действует как микрогидродинамический подшипник в условиях гидродинамической и смешанной смазки или как резервуар жидкости в случае граничной и смешанной смазки, а также как ловушка для продуктов износа [4, 5].

По сравнению с различными конфигурациями микроструктур, эллипсоидная форма оказала наиболее выраженное влияние на снижение коэффициента трения и оптимизацию динамических характеристик подшипника скольжения ввиду изогнутого профиля дна [3, 4, 6]. В данной работе представлено исследование кинетики износа контактных пар, модифицированных периодическими структурами эллипсоидального профиля.

На машине СМЦ-2 проводились испытания по схеме вал–колодка для двух типов образцов – гладкого и рельефного. Эллипсоидальные структуры были сформированы на основе технологии планетарного течения [2, 7]. Глубина структуры – 60 мкм; плотность распределения – 30%. Образец изготовлен из

бронзы БрОФ10-1 (HB 130; $R 20^{+0,05}$ мм; Ra 0,8), а контртелo изготовлено из стали 40X (HRC 32; Ø40 мм; Ra 0,6). Нормальная нагрузка составляла 1 кН, скорость скольжения – 0,5 м/с, общее расстояние скольжения – 5 км, смазка – масло И40-А.

Результаты испытаний представлены на рисунках 1 и 2.

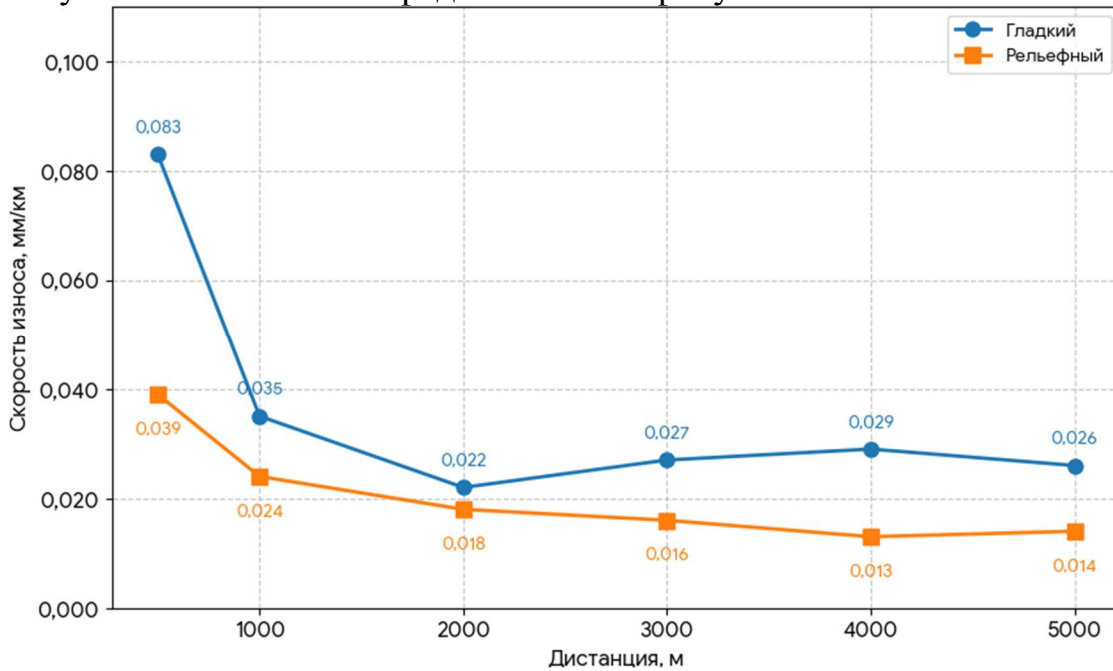


Рис. 1. Результаты измерения средней скорости износа

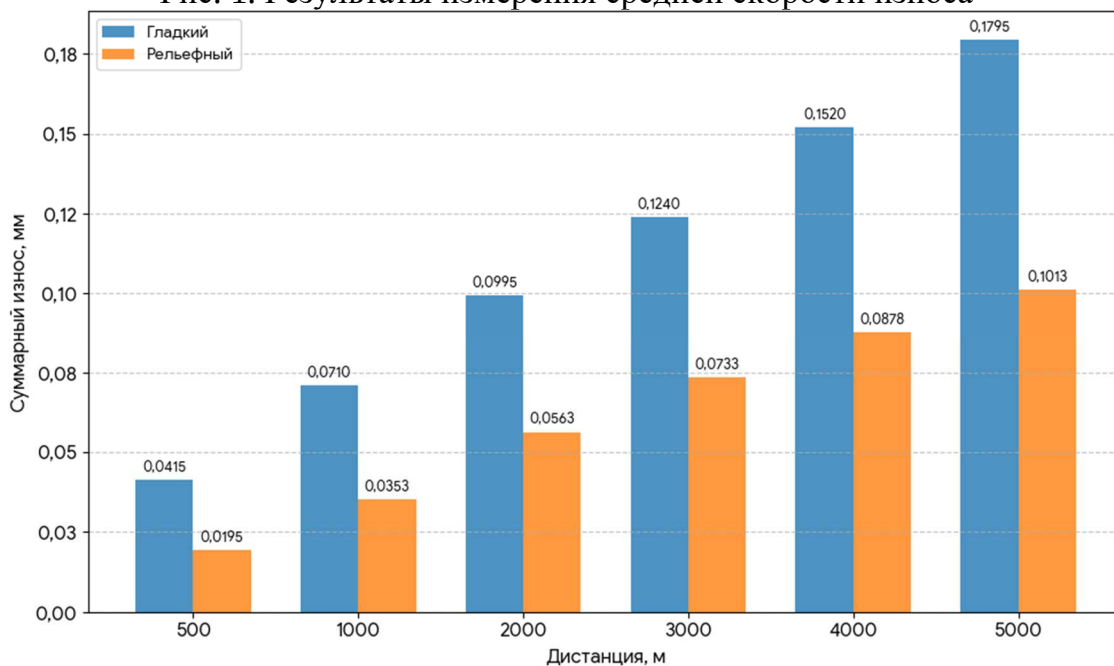


Рис. 2. Результаты определения суммарных значений износа

Рельефный образец на начальном этапе продемонстрировал в два раза меньшее значение износа. Это свидетельствует о том, что микроструктуры способствуют более мягкой приработке поверхностей. К дистанции 4 км скорость износа гладкого образца вновь возрастает. Это может указывать на разрушение масляной пленки и накопление продуктов износа в зоне контакта. Рельефный образец же демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению скорости износа на всем протяжении испытаний. Нанесение специального рельефа позволило снизить суммарный износ на 43,5 % по сравнению с гладкой поверхностью. Гладкий

образец изнашивается почти в 1,8 раза быстрее, чем образец с нанесенным рельефом.

Таким образом, применение микроструктур позволило значительно стабилизировать процесс трения. Данная технология является эффективным методом повышения износостойкости деталей, работающих в условиях интенсивного трения, обеспечивая стабильную работу трибосопряжений машин и продлевая их эксплуатационный ресурс.

Список литературы

1. Dokshanin S.G., Tynchenko V.S., Bukhtoyarov V.V., Bashmur K.A., Kukartsev V.V. Investigation of the tribological properties of ultrafine diamond-graphite powder as an additive to greases // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, p. 012192.
2. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1399, p. 055032.
3. Башмур К.А., Петровский Э.А. Технологические возможности ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей технологических агрегатов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – №11. – С. 99-107.
4. Башмур К.А., Загуляев А.В., Агафонов Е.Д., Небылицын М.В. Потенциал устойчивого развития горной техники с опорами скольжения на основе концепций «зеленой трибологии» // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, №2. – С. 787-797.
5. Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing // Tribology letters. 2004, vol. 17(4), pp. 733-737.
6. Qiu M., Minson B.R., Raeymaekers B. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings // Tribology International. 2013, vol. 67, pp. 278-288.
7. Bashmur K.A., Petrovsky E.A. Equipment for creating cellular relief on frictional surfaces // Russian Engineering Research. 2023, vol. 43(8), pp. 983-986.

Сведения об авторе:

Башмур Кирилл Александрович – аспирант, старший преподаватель.

ФАКТОРЫ ТРЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТУ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКОВЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ

*Дмитриева Л.А., Стариков А.И., Углова С.С.
Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: муфта, трение, пары трения, тепловой расчет, крутящий момент, диски.

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы влияния трения и трибологических процессов на работу дисковых фрикционных муфт. Приведены факторы и их характеристики учитываемые в процессе работы элементов муфты. Тепловой расчет проводится по наиболее теплонагруженному элементу, которым является металлическое контртело. Представлены формулы расчета крутящего момента муфты и времени буксования.

FRICTION FACTORS AFFECTING THE OPERATION OF DISC FRICTION CLUTCH ELEMENTS

*Dmitrieva L.A., Starikov A.I., Uglova S.S.
Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: coupling, friction, friction pairs, thermal calculation, torque, disks.

Abstract. This article examines friction and tribological processes in the operation of disc friction clutches. The factors and their characteristics observed during operation of clutch components are presented. Thermal calculations are performed using the most thermally loaded element, the metal counterface. Formulas for calculating clutch torque and slip time are presented.

Фрикционные муфты предохраняют машины от перегрузок, возникающих в результате внезапного изменения вращающего момента или угловой скорости ведущего либо ведомого элементов. Среди фрикционных муфт дисковые получили наибольшее распространение.

Передача крутящего момента фрикционными муфтами осуществляется за счет сил трения, действующих на поверхностях контакта фрикционных пар.

Расчетный крутящий момент для дисковых муфт

$$\beta T = \frac{\pi}{12} [p] f z (D^3 - d^3), \text{Н} \cdot \text{мм}, \quad (1)$$

где $[p]$ – расчетное допускаемое давление, МПа; f – коэффициент трения; z – число пар поверхностей трения; D, d – наружный и внутренний диаметры поверхностей трения в мм; d_T – диаметр трения в мм.

Вследствие потерь на трение в шлицевых направляющих дисков, осевая сила замыкания, по мере удаления от нажимного диска снижается, что приводит к неравномерному износу фрикционных пар. Поэтому число пар поверхностей трения ограничивают: $z \leq 8$ – для муфт сухого трения. Осевая сила замыкания F_x :

$$F_x = \frac{2\beta T}{d_T f z}, \text{Н}, \quad (2)$$

$$d_T = \frac{2}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2}. \quad (3)$$

Пример дисковой фрикционной муфты приведен на рисунке 1 [1].

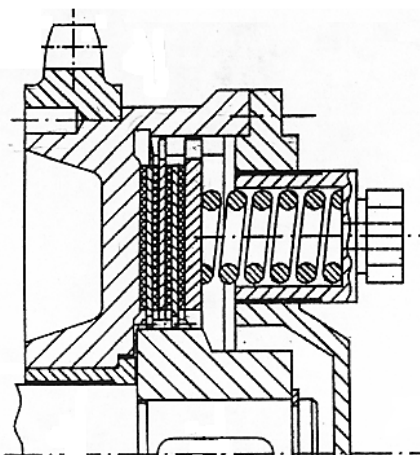


Рис. 1. Дисковая фрикционная муфта

Следует учитывать для муфт выполнения требований, связанных с трибологическим процессом по созданию требуемого момента трения, уравновешивающего передаваемый вращающий момент, в зависимости от следующих факторов: тип контакта; контактная жесткость, зависящая от шероховатости и волнистости поверхностей; продолжительность проскальзывания; условия работы.

Тип контакта характеризуется коэффициентом взаимного перекрытия $K_{вз}$ в муфтах, использующих двустороннюю поверхность фрикционной детали, например, фрикционного диска с наложенными с двух сторон фрикционными накладками или многодисковые муфты. В таких конструкциях коэффициент взаимного перекрытия равен или близок к единице.

Контактная жесткость трибологической системы, зависящая от шероховатости и волнистости поверхностей прижимаемых друг к другу элементов (дисков). Податливости материала при действии силы, особенно металлических дисков, к которым прикрепляется фрикционная накладка. Продолжительность проскальзывания. От нее существенно зависит количество выделяемой в муфте теплоты.

В процессе буксования фрикционной муфты выделяющаяся тепловая энергия вызывает нагрев деталей муфты, что влияет на снижение коэффициента трения и ухудшает условия работы фрикционных пар. Перегрев приводит к разрушению фрикционных материалов и выходу из строя муфты [2].

Тепловой расчет предохранительных фрикционных муфт проводится по наиболее теплонагруженному элементу, которым является металлическое контртело: диск, шлицевой барабан, зубчатый венец, подшипник скольжения, и сводится к определению времени буксования.

$$t_6 = \frac{C m (T_{max} - T_0)}{x \beta T \omega}, \quad (4)$$

где C – массовая теплоемкость, Дж/кг · град; m – масса нагреваемого элемента, кг; T_{max} – максимальная температура нагрева элемента, °C; $T_0 = 15 \dots 20^\circ\text{C}$ – начальная температура деталей; x – коэффициент, учитывающий распределение тепла по нагреваемым элементам; ω – угловая скорость скольжения, с⁻¹.

Для сталей и чугунов $C = 480$ Дж/кг · град.

Масса нагреваемого элемента $m = V\rho$, кг, где V – объем, мм³;

$\rho = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3 \cdot T_{max} = 150 \dots 220^{\circ}\text{C}$ – для муфт сухого трения.

Коэффициент $x = \frac{z'}{z}$, где z – число пар поверхностей трения; z' – число поверхностей трения нагреваемого элемента [3].

Таким образом, условия работы муфт зависят от внешних энергетических полей: тепловых (внешний нагрев трущихся элементов), электрических (прохождение тока через узел трения), электромагнитных (трение в сильном магнитном поле), химических (реакции химических сорбций).

Список литературы

1. Дмитриева Л.А. Детали машин и основы конструирования. Краткий курс. Примеры расчетов. – М.: ООО "Спектр", 2013. – 211 с.
2. Хебда М. Справочник по триботехнике. В 3-х т. Т.3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1992. – 730 с.
3. Лукьянов А.С. Детали машин и основы конструирования. Тетрадь для лекционных и семинарских занятий. Том 1. – М.: Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), 2013. – 115 с.

Сведения об авторах:

Дмитриева Людмила Александровна – старший преподаватель кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»;

Старилов Алексей Игоревич – старший преподаватель кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»;

Углова Софья Сергеевна – студентка.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС: РИМАМИД И ПОЛИАМИД

Чечуга А.О., Маликов А.А.

Тульский государственный университет, Тула

Ключевые слова: зубчатое колесо, римамид, графитонаполненный полиамид, работоспособность, самосмазывание, коэффициент трения.

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения современных полимерных материалов для изготовления зубчатых колёс. Проанализированы физико-механические свойства графитонаполненного полиамида и римамида, влияющие на работоспособность зубчатых передач. Приведены значения шероховатости поверхностей, достигаемых при механической обработке материалов, с учетом стойкости инструмента и производительности. Приведены факторы, определяющие прочность и долговечность поверхностей зубьев колёс, при различных силовых и температурных нагрузках.

USING POLYMERIC MATERIALS FOR MANUFACTURING GEARS: RIMAMIDE AND POLYAMIDE

Chechuga A.O., Malikov A.A.

Tula State University, Tula

Keywords: gear wheel, rimamide, graphite-filled polyamide, performance, self-lubrication, friction coefficient.

Abstract. This paper examines the potential use of modern polymeric materials for gear manufacturing. The physical and mechanical properties of graphite-filled polyamide and rimamide, which influence the performance of gears, are analyzed. Surface roughness values achieved during machining are presented, taking into account tool life and productivity. Factors determining the strength and durability of gear tooth surfaces under various force and temperature loads are presented.

Использование полимерных материалов для изготовления зубчатых колёс, применяемых в редукторах, ставит ряд конструкторско-технологических задач, таких как: обеспечение работоспособности зубчатых передач при требуемом уровне надежности; обрабатываемость материала и требования к материальному обеспечению для изготовления изделий; возможность повышения эксплуатационных характеристик.

Основными критериями работоспособности зубчатых передач являются показатели, связанные с прочностными характеристиками поверхностей и элементов передачи, их износостойкостью и стойкостью к заеданиям при работе.

Контактное напряжение на поверхностях зубьев колёс, значение которого обусловлено геометрией передачи и рабочими характеристиками редуктора, не должно превышать допустимых значений, установленных при проектировании.

Изгибная прочность зубьев характеризует возможность зубчатого колеса сохранять целостность и работоспособность передачи. Основным фактором, определяющим стойкость зубьев на изгиб по максимальной нагрузке, являются физико-механические характеристики материала колеса.

Материал зубчатого колеса должен обеспечивать износостойкость, зависящую от физико-механических свойств контактных поверхностей, точности изготовления и установки элементов передачи, а также обеспечения оптимального температурного диапазона при работе.

Наиболее часто рассматриваемым материалом для изготовления зубчатых колёс является графитонаполненный полиамид, физико-механические свойства которого способны обеспечивать работоспособность редукторов, а также не требуют специализированного производственного оборудования для изготовления изделий [1]. Однако современная отечественная промышленность способна предложить новые полимерные конструкционные материалы, способные стать альтернативой для цветных сплавов, при изготовлении зубчатых колёс. Одним из таких является римаид, обладающий высокими прочностными и антифрикционными свойствами, обеспечивающими долговечность и эффективность работы зубчатого зацепления (табл. 1).

Табл. 1. Физико-механические характеристики римаида

Параметр	Римаид-200-У
Плотность, кг/м ³	1135-1145
Температура плавления, °С	218-223
Модуль упругости при растяжении, МПа	2200-2800
Коэффициент трения по стали без смазки	0,2-0,3
Коэффициент трение по стали со смазкой	0,04-0,08
Твёрдость по Шору D	75-80

Большая упругость полимерных материалов, в сравнении с цветными сплавами, обеспечивает стойкость зубьев колёс к ударным и динамичным нагрузкам, сохраняя геометрию контактных поверхностей. В сочетании со способностью к пластической деформации, эти свойства обеспечивают высокую сопротивляемость передачи к заеданиям во время работы редуктора, предотвращая появление дефектов и наклепов на поверхностях зубьев колёс и червяка [2].

Однако содержание графита в структуре полимера приводит к снижению прочности изделий при растяжениях, ударных нагрузках и высоком давлении, в результате чего на зубьях колёс могут появляться сколы и поверхностные выкрашивания [3]. Также, графитовый наполнитель делает невозможным сохранение работоспособности зубчатых колёс при температурах выше 100-120°С. При превышении рабочих температур редуктора в 90°С и незначительном перегреве происходит деградация прочностных свойств материала, что приводит к образованию дефектов на поверхностях зубьев и поломкам колёс.

В сравнении с графитонаполненным полиамидом, римаид обладает более высокой обрабатываемостью, что позволяет достигать качества поверхности R_a 0,8 при использовании стандартного обрабатывающего оборудования и инструментов. При этом стойкость инструмента при обработке данного полимера соответствует, или превышает показатели обработки бронзовых сплавов. Производительность обработки римаида превосходит полиамид, поскольку для обеспечения шероховатости поверхности R_a 0,8 и R_a 1,6 верхние значения допустимых скоростей и подач выше на 25-30%.

Оба полимера обладают свойством самосмазывания, за счет графита у полиамида и эфиров с длинным строением у римамида, которое позволяет снижать трение в контактных поверхностях зубьев колёс, а также дает возможность поддерживать целостность поверхностей и работоспособность передачи при низком, или недостаточном уровне смазывающих веществ и наличии абразивных частиц.

Также, стоит отметить, что коэффициент трения по стали со смазкой римамида выше, чем у графитонаполненного полиамида, что повышает эффективность работы узлов трения и снижает тепловыделение [4].

Применение зубчатых колёс из римамида позволяет снижать уровень вибраций и шума при работе редуктора, что оказывает положительное влияние на его долговечность.

Таким образом, римамид обладает оптимальными физико-механическими и технологическими свойствами, обеспечивающими возможность его применения в качестве альтернативы цветным сплавам для изготовления различных зубчатых колёс, применяемых в редукторах.

Список литературы

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии. – М.: Изд-во Интеллект, 2009. – 352 с.
2. Старжинский В.Е., Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В., Кудинов А.Т. Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. Расчет и конструирование. Справочное и научное издание. – СПб.-Гомель: ИММС НАН Б, 1998. – 538 с.
3. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / Под ред. Бабаевского П.Г. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
4. Чечуга А.О. Увеличение КПД зубчатых передач за счет использования современных полимерных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 9. – С. 38-40.

Сведения об авторах:

Чечуга Антон Олегович – аспирант;

Маликов Андрей Андреевич – д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения.

ВЛИЯНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТНУЮ ИНДУКЦИЮ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Губанов О.М.

ООО НИЦ «Алиум», Москва

Ключевые слова: анизотропная электротехническая сталь, напряжения растяжения, напряженность магнитного поля, магнитная индукция, слабые поля.

Аннотация. Исследовано влияние растягивающих напряжений на магнитную индукцию в анизотропной электротехнической стали. Установлено, что приложение внешних растягивающих напряжений вдоль направления легкого намагничивания в анизотропной электротехнической стали приводит к росту магнитной индукции в средних и сильных полях. В слабых магнитных полях магнитная индукция снижается. Выявлен интервал напряженности приложенного магнитного поля, в котором происходит изменение характера зависимости индукции от величины приложенных напряжений. На основании полученных данных сделаны выводы о возможности прогнозировать поведение материала для случаев принудительного формирования растягивающих напряжений при изготовлении трансформаторов, включая слаботочные и измерительные.

THE INFLUENCE OF TENSILE STRESSES ON THE MAGNETIC INDUCTION OF ANISOTROPIC ELECTRICAL STEEL

Gubanov O.M.

LLC Research Center "Alium", Moscow

Keywords: anisotropic electrical steel, tensile stress, magnetic field strength, magnetic induction, weak fields.

Abstract. The influence of tensile stresses on magnetic induction in anisotropic electrical steel was investigated. It has been established that applying external tensile stresses along the easy magnetization direction in anisotropic electrical steel leads to an increase in magnetic induction in medium and strong magnetic fields. In weak magnetic fields, magnetic induction decreases. A range of applied magnetic field strengths was identified within which the nature of the induction dependence on the applied stress changes. Based on the data obtained, conclusions were drawn regarding the possibility of predicting material behavior in cases of forced tensile stresses during transformer manufacturing, including low-current and instrument transformers.

Исследования, проведенные различными коллективами, свидетельствуют о влиянии приложенного внешнего напряжения растяжения на уровень магнитной индукции анизотропной электротехнической стали [1, 2]. Однако, данное влияние имеет зависимость от напряженности приложенного внешнего магнитного поля [3]. Для уточнения характера изменения магнитной индукции под действием внешних напряжений растяжения была исследована сталь промышленного производства марки N27P-100.

Первые тестовые измерения магнитной индукции при растяжении показали, что наибольшие изменения индукции происходят в магнитном поле напряженностью 100-200 А/м, где для B_{100} с увеличением растягивающих напряжений магнитная индукция снижается, а для B_{200} , в тех же условиях, индукция увеличивается. Исходя из этого для исследований были взяты значения

напряженности магнитного поля в диапазоне от 80 до 200 А/м с шагом 10 А/м, а в диапазоне от 200 до 800 А/м – с шагом 100 А/м.

Ранее проведенные исследования показали, что с практической точки зрения наиболее интересно применение растягивающих напряжений до 80 МПа, поэтому для оценки изменения магнитной индукции в качестве максимальных были использованы именно эти напряжения растяжения. После достижения $\sigma_p = 74$ МПа, образцы разгружали и производили повторное измерение магнитной индукции без напряжения, что позволило оценить обратимость получаемого эффекта.

Анализ полученных данных показал, что для образцов во всех исследованных диапазонах напряженности поля, магнитная индукция после снятия приложенных растягивающих напряжений возвращается к первоначальным значениям. Данное поведение характерно для стали всех рассмотренных производителей. Таким образом, гистерезиса магнитной индукции при приложении растягивающих напряжений в области упругой деформации для анизотропной электротехнической стали не обнаружено.

Магнитная индукция в слабых полях B_{80} монотонно снижается с увеличением приложенных растягивающих напряжений, абсолютное снижение индукции составило 0,136 Тл. (рис. 1).

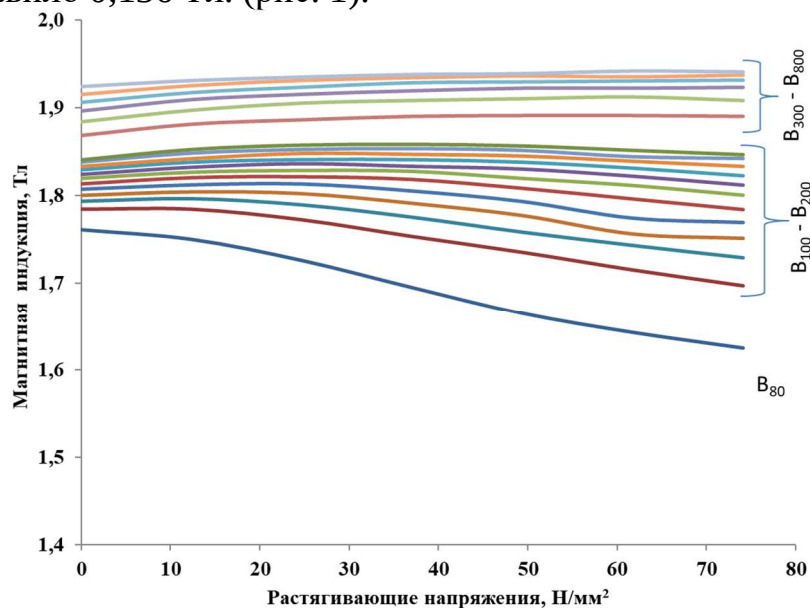


Рис. 1. Изменение магнитной индукции стали марки N27P-100 при различной напряженности поля с увеличением растягивающих напряжений

С увеличением напряженности магнитного поля до 100 А/м отмечается тенденция к росту магнитной индукции при наложении растягивающих напряжений.

С ростом напряженности магнитного поля в диапазоне со 110 и до 200 А/м и увеличением прилагаемых напряжений растяжения магнитная индукция B сначала возрастает относительно исходного состояния, а затем снижается. Также с ростом напряженности магнитного поля значения максимальной получаемой магнитной индукции смещаются в область больших растягивающих напряжений. Отмечено, что с достижением напряженности магнитного поля 150 А/м магнитная индукция с приложением растягивающих напряжений вплоть до значений $\sigma_p = 74$ МПа уже не опускается ниже исходных значений (при $\sigma_p = 0$ МПа).

В целом можно отметить, что с ростом внешнего растягивающего напряжения наблюдается увеличение разброса получаемых значений магнитной индукции во всем диапазоне измеряемых значений от B_{100} до B_{200} . Визуально это выражается в расхождении линий характеризующих магнитную индукцию в указанном диапазоне значений. Данные результаты позволяют более точно прогнозировать поведение материала при изготовлении слаботочных и измерительных трансформаторов для случаев принудительного формирования растягивающих напряжений в готовых изделиях или при изменении технологии производства стали с формированием повышенного уровня продольных растягивающих напряжений на стадии производства.

При напряженности магнитного поля 300 А/м увеличение растягивающих напряжений до 74 МПа практически не приводит к падению магнитной индукции для стали N27P-100. Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля обеспечивает рост магнитной индукции во всем исследованном диапазоне приложенных растягивающих напряжений. Также можно отметить, что увеличение $\sigma_p \geq 50$ МПа уже не вызывает заметного изменения магнитной индукции. Полученные значения можно считать технологическим потенциалом по магнитной индукции для данной стали.

Кривые на рисунке 1 для магнитных полей 300 и 400 А/м с ростом напряжений идут почти параллельно, а с ростом напряженности поля кривые имеют тенденцию к сужению относительно первоначального разброса значений, полученного в исходном состоянии.

Таким образом, выявлен интервал напряженности приложенного магнитного поля, в котором происходит изменение характера зависимости индукции от величины приложенного напряжения растяжения.

Список литературы

1. Драгошанский Ю.Н., Каренина Л.С., Соловей В.Д., Пужевич Р.Б. Возникновение напряжений в электротехнической анизотропной стали в процессе ее лазерной обработки // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 112, №2. – С.140-145.
2. Соловьев А.А., Сочугов Н.С., Оскомов К.В. Влияние остаточных внутренних напряжений в покрытиях TiN на удельные потери в анизотропной электротехнической стали // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 109, №2. – С. 120-129.
3. Губанов О.М., Колмаков А.Г., Шкатов М.И. Повышение магнитных свойств анизотропной электротехнической стали под воздействием внешних растягивающих напряжений // Деформация и разрушение материалов. – 2026. – №2. – С. 18-29.

Сведения об авторе:

Губанов Олег Михайлович – к.т.н., директор по науке.

ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЦАРАПАНИЕМ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ АЛМАЗНОЙ ПЛАСТИНОЙ

Колибасов В.А., Новиков В.А., Акопян А.А.

Самарский государственный технический университет, Самара

Ключевые слова: твёрдость, вдавливание, твердомер, резание породы, индентор, PDC резец.

Аннотация. В статье представлены результаты разработки экспериментального прибора и методики измерения твёрдости материалов. Предложена оригинальная конструкция установки, реализующая метод вдавливания с использованием в качестве индентора PDC резец. Описаны конструкции разработанных твердомеров, особенности проведения испытаний и способы обработки полученных данных. Проведён анализ влияния различных параметров на результаты измерений, а также предложена таблица твердости пород при царапании поликристаллической алмазной пластиной.

ASSESSMENT OF HARDNESS OF MATERIALS BY SCRATCHING WITH A POLYCRYSTALLINE DIAMOND PLATE

Kolibasov V.A., Novikov V.A., Akopyan A.A.

Samara State Technical University, Samara

Keywords: hardness, indentation, hardness tester, rock cutting, indenter, PDC cutter.

Abstract. The article presents the results of the development of an experimental device and a method for measuring the hardness of materials. An original installation design is proposed that implements the indentation method using a PDC cutter as an indenter. The designs of the developed hardness meters, the specifics of testing and methods of processing the data obtained are described. The influence of various parameters on the measurement results is analyzed, and a table of rock hardness when scratched with a polycrystalline diamond plate is proposed.

Вопросы, связанные с изучением свойств материалов, играют важную роль при решении прикладных инженерных задач. Учёные до сих пор продолжают искать наиболее надёжные и точные методы её измерения, совершенствуя приборы и подходы к испытаниям с учётом современных требований к точности и воспроизводимости результатов [1-6]. Исследования в области материаловедения позволяют глубже понять поведение материалов при различных нагрузках и условиях эксплуатации. В различных отраслях промышленности широко применяются традиционные методы оценки твёрдости, такие как испытания по Бринеллю, Виккерсу и Роквеллу, основанные на вдавливании индентора в поверхность материала, но у всех трёх методов имеются свои недостатки.

– Метод Бринелля: большой след от отпечатка, что ограничивает применение для тонких и малых деталей, не подходит для очень твёрдых материалов (шар может деформироваться), ограниченная точность при оценке неоднородных поверхностей, зависимость от оператора и условий испытания (вибрации, подготовка поверхности).

– Метод Роквелла: невысокая точность при малых нагрузках, ограничения по толщине образца – слишком тонкие материалы могут давать ложные результаты, чувствительность к поверхностным дефектам.

– Метод Виккерса: сложность измерения диагоналей отпечатка, особенно при малых размерах – требует оптической системы высокой точности, трудоёмкость и чувствительность к подготовке поверхности, медленный процесс по сравнению с Роквеллом, высокие требования к стабильности нагрузки и качеству оборудования.

Однако развитие современных технологий требует более точных и адаптивных методик, позволяющих учитывать сложные условия эксплуатации материалов.

Использование в качестве алмазного индентора пластины PDC, монолитно спеченной с твердосплавной подложкой, имеет множество преимуществ помимо того, что она натурно имитирует контакт резца с забоем. Такой индентор доступнее, проще и дешевле стандартной пирамиды Виккерса; отсутствие острой вершины и высокая износостойкость придают ему повышенную надежность. А в случае изнашивания рабочей кромки можно восстановить работоспособность индентора небольшим поворотом вокруг его оси, подставляя под образец новый, неизношенный участок фаски, что обеспечивает долговечность индентора. Кроме того, для оценки твердости можно использовать и отработавшие в эксплуатации резцы с сохранившимися участками режущей поверхности.

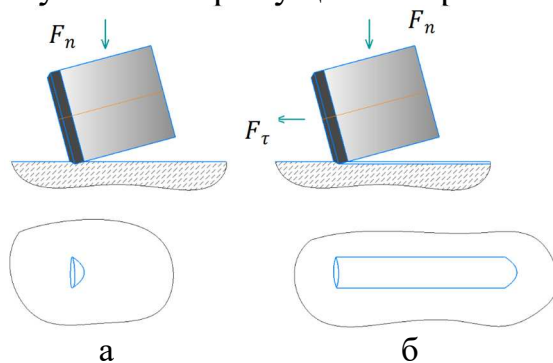


Рис. 1. Схема уточненной оценки твердости материалов методом вдавливания поликристаллической алмазной пластины (а) и методом царапания поверхности PDC резцом (б)

В случае оценки твердости методом вдавливания к полученному индентору необходимо приложить только осевую нагрузку F_n , а в случае царапания дополнительно создать усилие резания F_τ для сообщения резцу тангенциального перемещения режущей кромкой вперед (рис. 1). Нормальная нагрузка задается набором грузов, и ее точная оценка не представляет проблемы. Сложность заключается в определении площади, на которую приходится эта нагрузка. В отличие от стандартных инденторов правильной формы (шар, конус, пирамида) контакт поликристаллической алмазной пластины с образцом представляет собой сложную пространственную фигуру. Так, при вдавливании резца в породу эта площадь в общем случае формируется внедренным сегментом передней поверхности резца, частью конической поверхности фаски и частью боковой цилиндрической поверхности резца. При царапании породы режущей кромкой PDC резца эта площадь перераспределяется вперед на режущие сегменты конической фаски и передней поверхностью алмазной пластины. Такое перераспределение способствует дополнительному заглублению резца в породу, поэтому при одинаковой силе F_n ширина отпечатка при вдавливании будет меньше

ширины оставляемой индентором борозды при царапании (резании). Аналогичную картину можно видеть при оценке микротвердости по Виккерсу методом вдавливания и царапания поверхности испытываемого материала четырехгранной алмазной пирамидой [7, 8].

Предложенная методика может быть востребована в исследованиях и промышленности, где необходимы более точные и надёжные способы оценки твёрдости материалов, учитывающие реальные эксплуатационные нагрузки и процессы износа.

Сравнивая два метода, в нашем случае предпочтение следует отдать оценке твердости пород царапанием. При этом после нагружения резца производят перемещение резца относительно породы режущей плоскостью вперед или перемещение образца относительно неподвижного в тангенциальном направлении резца в направлении – навстречу рабочей кромке РДС резца. Этот метод позволяет не только адекватно воспроизвести в лабораторных условиях элементарный акт резания породы, но и оценить по ширине борозды изменение твердости на различных участках шлифа, если материал имеет сильную неоднородность.

Следует отметить, что физический механизм резания горных пород существенно отличается от резания металлических материалов. При резании металлов ведущая роль в образовании стружки отводится пластическим деформациям, в результате которой твердость наклепанной стружки превышает основной материал до 1,5 раз. Механизм образования металлической стружки складывается из трех этапов. Вначале у вершины режущей кромки материал упруго-пластически сминается и упрочняется, затем образовавшийся наклепанный фрагмент смещается режущей кромкой по плоскости сдвига в направлении резания, в заключение стружка деформируется, скользя по режущей кромке и одновременно вновь происходит смятие материала поверхностного слоя при вдавливании в него резца.

При резании породы вначале происходит поверхностное вдавливание резца в породу (аналогично тому, как вдавливается индентор в материал при определении твердости) за счет его тонкого выкрашивания. Вдавливание происходит до достижения контактного давления, равного по величине твердости материала. При этом порода довольно точно приобретает форму вдавливаемой поверхности жесткого индентора. По мере увеличения давления на резец увеличивается площадь соприкосновения вершины резца с породой и растут объемные напряжения в породе на некотором расстоянии перед режущей кромкой. По достижении этих напряжений предела прочности происходит скалывание фрагмента породы перед резцом. Далее разрушенные частицы породы удаляются, резец снова врезается в образовавшуюся поверхность и процесс повторяется вновь. Поскольку контактные напряжения вдавливания существенно превышают напряжения скалывания, то резание породы неизбежно связано с заметными колебаниями крутящего момента. Фаза врезания дает рост крутящего момента, фаза скалывания – спад крутящего момента при бурении. Таким образом, резание породы всегда сопряжено с крутильными (торсионными) колебаниями).

Для экспериментальной оценки твердости методом вдавливания и царапания породы поликристаллической алмазной пластиной были разработаны и изготовлены два твердомера (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Твердомеры для оценки твердости материалов методом вдавливания поликристаллической алмазной пластины (а) и царапанием поверхности PDC резцом (б)

Твердомер для оценки твердости методом вдавливания алмазной пластины (рис. 2, а) состоит из массивного основания с запрессованными в него вертикальной стойкой и столиком. На столик устанавливают образец материала с подготовленным шлифом. На стойке закреплены: кронштейн для микрометрического индикатора часового типа с ценой деления 1 мкм; рычажная втулка с шарниром для крепления рычага; кронштейн, играющий роль направляющей для штока. На стойке имеется винтовая канавка и регулировочная гайка для установки требуемой высоты установки кронштейна со штоком. В центре верхнего торца шток соприкасается с измерительным щупом микрометра. К нижней части штока прикреплена оправка с PDC резцом. Оправка фиксирует резец под углом 15° к горизонтальной поверхности шлифа.

Твердомер для оценки твердости методом царапания материала поликристаллической алмазной пластиной (рис. 2, б) состоит из основания, на котором закреплены тиски с модифицированной рукояткой для удобства ее непрерывного вращения. На основании зафиксирована вертикальная стойка, на которой находится кронштейн, имеющий возможность перемещаться вдоль стойки и фиксироваться на ней винтом в требуемом положении. На кронштейне имеется цилиндрическая направляющая, в которую вставлен шток, имеющий возможность свободно перемещаться по вертикали вдоль направляющей. Верхняя часть штока содержит упор для установки грузов и рукоятку для приподнимания штока. К нижней части штока прикреплена оправка с отверстием для фиксации PDC резца под углом 15° к горизонту. Кронштейн со штоком можно сделать поворотным и дополнительно к нему установить кронштейн с USB микроскопом. Тогда появится возможность обмера ширины царапины или длины лунки на одном приборе.

Методика оценки твердости выполняется следующим образом.

Породу приклеивают (например, холодной сваркой) к подложке из ферромагнитного материала (рис. 2 а, б) и, зафиксировав подложку на магнитном столе, производят шлифование поверхности образца породы. Можно для изготовления шлифа использовать алмазный диск (рис. 3). PDC резец диаметром 13,3 мм вставляют в специальную оправку в нижней части штока, удерживающую

резец под заданным углом к породе 15. Кронштейн со штоком опускают на 3...5 мм ниже уровня, соответствующего касанию нижней кромки поликристаллической алмазной пластины со шлифованной поверхностью породы. Это обеспечит возможность внедрения резца в породу после приложения осевой нагрузки. Выставляют показания микрометрического индикатора часового типа (с ценой деления 1 мкм) на ноль. Затем с помощью рычага производят нагружение резца нормальной нагрузкой 30 кгс (нагрузка выбирается исходя из условия недопущения объемного раскалывания образца). Фиксируют глубину внедрения резца в породу. Разгружают резец. Процедуру повторяют до достижения требуемой точности результата.

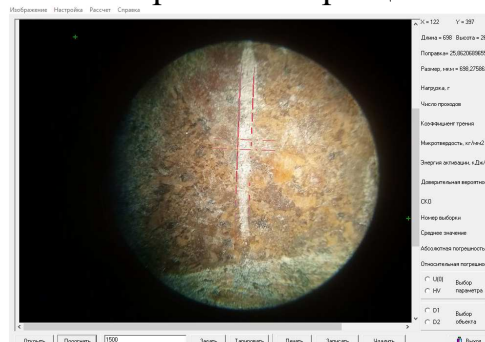


Рис. 3. Изготовление шлифа алмазным диском

Для апробации нового метода оценки твердости царапанием провели оценку твердости образцов, относящихся к категории крепких пород – гранита и кварцитов (6-7 единиц по Моосу), бурение которых вызывает быстрый износ резцов.



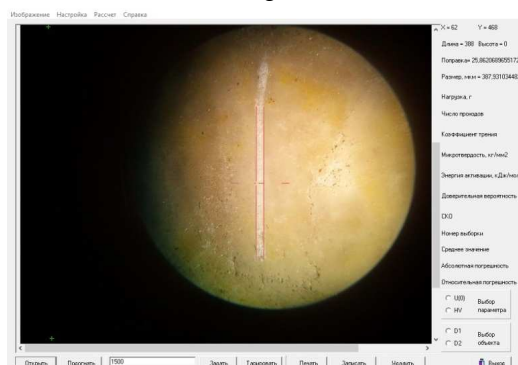
а



б



в



г

Рис. 4. Общий вид камня со шлифом (слева) и результаты измерения ширины борозды (справа): а, б – гранит; в, г – кварцит

Таблица 1 содержит экспериментальные данные, полученные при оценке твёрдости минералов методом царапания с постепенным увеличением глубины внедрения индентора в поверхность исследуемого материала. Для каждой глубины фиксировались параметры образовавшейся борозды: её ширина, площадь контакта, а также рассчитывалась твёрдость по критерию HPDC.

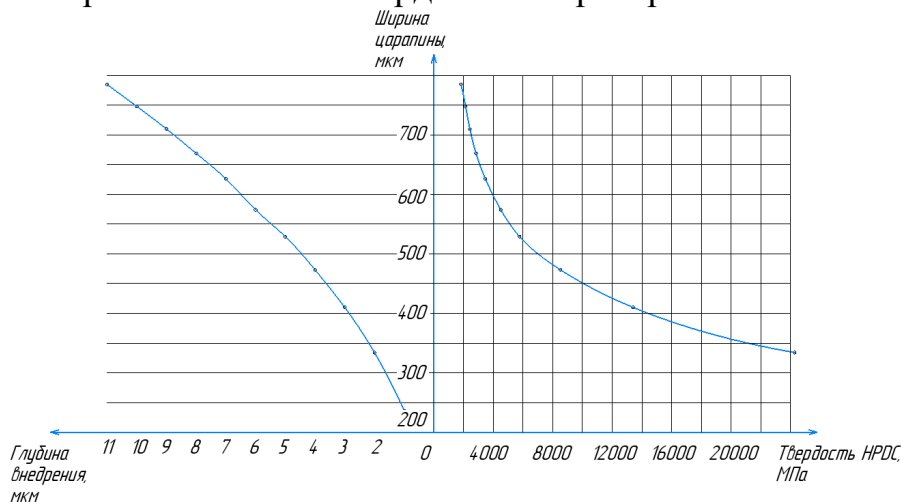


Рис. 5. Диаграмма, перевода ширины царапин в глубину резания и единицы твердости HPDC

Табл. 1. Расчет твердости пород при царапании поликристаллической алмазной пластиной при осевой нагрузке 20Н

Глубина внедрения h , мкм	Ширина борозды w , мкм	Площадь контакта S , мм ²	Твердость HPDC, МПа
1	236,457	0,000274619	72828,17285
2	334,422	0,000823919	24274,23084
3	409,608	0,001491363	13410,55129
4	473,005	0,002346191	8524,45517
5	528,8696	0,003468563	5766,076614
6	579,3846	0,004342119	4606,046352
7	625,8467	0,005768488	3467,113106
8	669,101	0,007057501	2833,864281
9	709,73	0,008259197	2421,542918
10	748,173	0,009381566	2131,840249
11	784,74	0,010911059	183,3003501

Глубина внедрения индентора (h) возрастает от 1 до 11 мкм, что соответствует постепенному увеличению усилия при царапании. Ширина борозды (w) также возрастает с увеличением глубины, что указывает на рост пластической деформации материала. Площадь контакта (S) рассчитывалась на основе геометрических параметров царапины. Её увеличение свидетельствует о более широком взаимодействии между минералом и инструментом при углублении индентора.

Твёрдость по HPDC демонстрирует обратную зависимость от глубины: при увеличении глубины значения твёрдости значительно уменьшаются. Это может быть связано с:

- постепенным переходом от поверхностной твёрдости к объёмной;
- проявлением эффекта масштабирования (size effect), когда при малых глубинах материал демонстрирует более высокую твёрдость;
- возможной нестабильностью геометрии царапины при глубоком внедрении.

В рамках работы создан лабораторный образец прибора для измерения твёрдости материалов. Разработана методика измерений, обеспечивающая воспроизводимость и точность. Полученные результаты подтверждают применимость метода для дальнейших измерений твердости для минералов.

В дальнейшем планируется усовершенствование прибора и расширение диапазона материалов для измерений. Разработка приборов и методов оценки твёрдости остаётся актуальной задачей. Совершенствование существующих подходов должно быть направлено на повышение точности, удобства и универсальности.

Список литературы

1. Tantardini C., Zakaryan H.A., Han Z.-K., Altalhi T., Levchenko S.V., Kvashnin A.G., Yakobson B.I. Material Hardness Descriptor Derived by Symbolic Regression // arXiv preprint. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2304.12880>.
2. Zhao J., Liu P., Wang J., Li J., Niu H., Sun Y., Li J., Chen X.-Q. Hardness and Fracture Toughness Models by Symbolic Regression // arXiv preprint. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.19991>.
3. Karimi K., Salmenjoki H., Mulewska K., Kurpaska L., Kosińska A., Alava M., Papanikolaou S. Prediction of Steel Nanohardness by Using Graph Neural Networks on Surface Polycrystallinity Maps // arXiv preprint. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.10948>.
4. Avadanii D., Kareer A., Hansen L., Wilkinson A. Calibration and Data Analysis Routines for Nanoindentation with Spherical Tips // arXiv preprint. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2302.02430>.
5. Жукова Н.Л., Михеев В.А. Методы определения твёрдости в микромасштабе // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №3. – С. 55-60. – doi.org/10.7868/S0033833920030055.
6. Козлов А.А., Герасимов С.А. Контактные методы измерения твёрдости в условиях малых нагрузок // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, №11. – С. 1647-1652. – doi.org/10.21883/JTF.2019.11.48189.217.
7. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвёрдости царапанием алмазными наконечниками. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 30 с.
8. ГОСТ 2999-75. Метод измерения твёрдости по Виккерсу. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 31 с.

Сведения об авторах:

Колибасов Владимир Александрович – ассистент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств»;

Новиков Владислав Александрович – к.т.н., доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»;

Акопян Анжела Артаковна – ассистент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

УДК 621.791.92; 621.785.545

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА СВАРНЫХ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 09Г2С

Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Федоров С.К., Орлова Е.А.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: насосно-компрессорная труба, сварка, электромеханическая поверхностная закалка, технология, структура поверхностного слоя, твердость.

Аннотация. Выполнены металлографические исследования структуры и изменения микротвердости поверхностного слоя прямошовных сварных насосно-компрессорных труб из стали 09Г2С после электромеханической поверхностной закалки, которые определяют пути повышения ресурса, формирования уникальных свойств поверхностного слоя деталей, увеличения эффективности работы нефтяных компаний, создания конкурентоспособной продукции.

ELECTROMECHANICAL SURFACE HARDENING OF WELDED TUBING MADE OF 09G2S STEEL

Fedorova L.V., Ivanova Yu.S., Fedorov S.K., Orlova E.A.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: tubing, welding, electromechanical surface hardening, technology, surface layer structure, hardness.

Abstract. Metallographic studies of the structure and changes in the microhardness of the surface layer of straight-seam welded tubing made of steel 09G2C after electromechanical surface hardening have been performed, which determine ways to increase the resource, form unique properties of the surface layer of parts, increase the efficiency of oil companies, and create competitive products.

Введение. Сталь 09Г2С находит широкое применение в машиностроении, строительстве, нефтехимии, добыче и транспортировке нефти благодаря хорошей свариваемости и высоким физико-механическим свойствам [1-3]. Основным критерием при производстве сварных насосно-компрессорных труб (НКТ) является использование специальных технологий и сплавов, способных выдерживать высокие рабочие давления до 250 атм и эксплуатацию при низких температурах (до минус 70) за счет применения нового класса высоконадежных микролегированных сталей с феррито-бейнитной структурой. На современных трубозлектросварочных станах получают прямошовные сварные НКТ с высокой прочностью шва из сталей 22ГЮ, 25ГЮ, 09Г2С, 15ХГМФ.

Цель работы – исследовать влияние электромеханической поверхностной закалки (ЭМПЗ) на формирование структуры и изменение микротвердости поверхностного слоя низколегированной конструкционной стали 09Г2С.

Методы и материалы; результаты. Исследования выполнены на патрубках сварных НКТ 73 из стали 09Г2С. ЭМПЗ по наружному диаметру выполнена на модернизированном токарно-винторезном станке 16К20 оснащенном оборудованием для электромеханической обработки. Металлографические исследования структуры и микротвердости поверхностного слоя выполнены на

современном оборудовании ведущих мировых фирм. Для подтверждения марки материала образцов произведен анализ химического состава при помощи лазерного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Автоматическая резка образцов для исследований выполнена на отрезном станке Discotom-100 абразивным диском Struers 60A24 при непрерывной подаче в зону резания СОЖ (эмульсия). Изготовление металлографических шлифов выполнено на установке SimpliMet 1000 (Buehler) при горячей и холодной заливке. Шлифование и полирование образцов выполняли на шлифовально-полировальном станке Buehler AutoMet 250. Металлографическое исследование структуры поверхностного слоя образцов выполняли на микроскопе OLYMPUS GX53 при увеличении 100, 200, 500 и 1000. Измерения твердости образцов до и после обработки проводили на микротвердомере EMCOTEST DuraScan при вдавливании четырехгранной алмазной пирамиды с углом между гранями 136° и нагрузкой на индентор 100 грамм. Травление шлифов выполнено в трехпроцентном растворе азотной в этиловом спирте (C_2H_5OH).

Анализируя причины низкой износостойкости резьбовых соединений сварных НКТ с муфтами следует отметить следующие моменты:

- низкая износостойкость витков резьбы НКТ в связи с недостаточной твердостью стали 09Г2С при изготовлении и восстановлении деталей;
- методическое несоответствие при выборе способов изготовления резьбы, когда резьба муфт имеет более высокую твердость по сравнению с резьбой НКТ.

Действующие нормативные материалы по изготовлению НКТ не предусматривают упрочнения резьбы, а ее выходной параметр по твердости находится на уровне HV 2100...2400 МПа с перлитно-ферритной структурой поверхностного слоя резьбы и основного тела трубы.

При ЭМПЗ наибольшее влияние на формирование структуры и, как следствие, свойств поверхностного слоя деталей оказывает температура в зоне контакта «инструмент – поверхность», обусловленная электрическим током в результате преобразования электрической энергии в тепловую. Поэтому наиболее приоритетным при ЭМПЗ следует признать повышение износостойкости и прочности деталей машин [4, 5]. Электромеханическая обработка позволяет формировать в локальном микрообъеме обрабатываемого материала упрочненный «белый слой», представляющий собой мартенситную структуру, обладающую высокой прочностью и износостойкостью. Прохождение электрического тока через зону контакта рабочего инструмента и обрабатываемой поверхности способствует высокоскоростному нагреву при одновременном пластическом деформировании локального микрообъема, с последующим быстрым отводом тепла во внутренний объем металла.

Результаты металлографических исследований показали высокую эффективность данного метода поверхностного упрочнения. Применение ЭМПЗ с силой тока 1300 А и 1500 А привело к значительному увеличению микротвердости поверхностного слоя образцов – с исходных HV 1400-1800 до HV 4900 МПа. Глубина закаленного слоя составила до 0,7 мм при силе тока 1300 А и до 1,3 мм для силы тока 1500 А. Металлографическим анализом выявлена мелкозернистая однородная структура в зоне обработки, что свидетельствует о качественном упрочнении без оплавления материала. Последующий отпуск в диапазоне

температур 100-250°C способствовал снятию остаточных напряжений и стабилизации структуры, при сохранении высокой твердости до HV 3900 МПа.

Заключение. Таким образом, электромеханическая поверхностная закалка представляет собой перспективный метод для упрочнения тонкостенных длинномерных деталей из малоуглеродистых сталей, таких как трубы из стали 09Г2С, позволяющая повысить их эксплуатационные свойства.

Список источников

1. Смирнов А.И., Перцев А.С., Панов Д.О., Симонов Ю.Н. Механо-термическая обработка конструкционной низкоуглеродистой стали 09Г2С // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – №2. – С. 150-151.
2. Насибуллина О.А., Абдуллин Т.Э. Исследование воздействия сероводородсодержащего газоконденсата на сталь 09Г2С // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Вып. 2(108). – С. 121-130.
3. Шайнурова Р.Ф., Гиндуллина К.Д., Насибуллина О.А., Гайсин Э.Ш. Влияние способа термической обработки стали 09Г2С на ее коррозионную стойкость // Пожарная и промышленная безопасность. – 2019. – №2(118). – С. 161-169. – DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-2-161-169.
4. Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Yu. S., Voronina M.V. Increase of wear resistance of the drill pipe thread connection by electromechanical surface hardening // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12, no. 18, pp. 7485-7489.
5. Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С. Повышение долговечности труб бурильных стальных универсальных финишной электромеханической поверхностной закалкой // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103, №11. – С. 948-953. – DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-11-948-953.

Сведения об авторах:

Федорова Лилия Владимировна – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Материаловедение»;

Иванова Юлия Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения»;

Федоров Сергей Константинович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»;

Орлова Елизавета Андреевна – студент.

ПРИМЕНЕНИЕ БЫВШИХ В УПОТРЕБЛЕНИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С АДГЕЗИЕЙ ГРУНТОВ К ОПОРНЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ ШАГАЮЩИХ ЭКСКАВАТОРОВ

Демченко И.И., Попов Н.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: шагающие экскаваторы, адгезия, опорные поверхности, сила отрыва материалов, резинотехнические изделия, вскрышные породы.

Аннотация. В данной работе рассмотрен вариант борьбы с прилипанием и примерзанием горной массы на опорные поверхности шагающего экскаватора с применением резинотехнических изделий. Данный материал выбран на основе исследований проведенных в институте Цветных металлов Сибирского федерального университета, которые подтвердили низкие адгезионные свойства резины. Проведена опытно-промышленная проверка применения бывших в употреблении резинотехнических изделий для предотвращения или уменьшения адгезии к опорным поверхностям шагающего экскаватора ЭШ-6/45.

USING USED RUBBER PRODUCTS TO COMBAT SOIL ADHESION TO THE SUPPORT SURFACES OF WALKING EXCAVATORS

Demchenko I.I., Popov N.A.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: walking excavators, adhesion, support surfaces, separation force of materials, rubber products, overburden rocks.

Abstract. This paper discusses a method for preventing the adhesion and freezing of rock mass to the support surfaces of a walking excavator using rubber products. This material was chosen based on research conducted at the Institute of Non-Ferrous Metals of the Siberian Federal University, which confirmed the low adhesive properties of rubber. An experimental and industrial test was conducted to determine the effectiveness of using used rubber products to prevent or reduce adhesion to the support surfaces of the ЭШ-6/45 walking excavator.

Эффективная эксплуатация горнотранспортного оборудования является приоритетной на горных предприятиях страны. Для достижения высокой отдачи техники, в различных геотехнических и климатических условиях, важно минимизировать время простоев [1]. Одним из основных поводов для остановки шагающих экскаваторов, является налипания и намерзания горных масс на опорные поверхности.

В институте Цветных металлов Сибирского федерального университета были проведены исследования по определению силы отрыва различных конструкционных материалов от грунтов, взятых с разрезов Красноярского края [2]. Полученные данные показали, что резина является одним из перспективных материалов для решения данной проблемы, так как обладает низкими адгезионными свойствами (рис. 1).

По результатам исследований предлагается использовать бывшие в употреблении резинотехнические изделия: конвейерные резинометаллические ленты и автомобильные покрышки для предотвращения адгезии грунтов к опорным поверхностям шагающих экскаваторов.

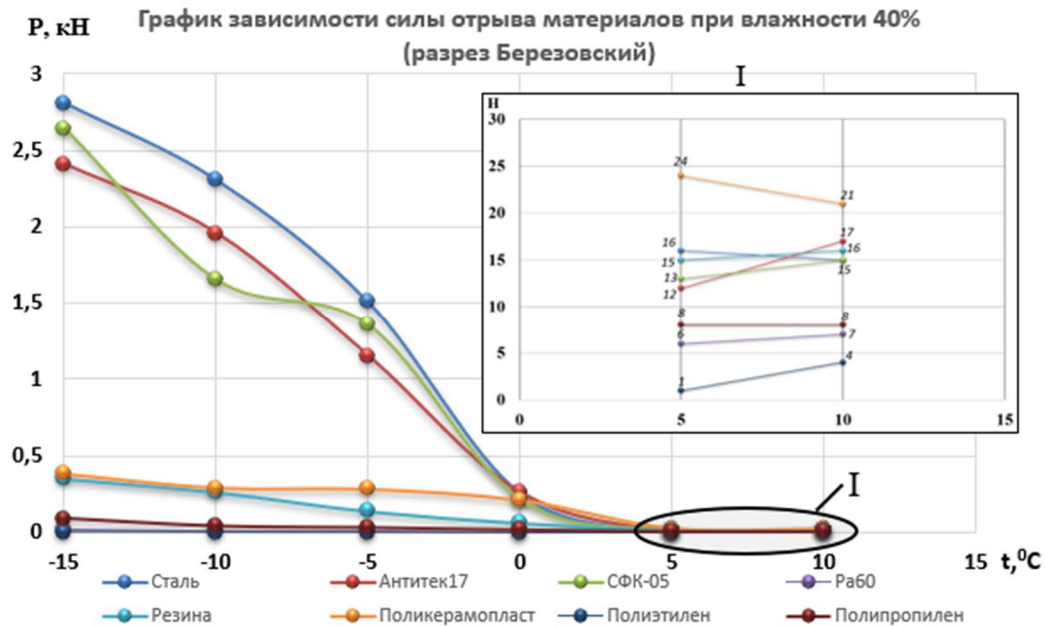


Рис. 1. График зависимости силы отрыва при влажности 40% для различных конструкционных материалов и покрытий

Для опытно-промышленной проверки данного технического предложения на вскрышном участке угольного разреза «Большесырский» ООО «Сибуголь» были проведены испытания. При подготовке использованные покрышки диаметрами от R15 до R22 по одному из вариантов раскладывались и обвязывались канатом в ряды (рис. 2), по другому варианту обвязывались канатом в шахматном порядке, что обеспечивало их более плотное размещение относительно друг друга [3].



Рис. 2. Разложенные и увязанные в ряды автомобильные покрышки для борьбы с адгезией к опорной базе экскаватора ЭШ-6/45

Во время проведения испытаний (рис. 3). наблюдался слабый снегопад, а температура окружающего воздуха изменялась от -4°C до $+2^{\circ}\text{C}$. Порода вскрышного уступа, где проходили эксперименты, представлена суглинком. Передвижение по уступу составило около 25 м.



Рис. 3. Опорная база экскаватора ЭШ-6/45 на бывших в употреблении автомобильных покрышках: 1 – опорная база; 2 – автомобильные покрышки

Выводы. Проведенные эксперименты показали отсутствие налипшей породы на днище опорной базы при обоих вариантах размещения покрышек, деформацию покрышек, а также наблюдается небольшое раскачивание экскаватора при повороте стрелы в процессе черпания.

Для дальнейшего проведения испытаний и использования рекомендуется использовать бывшие в употреблении автомобильные покрышки малого диаметра, разрезанные на две части вдоль протектора.

Список литературы

1. Ильин А.С. Повышение эффективности угольных разрезов на основе баланса технологической цепи // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – №6. – С. 102-106.
2. Демченко И.И., Попов Н.А., Ахпашев Б.А. Прочность прилипания и примерзания пород разрезов АО «СУЭК-Красноярск» к различным конструкционным материалам и покрытиям // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2025. – №6. – С. 29-37.
3. Патент №2844099 РФ. Устройство для предотвращения налипания и намерзания горной массы к опорным поверхностям шагающего экскаватора / И.И. Демченко, Д.Ю. Крицкий, А.И. Демченко, Н.А. Попов. – Заявка №2025104029 от 24.02.2026; опубл. 28.07.2025, Бюл. №22.

Сведения об авторах:

Демченко Игорь Иванович – д.т.н., профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов;
Попов Никита Анатольевич – аспирант, ассистент кафедры горные машины и комплексы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ДОРОЖНОГО КАТКА

Шишкин Е.А., Курбанов Т.К.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Ключевые слова: влажность грунта, уплотнение грунта, дорожный каток, интеллектуальное уплотнение, модуль упругости грунта, параметры уплотнения, математическое моделирование.

Аннотация. Проанализированы работы, рассматривающие влияние влажности грунта на процесс уплотнения земляного полотна дорожными катками. Проведен анализ существующих экспериментальных данных и методов лабораторного определения характеристик грунтов, выявлены расхождения между лабораторными и полевыми результатами. Результаты могут быть использованы при разработке расчетных алгоритмов и программных средств для выбора рациональных режимов работы дорожных катков с учетом фактической влажности уплотняемого грунта.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE CHOICE OF OPTIMAL PARAMETERS FOR THE OPERATION OF A ROAD ROLLER

Shishkin E.A., Kurbanov T.K.

Pacific National University, Khabarovsk

Keywords: soil moisture, soil compaction, road roller, intelligent compaction, soil elastic modulus, compaction parameters, mathematical modeling.

Abstract. The influence of soil moisture on the choice of optimal parameters for the operation of road rollers during roadbed compaction is considered. The analysis of existing experimental data and methods of laboratory determination of soil characteristics was carried out, discrepancies between laboratory and field results were revealed. The results can be used in the development of computational algorithms and software tools for selecting rational modes of operation of road rollers, taking into account the actual humidity of the compacted soil.

Введение. Уплотнение грунта является важным этапом строительства дорог. Существуют многочисленные исследования влияния физико-механических свойств грунта и режимных параметров уплотняющей техники на эффективность укатки. Одним из важных параметров, влияющих на эффективность работы дорожных катков, является влажность грунта. От данного параметра зависит выбор рабочего режима катка, а также окончательная плотность покрытия.

Целью настоящей работы является систематизация исследований влияния влажности грунта на его напряженное состояние и плотность в зависимости от прикладываемой нагрузки.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования выступает процесс уплотнения грунтов дорожными катками при различных значениях влажности. Рассматриваются закономерности изменения механических характеристик грунта в зависимости от содержания влаги и прикладываемой нагрузки, а также влияние указанных факторов на эффективность работы уплотняющей техники.

Результаты и их обсуждение. В научной статье [1] рассматриваются результаты полевых испытаний по определению влияния влажности грунта на его показатели, в ходе которых установлено, что при отклонении значений влажности от оптимальных возникает проблема в точном определении жесткости грунта. Использование в системах интеллектуального уплотнения модуля упругости, как основного характеризующего параметра, осложняется тем, что достигаемая плотность грунта возможна при разных значениях влажности. При этом значения модуля упругости будет одинаковым, а жесткость грунта различаться (рис. 1). На основе этого выдвигается предположение о необходимости корректировки математической модели и изменении коэффициентов в расчетах [2, 3].

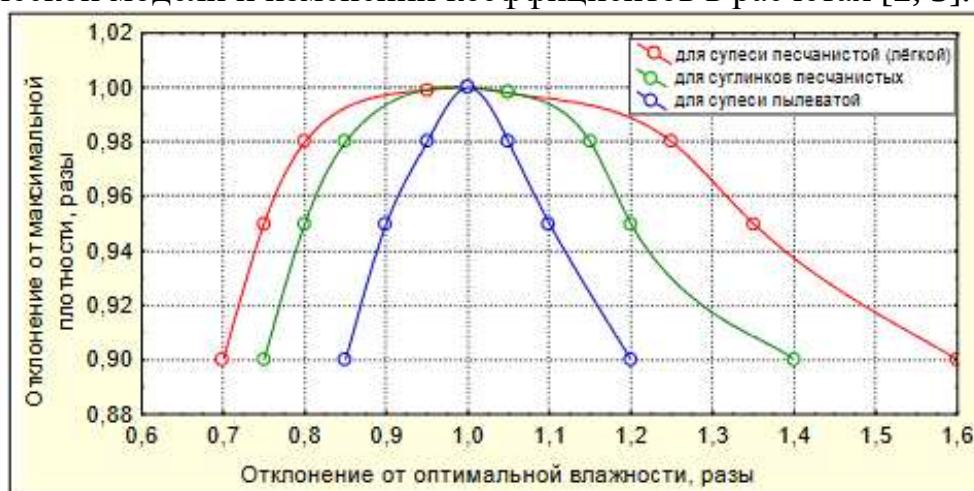


Рис. 1. Зависимость плотности сухого грунта от влажности

В тоже время наблюдается расхождение при сравнении методов ударного воздействия при определении плотности грунта, что в свою очередь подтверждает необходимость проведения новых исследований. Разница значений, полученных в ходе лабораторных исследований и полевых испытаний, приводят к уменьшению точности измерения и дополнительным издержкам на рабочем участке. Широкие пределы допустимых значений влажности, при которых уплотнение возможно, осложняют эту задачу. Это указывает на то, что для определения оптимальных рабочих режимов уплотняющих машин, необходимо рассматривать множество значений влажности [4, 5].

В работе [6] анализировались результаты эксперимента по установлению влияния влажности песчаного грунта при различных способах уплотнения. В ходе эксперимента рассматривался один тип грунта при узких пределах влажности и малом количестве режимов работы катка. Возникает необходимость в проведении дополнительных испытаний с учетом большего спектра значений влажности, а также с применением различных типов грунтов и рабочих режимов. Полученные результаты, возможно, использовать для определения оптимальных режимных параметров катков.

Большой интерес представляют результаты зарубежных исследований [7], в которых проводились серии опытов, направленных на выявление зависимости модуля упругости от влажности грунта и прикладываемого давления, которые показаны на рисунке 2. Также рассматривалось влияние различных присадок на уплотняемый грунт и изменение параметров уплотнения [8].

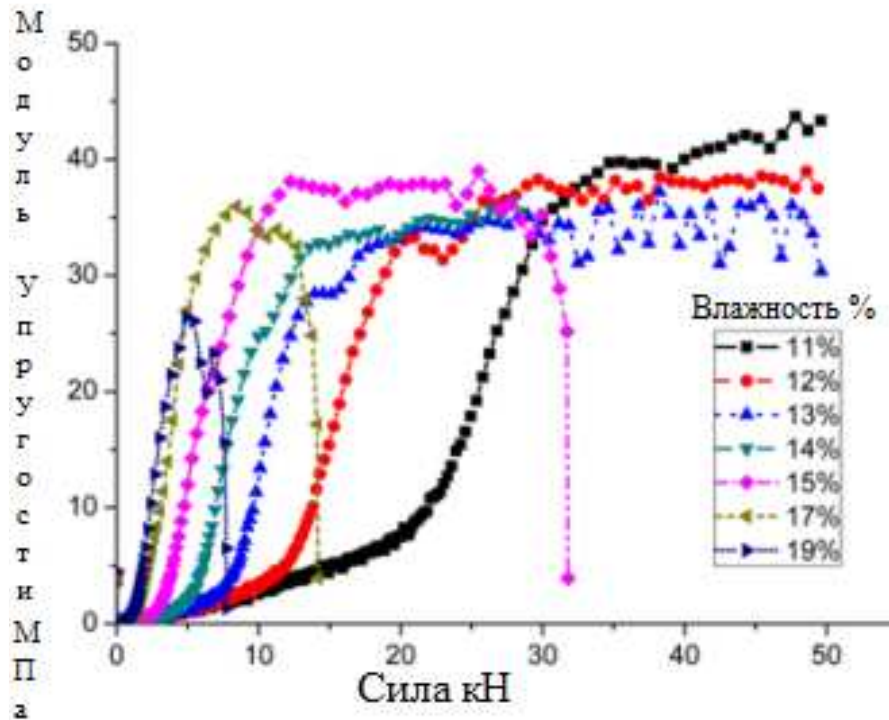


Рис. 2. Зависимость модуля упругости глины от приложенной силы при сжатии

С целью анализа данных была выполнена аппроксимация зависимости модуля упругости от влажности грунта, различными методами. По коэффициенту достоверности была определена наиболее точная модель. Результаты аппроксимации можно использовать для создания вычислительного комплекса, позволяющего более точно определять эффективные параметры статических катков с учетом влажности грунта.

Заключение. Проведённый анализ показал, что влажность грунта является одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность процесса уплотнения и выбор параметров работы дорожных катков. Установлено, что при различных значениях влажности возможно достижение одинаковой плотности грунта, однако при этом значения жесткости могут существенно различаться. Результаты проведенной аппроксимации зависимости модуля упругости от влажности и давления показывают наибольшую точность и могут быть использованы в разработке математической модели и создания вычислительного комплекса с учетом этих параметров, с помощью которого можно было бы подбирать оптимальные рабочие параметры дорожных катков.

Список литературы

1. Wei Hua., Xiaoyang Jiab., Xingyi Zhuc., Aiwu Sud., Yong Dud., Baoshan Huang. Influence of moisture content on intelligent soil compaction // Automation in Construction. 2020, vol. 113, p. 141.
2. Михайлов И.В. Совершенствование технологии уплотнения глинистых грунтов при возведении гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. – 2020. – №4. – С. 77-83.
3. Forssblad L. Compaction of soils and granular materials by vibrating rollers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003, vol. 23, no. 3, pp. 233-241.
4. Zhang H., Liu Q., Chen Y. Sustainable soil compaction methods in civil engineering // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 6, p. 5123.

5. Иванов С.П., Сидоров Н.В. Основные факторы и их зависимости, определяющие оптимальные режимы работы вибрационных катков при уплотнении песчаных грунтов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – №2. – С. 33-40.
6. Zhao X., Li Y., Wang J. Intelligent compaction technology for soil and asphalt: A review // Automation in Construction. 2019, vol. 103, pp. 249-260.
7. Семенов П.А. Моделирование процессов уплотнения грунтов при строительстве // Труды СиБАДИ. – 2016. – Вып. 26. – С. 85-92.
8. ГОСТ Р 51006-96. Услуги транспортные. Термины и определения. – М.: Госстандарт России, 1996. – 28 с.

Сведения об авторах:

Шишкин Евгений Алексеевич – к.т.н., доцент высшей школы промышленной инженерии;

Курбанов Тимур Курбанович – аспирант.

НОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ БОЙКА ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ

Храпенкова Е.С.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: боек, пневмоударник, посадочная поверхность, выточка, ударный импульс, цилиндроконическая оболочка.

Аннотация. В статье представлено новое техническое решение конструкции бойка пневмоударника, защищенное патентом РФ №235593. Разработка направлена на решение проблемы формирования ударного импульса, необходимого для эффективного раскалывания горных пород высокой крепости, при обеспечении ударника выточкой и двумя посадочными цилиндрическими поверхностями. В работе приведены расчеты, доказывающие идентичность предложенной конструкции и цилиндро-псевдосферического ударника по генерируемому импульсу.

NEW TECHNICAL SOLUTION FOR THE STRIKER OF PNEUMATIC IMPACT MACHINE

Khrapenkova E.S.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: striker, pneumatic hammer, landing surface, recess, impact pulse, cylindrical conical shell.

Abstract. The article presents a new technical solution for the design of an air hammer striker, protected by RU patent No. 235593. The development is aimed at solving the problem of shock pulse formation, which is necessary for effective splitting of high-strength rocks, while providing the impactor with a groove and two cylindrical landing surfaces. The paper presents calculations proving the identity of the proposed design and the cylinder-pseudospheric impactor in terms of the generated pulse.

Одним из основных технологических процессов при добыче полезных ископаемых, разведке месторождений и осуществлении строительных работ специального назначения является разрушение горных пород.

Ведущую роль в разрушении породного массива играют импульсные устройства, преимущественно ударного действия [1-3]. Они применяются для разрушения негабаритных частей массива и выемки полезных ископаемых, для бурения скважин в грунтах и высокопрочных горных породах, для выполнения узкоспециализированных строительных работ по подземной прокладке коммуникаций бестраншейным способом, для увеличения несущей способности фундаментных конструкций и оснований и др.

Известен поршень-боек (рис. 1) пневматической бурильной головки [4], цилиндрическая поршневая часть которого выполнена с двумя посадочными поверхностями 1 с кольцевой выточкой 2 между ними.

Основным преимуществом данной конструкции является высокий коэффициент полезного действия и минимальный расход сжатого воздуха, что достигается за счёт золотниковых расточек 3 и позволяет осуществить дальнейшее повышение мощности и снижения отдачи путем частичного выпуска сжатого воздуха из камер противодавления.

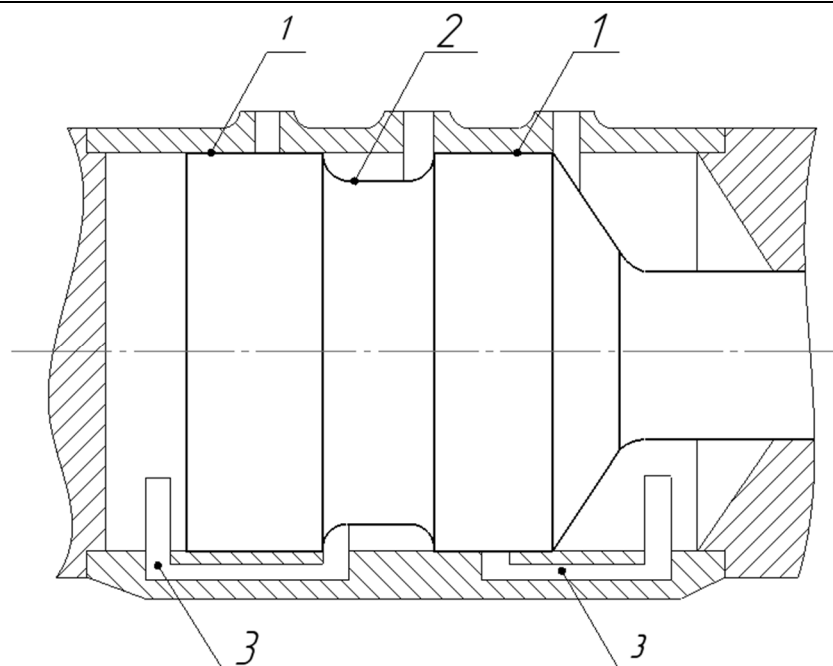


Рис. 1. Поршень-боек пневматической бурильной головки

Однако, цилиндрическая форма ударной и поршневой частей является характерным недостатком такого поршня, вследствие чего генерируемый им ударный импульс имеет прямоугольную форму без нарастания амплитуды. Поскольку это не соответствует силам сопротивления раскалыванию плит горных пород высокой крепости, эффективность передачи энергии удара раскалываемой плите не может быть повышена за счет такой формы бойка.

Основной задачей исследования является сохранение кольцевой выточки и двух посадочных цилиндрических поверхностей при условии обеспечения ударного импульса требуемой формы.

Следует отметить, что для раскалывания горных пород высокой крепости необходимо генерировать в инструменте ударный импульс с линейно нарастающей амплитудой и последующим сохранением максимального значения на протяжении определенного момента времени, что позволяет увеличить объем откалываемого куска. Данным условиям удовлетворяет конструкция ударника, представленная на рисунке 2, выполненная в форме двуступенчатого тела вращения, ударная часть которого образована вращением трактрисы вокруг геометрической оси ударника, а поршневая часть представляет собой цилиндр.

Однако рассматриваемый ударник не обладает преимуществами, характерными для конструкции, показанной на рисунке 1, а именно в нём отсутствуют две посадочные поверхности с кольцевой выточкой между ними.

Учитывая вышесказанное, разработано новое техническое решение конструкции бойка пневмоударника, защищенное патентом РФ №235593 [5]. Проблема формирования ударного импульса, необходимого для раскалывания горных пород высокой крепости, и сохранение выточки с двумя посадочными цилиндрическими поверхностями, решается путём оснащения бойка цилиндроконической оболочкой, ориентированной в сторону ударного торца, и центральным глухим отверстием, выполненным со стороны воспринимающего торца.

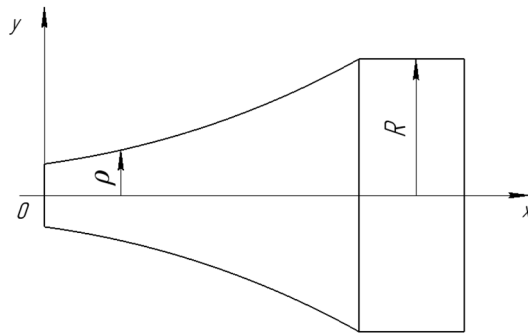


Рис. 2. Цилиндро-псевдосферический ударник: ρ – радиус ударной части с переменным поперечным сечением; R – радиус цилиндрической ступени

Боек пневмоударника (рис. 3) состоит из жестко соединенных между собой поршневой части 1 и ударной части 2, ограниченных ударным торцом 3 и воспринимающим торцом 4. Поршневая часть 1 выполнена в виде цилиндроконической оболочки и ориентирована цилиндром 5 в сторону ударного торца 3 и жестко соединяется конусом 6 с ударной частью 2 в срединном сечении 7 бойка. Ударная часть 2 выполнена двухступенчатой, первая ступень 8 которой выполнена в виде тела вращения трактрисы около ее асимптоты, вторая ступень 9 – цилиндрическая, длина которой равна длине цилиндра 5 цилиндроконической оболочки. В ударной части 2 со стороны воспринимающего торца 4 выполнено центральное глухое отверстие 10, площадь которого равна площади цилиндроконической оболочки в симметричных сечениях относительно срединного сечения 7 бойка.

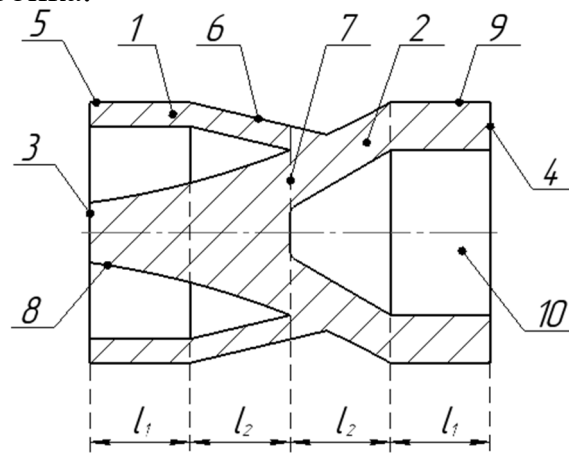


Рис. 3. Боек пневмоударника: l_1 , l_2 – длины характерных участков бойка

Установка бойка в корпус пневмоударника осуществляется до полного соприкосновения цилиндрических поверхностей поршневой и ударной частей с внутренней стенкой корпуса, что обеспечивает ему устойчивое положение. На воспринимающий торец и в центральное глухое отверстие от привода пневмоударника подается сжатый воздух, что приводит в движение боек. Происходит преобразование энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию возвратно-поступательного движения бойка. В конце хода ударным торцом боек наносит удар по рабочему инструменту. Вследствие удара в рабочем инструменте генерируется ударный импульс, под действием которого инструмент перемещается и производит разрушение горной породы.

Если бойки пневмоударников имеют различную геометрическую форму, но при этом одинаковую длину и идентичное распределение площади поперечного сечения по длине, то генерируемые ими в рабочем инструменте ударные импульсы будут идентичны.

Покажем условие идентичности по генерируемому ими импульсу цилиндро-псевдосферического ударника (рис. 2) и бойка, выполненного по патенту РФ №235593 (рис. 3).

Разобьем пневмоударник на две части с учетом направления распространения ударного импульса (рис. 4). По ударной части (рис. 4, верхний) импульс перемещается от ударного торца к воспринимающему, т.е. слева направо, а по поршневой части (рис. 4, нижний) – справа налево.

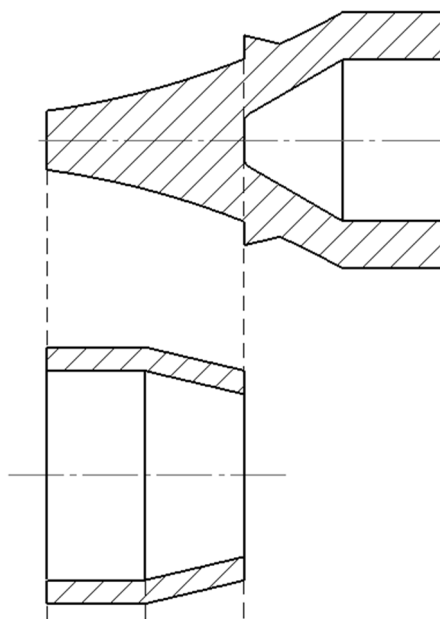


Рис. 4. Две части пневмоударника: а) ударная, б) поршневая

Очевидно, что на ударной части образуется кольцевой выступ (рис. 5), но вследствие относительной малости его геометрических размеров, он не будет вносить существенной погрешности в форму и параметры ударного импульса, следовательно, его наличием можно пренебречь.



Рис. 5. Присоединяемая часть конусной оболочки

Тогда, разворачивая части бойка, с целью совпадения направлений перемещения по ним ударного импульса, получает расчетную схему конструкции, показанную на рисунке 6.

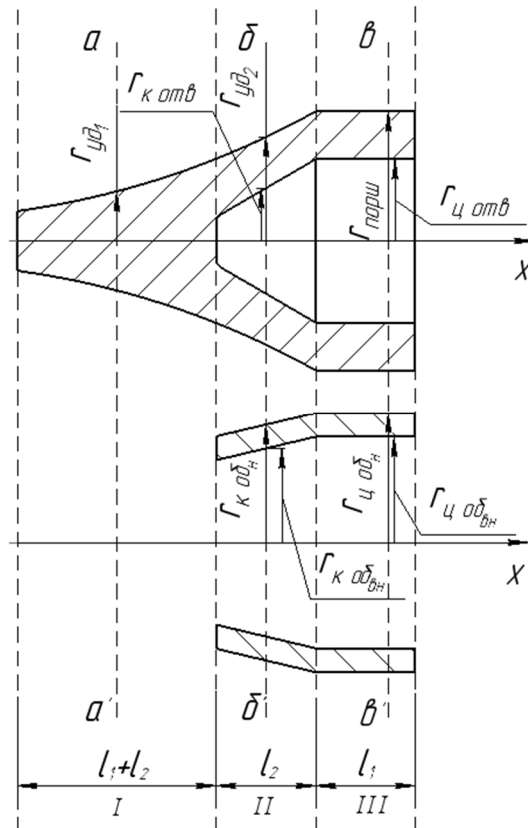


Рис. 6. Расчетная схема ударника (составлено автором)

Покажем условие идентичности на участке I в сечении $a-a'$ ударной части цилиндро-псевдосферического (рис. 2) бойка и бойка, приведённого на рисунке 3, по генерируемому ими импульсу. Площадь ударной части в поперечном сечении $a-a'$ приведённого цилиндро-псевдосферического бойка:

$$S_{пр1} = \pi \rho^2,$$

где ρ – радиус сечения ударной части.

Площадь ударной части в поперечном сечении $a-a'$ пневмоударника:

$$S_{уд1} = \pi r_{уд}^2,$$

где $r_{уд}$ – радиус окружности, образованной частью пневмоударник в поперечном сечении $a-a'$.

Так как условием идентичности является равенство площадей приведённого цилиндро-псевдосферического бойка и пневмоударника, отсюда следует равенство:

$$S_{пр1} = S_{уд1}.$$

Из данного равенства следует:

$$\pi \rho^2 = \pi r_{уд}^2.$$

Т.е. для соблюдения условия идентичности в интервале длин $0 \leq x_1 \leq (l_1 + l_2)$, необходимо выполнение равенства:

$$r_{уд} = \rho. \quad (1)$$

Покажем условие идентичности на участке II в сечении $б-б'$ ударной части цилиндро-псевдосферического (рис. 2) бойка и бойка, приведённого на рисунке 3, по генерируемому ими импульсу.

Площадь ударной части в поперечном сечении $б-б'$ приведённого цилиндро-псевдосферического бойка:

$$S_{\text{пр2}} = \pi \rho^2,$$

Площадь ударной части в поперечном сечении $\bar{b}-\bar{b}'$ пневмоударника:

$$S_{\text{уд2}} = \pi(r_{\text{уд}}^2 - r_{\text{к.отв}}^2) + \pi(r_{\text{к.обн}}^2 - r_{\text{к.обвн}}^2),$$

где $r_{\text{к.отв}}$ – радиус окружности, образованной коническим отверстием в поперечном сечении $\bar{b}-\bar{b}'$; $r_{\text{к.обн}}$ – радиус окружности, образованной наружной поверхностью конической части оболочки в поперечном сечении $\bar{b}-\bar{b}'$; $r_{\text{к.обвн}}$ – радиус окружности, образованной внутренней поверхностью конической части оболочки в поперечном сечении $\bar{b}-\bar{b}'$.

Тогда согласно равенству

$$S_{\text{пр2}} = S_{\text{уд2}}$$

с учетом (1) получаем:

$$\pi \rho^2 = \pi(\rho^2 - r_{\text{к.отв}}^2) + \pi(r_{\text{к.обн}}^2 - r_{\text{к.обвн}}^2).$$

Т.е. для соблюдения условия идентичности в интервале длин $(l_1 + l_2) \leq x_1 \leq (l_1 + 2l_2)$, необходимо выполнение равенства:

$$r_{\text{к.отв}} = \sqrt{r_{\text{к.обн}}^2 - r_{\text{к.обвн}}^2}. \quad (2)$$

Покажем условие идентичности на участке III в сечении $\bar{v}-\bar{v}'$ ударной части цилиндро-псевдосферического (рис. 2) бойка и бойка, приведённого на рисунке 3. Площадь поршневой части в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$ приведённого цилиндро-псевдосферического бойка:

$$S_{\text{пр3}} = \pi R^2,$$

где R – радиус окружности, образованной поршневой частью в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$.

Площадь сечения поршневой части в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$ нового бойка пневмоударника:

$$S_{\text{уд3}} = \pi(r_{\text{порш}}^2 - r_{\text{ц.отв}}^2) + \pi(r_{\text{ц.обн}}^2 - r_{\text{ц.обвн}}^2),$$

где $r_{\text{порш}}$ – радиус внешней окружности, образованной поршневой частью в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$; $r_{\text{ц.отв}}$ – радиус окружности, образованной цилиндрическим отверстием в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$; $r_{\text{ц.обн}}$ – радиус окружности, образованной наружной поверхностью цилиндрической части оболочки в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$; $r_{\text{ц.обвн}}$ – радиус окружности, образованной внутренней поверхностью цилиндрической части оболочки в поперечном сечении $\bar{v}-\bar{v}'$.

При условии, что $r_{\text{порш}} = r_{\text{ц.обн}} = R$, из равенства $S_{\text{пр3}} = S_{\text{уд3}}$ следует:

$$\pi R^2 = \pi(R^2 - r_{\text{ц.отв}}^2) + \pi(R^2 - r_{\text{ц.обвн}}^2).$$

Это означает, что для соблюдения условия идентичности в интервале длин $(l_1 + 2l_2) \leq x_1 \leq (2l_1 + 2l_2)$ необходимо выполнение равенства:

$$r_{\text{ц.отв}} = \sqrt{R^2 - r_{\text{ц.обвн}}^2}. \quad (3)$$

Таким образом, задавая конкретные размеры двухступенчатого исходного бойка (рис. 2), генерируемого требуемый для эффективного разрушения горной породы ударный импульс, а также контролируя толщину цилиндроконической оболочки согласно условиям прочности, по выражениям (1)-(3) вычисляются

размеры всех конструктивных элементов бойка, оснащенного двумя посадочными поверхностями с кольцевой промежуточной выточкой (рис. 3).

Представленное новое техническое решение бойка, решает не только проблему формирования заданного ударного импульса, необходимого для раскалывания горных пород высокой крепости, и его эффективной работы в составе пневмоударника.

Список литературы

1. Червов В.В., Тищенко И.В., Червов А.В., Ванаг Ю.В. Разработка энергонасыщенного пневматического молота на основе исследований взаимодействия его физической модели с грунтом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – №1. – С. 95-106. – doi.org/10.15372/FTPRPI20210110.
2. Сысоев Н.И., Гринько А.А., Гринько Д.А. Обоснование структуры и рациональных конструктивных параметров перфоратора с винтовым рабочим ходом бурового инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №7. – С. 113-124. – doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_113
3. Юнгмейстер Д.А., Исаев А.И., Ячейкин А.И., Соболева П.Д. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №3. – С. 28-36. – doi.org/10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.
4. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых: монография. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
5. Патент №235593. Боек пневмоударника / И.А. Жуков, Е.С. Храпенкова. – Заявка №2025108906 от 10.04.2025, опубл. 10.07.2025, Бюл. №19.

Сведения об авторе:

Храпенкова Екатерина Сергеевна – студент.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ГОРНЫХ МАШИНАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ БОЙКОВ, ОБРАЗОВАННЫХ ПОЛИТРОПОЙ ВРАЩЕНИЯ

Галимзянова Е.И., Жуков И.А.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: машина ударного действия, боек, удар, ударный импульс, политропа вращения, геометрическая форма.

Аннотация. В статье излагается решение проблемы повышения энергоэффективности ударных машин путём выбора рациональной формы бойка. Дается описание известных конструктивных решений бойков, образованных политропой вращения. Приводятся результаты сравнительного анализа энергоэффективности бойков различных форм, обосновывается перспективность применения политропы вращения для образования геометрической формы ударников с точки зрения повышения эффективности разрушения горной породы с применением машин ударного действия.

JUSTIFICATION OF THE USE OF IMPACT STRIKERS FORMED BY A POLYTROPE IN MINING MACHINES

Galimzyanova E.I., Zhukov I.A.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: impact machine, striker, impact, impact pulse, polytrope of rotation, geometric shape.

Abstract. The article presents a solution to the problem of increasing the energy efficiency of impact machines by choosing a rational form of striker. The description of the known constructive solutions of strikers formed by the polytrope of rotation is given. The results of a comparative analysis of the energy efficiency of strikers of various shapes are presented, and the prospects of using polytropes of rotation to form geometric shapes of strikers from the point of view of increasing the efficiency of rock destruction using impact machines are substantiated.

Одним из критериев, обеспечивающих повышение энергоэффективности и производительности работы горных машин ударного действия, является рационализация формы генерируемого в системе ударного импульса. Характер воздействия на горную породу при ударе зависит не только от массы и скорости бойка, но и от формы ударного импульса, определяющейся конструктивным исполнением ударника [1]. Вследствие чего известно, что боек должен быть переменного поперечного сечения. Рассмотрим вариант выбора политропы в качестве его образующей.

Термин «политропа» известен из термодинамики [2], он описывает функцию вида $y \cdot x^n = const$ с отрицательной степенью n . Функция политропы, в которой показатель степени равен минус единице, фактически описывает гиперболу. В остальных же случаях различают политропу, квадратичную, кубическую и т.д. Показатель степени n является параметром управления геометрической формой бойка как тела вращения. Меняя n , можно плавно менять характер изменения сечения по длине бойка. Чем больше значение n , тем быстрее меняется радиус (y) при изменении координаты (x). Тело, образующее боек, получают вращением графика политропы вокруг геометрической оси.

В качестве практического применения политропы может быть использована для образования простейших одноступенчатых ударников (рис. 1). Например, в работе [3] показан вариант исполнения бойка с образующей в виде квадратичной политропы, описываемой уравнением вида $y = \frac{200000}{(x-200)^2} + 11$. Ключевой особенностью ударного импульса, генерируемого такими бойками, является значение отношения максимальной амплитуды к амплитуде принятого за альтернативу цилиндрического бойка $\frac{F_{max}}{F_0} = 2,131$.

Высокое значение $\frac{F_{max}}{F_0}$ (более 2) означает, что боёк создаёт нагрузку, более чем вдвое превышающую аналогичный показатель цилиндрического ударника, что позволяет эффективнее инициировать трещины в породе и производить ее разрушение.



Рис. 1. Боёк в форме политропы вращения и его импульс: а – схема бойка; б – 3D-вид; в – график ударного импульса (составлено авторами)

Также известно применение политропы и для ударников, состоящих из нескольких ступеней. В 1987 году был запатентован ударник [4], выполненный в виде ряда последовательных соосных ступеней, имеющих форму тел вращения, образованных политропой (рис. 2). Диаметр сечения возрастает по направлению от ударного торца, при этом в местах стыка диаметр каждой последующей ступени меньше диаметра предыдущей.

Первая ступень характеризуется большим и малым диаметрами $d_{1Б}$ и $d_{1М}$ соответственно. Вторая ступень, расположенная со стороны рабочего конца бойка, имеет диаметры $d_{2Б}$ и $d_{2М}$.

Из рисунка следует, что вторая ступень является суженной относительно первой, при этом выполняются соотношения:

$$d_{2Б} < d_{1Б};$$

$$d_{2М} < d_{1М}.$$

Такое решение обеспечивает многократное усиление ударного импульса. В момент соударения бойка с инструментом возникает начальный фронт импульса p_0 . При прохождении волны по первой ступени амплитуда возрастает вследствие интенсивного увеличения поперечного сечения. На границе ступеней происходит частичное отражение волны из-за сужения, однако амплитуда снижается не до исходного уровня p_0 , а до некоторого значения $p_1 > p_0$. Далее волна распространяется по второй ступени, где диаметр снова быстро растёт, что приводит к новому подъёму амплитуды. При наличии большего числа ступеней процесс повторяется. В результате на воспринимающем торце бойка формируется

ударный импульс с максимальной амплитудой, превышающей начальную более чем в два раза.

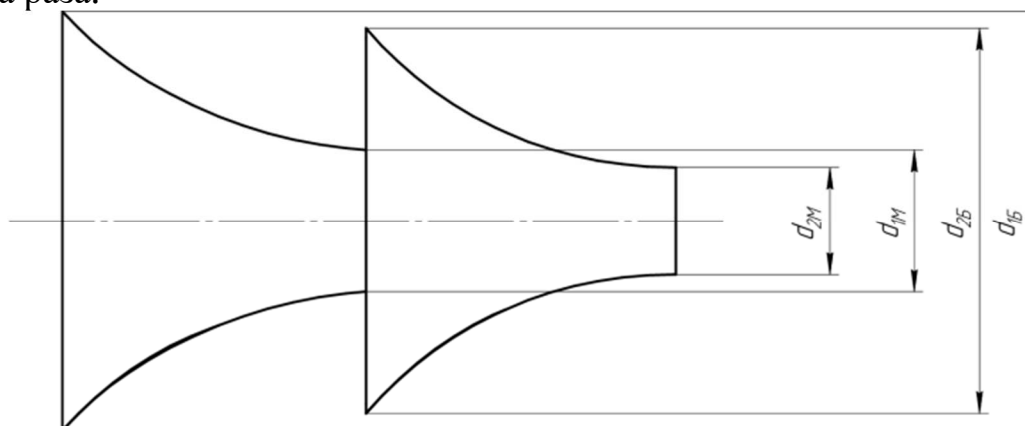


Рис. 2. Двухступенчатый ударник, образованный политропой вращения

В качестве подтверждения целесообразности использования политропы были проведены вычислительные эксперименты [5, 6] для ударников, имеющих две ступени: ударную, образованную вращением кривой вокруг геометрической оси ударника, и поршневую, выполненную в форме цилиндра.

Среди образцов были представлены бойки, ударная ступень которых была образована: 1) экспонентой, 2) трактрисой, 3) строфоидой, 4) циссоидой Диокла, 5) гиперболой, 6) квадратичной параболой, 7) верзьерой Аньези, 8) политропой. Цилиндрическая ступень в таких бойках была добавлена с целью сохранения импульса, генерируемого при ударе, после достижения им своего максимального значения, в течение определенного промежутка времени. Также она необходима для обеспечения устойчивости ударника внутри корпуса машины.

Для всех опытных образцов были приняты одинаковые значения массы и выбран один материал для изготовления. Предударная скорость определялась на основе значений времени до достижения максимальной амплитуды, величины силы в конце первой волны и импульса силы первой части первой волны в соответствии с установленной зоной рациональных параметров [5].

В ходе исследования с помощью специального программного обеспечения сравнивались такие параметры как максимальная амплитуда силы удара F_{max} , длительность первой фазы ударного импульса $t_{пв}$, импульс силы за время первой волны p_1 . На основе этих данных определялась энергоэффективность каждого бойка. По результатам, бойку, выполненному по квадратичной политропе, принадлежит самое высокое значение энергоэффективности среди названных образцов. Под энергоэффективностью здесь понимается степень снижения энергии удара, необходимой для разрушения образца горной породы, по сравнению с традиционно используемыми бойками. Результаты экспериментов показали, что применение бойка, образованного по квадратичной политропе, позволяет снизить энергозатраты на 37,6%.

В качестве развития идеи использования политропы вращения для образования форм бойков, предполагается дальнейшее создание ударника с двумя посадочными поверхностями, выполнение которых необходимо для встраивания бойка в корпус пневмоударной машины, причем с обязательным условием наличия между ними кольцевой выточки.

Список литературы

1. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
2. Фролов Д.А. Политропный процесс газа модели Ван-дер-Ваальса // Молодой ученый. – 2019. – №30(268). – С. 1-4.
3. Жуков И.А., Дворников Л.Т. Новые конструктивные решения бойков горных машин ударного действия. – Норт-Чарлстон: CreateSpace, 2015. – 130 с.
4. А.с. №1362572 СССР. Боек / Л.Т. Дворников, Г.Ф. Федотов. – Заявка №4097162 от 22.05.1986; опубл. 30.12.1987, Бюл. №48.
5. Азимов А.М. Повышение энергоэффективности гидромолотов при разрушении негабаритов горных пород на основе эффекта влияния геометрии ударных узлов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2025. – 163 с.
6. Азимов А.М., Жуков И.А. Повышение энергоэффективности гидромолотов, применяемых при разрушении негабаритов горных пород, на основе эффекта влияния геометрии элементов ударного узла // Горная промышленность. – 2025. – №3. – С. 71-79. – doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-71-79.

Сведения об авторах:

Галимзянова Екатерина Ильдаровна – студент;

Жуков Иван Алексеевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАБОТУ ФРЕЗЕРНОЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ МАШИНЫ

Бородин Н.А., Журавлев И.Н., Князев А.В., Маклакова Е.А., Доманин К.А.

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

Ключевые слова: фрезерная машина, фреза, динамические нагрузки, момент инерции, максимальный момент, вал, предохранительное устройство.

Аннотация. Отмечено то, что на работу фрезерных машин в значительной мере влияют механические параметры, которые могут изменяться в широких пределах. Выявлено как момент инерции вращающихся масс оказывает влияние на работу фрезерных машин. Определено влияние предохранительного устройства, защищающего фрезерный барабан от перегрузок. Установлено то, что когда момент инерции барабана достигает высоких значений, то и при взаимодействии фрезы с препятствием примерно на 50% возрастает значение максимального момента. Это надо учитывать при проектировании фрезерной машины.

TO DETERMINE THE INFLUENCE OF THE MECHANICAL PARAMETERS OF THE MACHINE ON THE OPERATION OF THE MILLING MACHINE

Borodin N.A., Zhuravlev I.N., Knyazev A.V., Maklakova E.A., Domanin K.A.

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: milling machine, milling cutter, dynamic loads, moment of inertia, maximum moment, shaft, safety device.

Abstract. It is noted that the operation of milling machines is significantly affected by mechanical parameters that can vary widely. It is revealed how the moment of inertia of rotating masses affects the operation of milling machines. The influence of a safety device that protects the milling drum from overloads is determined. It has been established that when the drum's moment of inertia reaches high values, the maximum torque increases by approximately 50% when the cutter interacts with an obstacle. This should be taken into account when designing a milling machine.

На работу фрезерных машин, применяемых в лесном хозяйстве, не малое влияние оказывают механические параметры, которые могут изменяться в широких пределах [1], одним из которых может быть изменение момента инерции вращающихся масс. В частности, для фрезерного барабана значительное увеличение момента инерции может происходить в дождливую погоду из-за налипания на фрезу влажной почвы. Фрезерные машины, используемые в лесном хозяйстве, достаточно универсальны, что позволяет устанавливать на барабаны не только четыре фрезы, но и их разное количество [2]. Это приводит к увеличению или уменьшению момента инерции J_2 , где (J_2 – момент инерции фрезерного барабана). Фрезерные машины защищены от перегрузок предохранительными муфтами. Для того, чтобы определить влияния предохранителя защищающего фрезерный барабан при изменении момента инерции, проводятся компьютерные эксперименты, при этом надо менять моменты инерции J_2 от 0,75 до 15 кг·м², с шагом 0,75 кг·м² (рис. 1).

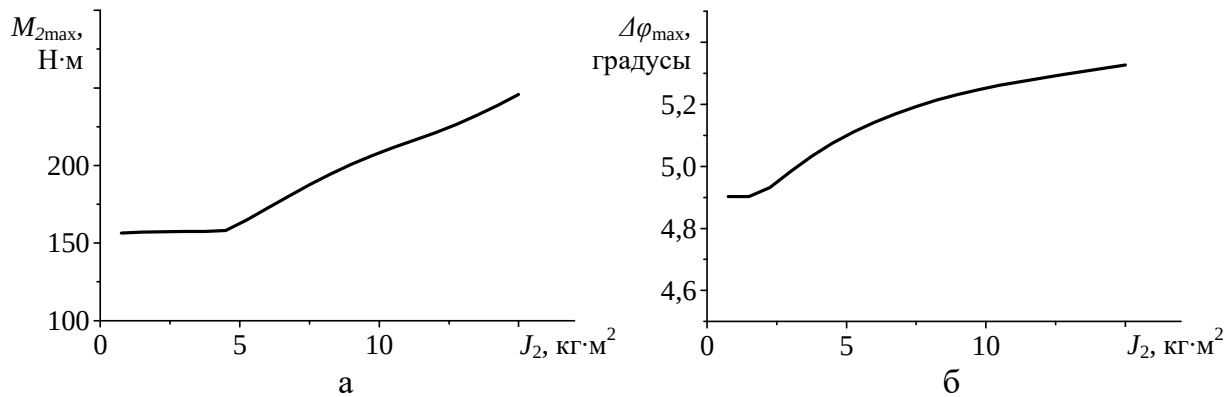


Рис. 1. Влияние момента инерции почвообрабатывающей фрезы на максимальный момент на валу $M_{2\text{max}}$ (а), максимальный угол закручивания $\Delta\varphi_{\text{max}}$ (б)

Эксперимент показывает то, что, когда значение J_2 меньше значения $5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ на валу, максимальный момент имеет свое максимальное значение $M_{2\text{max}}$, это происходит в том случае, когда на фрезерном барабане имеется небольшое количество фрез. Когда значение J_2 будет увеличиваться и станет больше $5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, будет возрастать и $M_{2\text{max}}$. Отсюда следует, что при увеличении момента инерции динамическая нагрузка на вал фрезерного барабана, когда он остановится, также будет увеличиваться.

При этом, когда увеличивается J_2 в пределах $1,0 \dots 7,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, немного меняет свое максимальное значение примерно на 5% в большую сторону и угол закручивания $\Delta\varphi_{\text{max}}$, далее начиная от $7,0$ и выше $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ $\Delta\varphi_{\text{max}}$ имеет постоянное значение, это зависит от регулировочных параметров предохранителя, который должен срабатывать при достижении одних и тех же значений угла $\Delta\varphi_{\text{max}}$, и момент достигает своего максимума.

При увеличении момента инерции фрезерного барабана определяется собственная частота колебаний в упругой системе вал – фрезерный барабан [3]. Это говорит о том, что характер колебаний при разных значениях инерционных моментов, которые возникают при встрече с препятствием, будут разными (рис. 2).

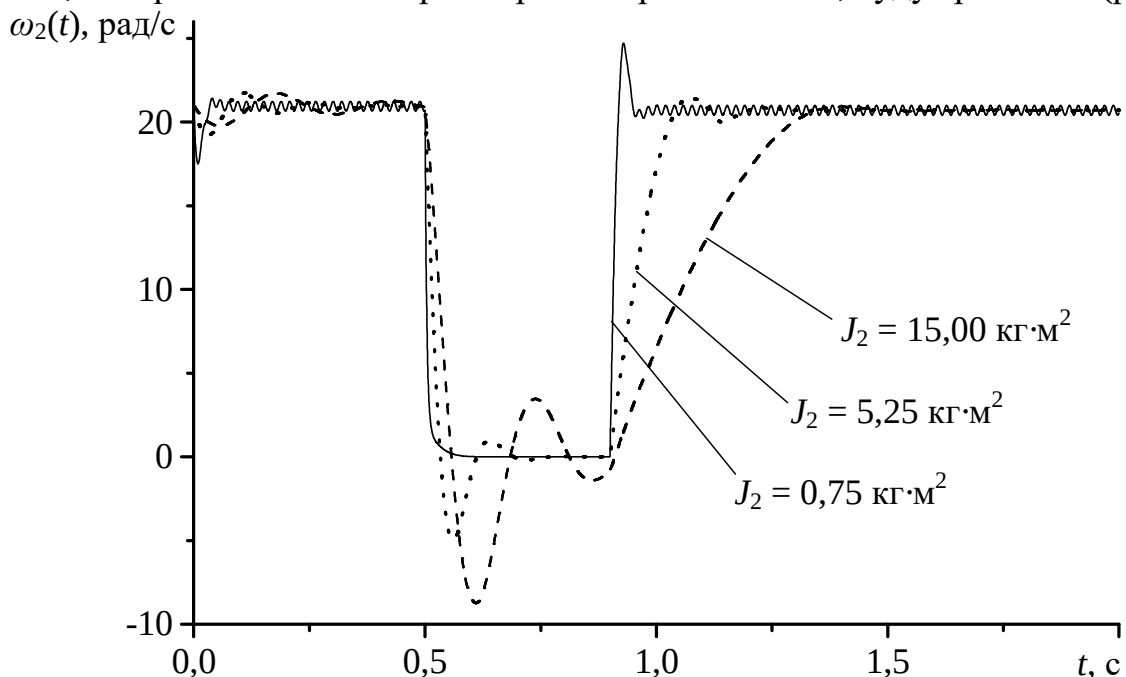


Рис. 2. Зависимость характера вращения фрезерного барабана при встрече с препятствием от момента инерции J_2

Надо отметить то, что когда барабан пройдет препятствия, эти участки зависимости $\omega_2(t)$, где $\omega_2(t)$ –угловая скорость фрезы, становятся более пологими (рис. 2) в интервале $t > 0,9$ с (t – время прохождения фрезы через препятствие), для раскручивания фрезерного барабана потребуется больше времени.

Делая вывод, надо отметить то, что для фрезерного барабана, имеющего как малое, так и большое количество фрез, и при большом налипании грунта при влажной погоде предохранительное устройство будет эффективно работать. Однако, когда значения момента инерции барабана будут высокими, то и максимальный момент, когда фреза будет взаимодействовать с препятствием, увеличится примерно на 50%. Это надо учитывать при проектировании фрезерной машины.

Список литературы

1. Карамышев В.Р., Икоева А.З. К выбору уровня параметра защиты л/х машин // Лес. Наука, молодежь. – 2004: Сб. мат. по итогам НИР молодых ученых за 2004 г, посвященный 75-летию со дня рождения профессора А.В. Веретенникова. – Воронеж: ВГЛТА, 2005. – С.133-136.
2. Журавлев И.Н. Теоретическое исследование динамики лесной фрезерной почвообрабатывающей машины с двух поточным предохранительным устройством // Вестник КрасГАУ. – 2009. – №12. – С. 179-184.
3. Логунов О.Н. Совершенствование защиты лесных почвообрабатывающих фрез от перегрузок: Дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж: ВГЛТА, 2001. – 156 с.

Сведения об авторах:

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

Журавлев Иван Николаевич – к.т.н., доцент;

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

Маклакова Елена Альбертовна – д.фил.н., профессор;

Доманин Кирилл Алексеевич – студент.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЧВООБРАБОТКЕ

Кульпина М.О.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, тяговое усилие, отвал, культиваторы, плуг, почвообрабатывающие орудия.

Аннотация. Рассматривается актуальный вопрос замены металлических почвообрабатывающих орудий на полимерные. Целью исследования является анализ перспектив применения при изготовлении рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Сочетание уникальных свойств полимерных композиционных материалов таких как коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения, высокая удельная прочность и минимальная адгезия к почве открывает перспективы для модернизации почвообрабатывающей техники. Преимуществом такого материала, как Tekrone для отвалов плугов является минимизация переуплотнения почвы, которая в свою очередь улучшает водо- и воздухообмен, снижает вероятность дефектов – лучевидный износ, а также нарушение формы поверхности. Известно, что данный материал используется в практике, например, на зубья бороздообрушителей и снижает среднее тяговое усилие на 50% на слабоуплотненной почве. Внедрение полимерных композиционных материалов в качестве материала для почвообрабатывающих органов позволяет снизить энергоемкость обработки почвы, уменьшить износ и коррозию деталей, повысить долговечность оборудования и производительность агрегатов. Это представляет собой стратегически важный шаг для повышения энергоэффективности, экологичности и конкурентоспособности современного сельского хозяйства.

ON THE ISSUE OF USING POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN TILLAGE

Kulpina M.O.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

Keywords: polymer composite materials, traction force, moldboard, cultivators, plow, tillage implements.

Abstract. This article examines the pressing issue of replacing metal tillage implements with polymer ones. The aim of the study is to analyze the potential for their use in the manufacture of tillage implement working parts. The combination of the unique properties of polymer composite materials, such as corrosion resistance, low friction coefficient, high specific strength, and minimal soil adhesion, offers potential for modernizing tillage equipment. The advantage of a material like Tekrone for plow moldboards is that it minimizes soil compaction, which in turn improves water and air exchange and reduces the likelihood of defects such as radial wear and surface distortion. This material is known to be used in practice, for example, on furrower teeth, and reduces average traction force by 50% on soft soil. The introduction of polymer composite materials for tillage tools reduces the energy consumption of tillage, minimizes wear and corrosion of components, and increases equipment durability and productivity. This represents a strategically important step toward improving the energy efficiency, environmental friendliness, and competitiveness of modern agriculture.

В современном сельском хозяйстве одной из ключевых проблем является интенсивный износ и коррозия рабочих органов почвообрабатывающих машин, изготовленных из традиционных стальных материалов [1]. Это приводит к значительным экономическим потерям: по глобальным оценкам, коррозия и износ

обходятся в миллиарды долларов ежегодно, составляя около 3,4% от мирового ВВП [2]. В России ситуация усугубляется использованием металлов низкого качества, что вызывает повышенный спрос на запасные части (до 80% расхода металлопроката) и снижает надежность техники [3]. Кроме того, стальные детали способствуют переуплотнению почвы, разрушению ее структуры, повышенному тяговому сопротивлению и расходу топлива, что негативно сказывается на энергоэффективности, экологичности и продуктивности аграрного производства. Развитие полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения и минимальной адгезией к почве, открывает перспективы для модернизации почвообрабатывающей техники. Такие материалы уже успешно применяются в различных отраслях промышленности, включая сельское хозяйство, где они позволяют минимизировать негативные воздействия на почву, повысить долговечность оборудования и снизить эксплуатационные затраты. Актуальность темы подтверждается растущим интересом к ПКМ в отечественной и зарубежной литературе, патентах и экспериментах, а также необходимостью перехода к устойчивым технологиям в условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата и дефицит ресурсов [4, 5].

Целью исследования является обобщение и анализ современного состояния и перспектив применения полимерных композиционных материалов при изготовлении и модернизации рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Это направлено на снижение энергоемкости обработки почвы, уменьшение износа деталей, повышение долговечности техники, а также оценку экономической эффективности таких решений для повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного производства.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) характеризуются уникальным сочетанием свойств: высокой удельной прочностью и жесткостью, коррозионной, химической и усталостной стойкостью, низким коэффициентом трения, например, 0,20 для Tekrone против 0,52 для стали 60, и минимальной адгезией к почве. В сравнении со сталью ПКМ имеют меньшую насыпную плотность (930 кг/м³ для Tekrone против 7800 кг/м³ для стали 60), что снижает вес деталей при сохранении прочности. Эти характеристики делают ПКМ идеальными для почвообрабатывающих орудий, где стальные компоненты подвержены интенсивному износу, например, сквозное протирание в области носка отвала или износ полевого обреза до 15 мм на связных почвах. Применение ПКМ минимизирует переуплотнение почвы, сохраняет комковатую структуру для улучшения водо- и воздухообмена, а также снижает вероятность дефектов, таких как нарушение формы поверхности или лучевидный износ [6].

В отечественной и зарубежной практике ПКМ используются для изготовления элементов борон, культиваторов, отвалов плугов и бороздообрушителей. Например, нанесение покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (UHMW-PE) на зубья бороздообрушителей снижает среднее тяговое усилие на 50% на слабоуплотненной почве. Патенты на тефлоновые отвалы датируются 1959 годом, а эксперименты с полиэтиленовыми отвалами показывают снижение тягового сопротивления на 11% при росте производительности. В Японии фирма "Сунгамо"

производит 3-5-корпусные плуги с фторопластовыми отвалами, а в Венгрии аналогичные решения применяются для повышения эффективности на влажных и связных грунтах. В России ВИМ установил, что полимерные отвалы типа фторопласт обеспечивают снижение тягового сопротивления плуга до 30%. Материал Tekrone демонстрирует превосходные триботехнические свойства: тяговое сопротивление плуга с отвалами из Tekrone составляет 29,8 кН против 34,5 кН для стальных, что дает разницу в 13,6%.

В результате обобщения и анализа современного состояния применения полимерных композиционных материалов в почвообрабатывающей технике подтверждается их высокая перспективность для достижения поставленной цели. Замена стальных рабочих органов на ПКМ позволяет снизить энергоемкость обработки почвы на 11-30%, уменьшить износ и коррозию деталей, повысить долговечность оборудования и производительность агрегатов на 11-12,6%, а также сократить расход топлива на 6-11,8%. Внедрение ПКМ представляет собой стратегически важный шаг для повышения энергоэффективности, экологичности и конкурентоспособности современного сельского хозяйства, полностью отвечая на вызовы износа традиционных материалов и необходимости устойчивого развития.

Список литературы

1. Петренко А.А., Серебровский В.И. К вопросу об упрочнении и восстановлении изношенных отвалов плугов // Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Курск, 28 октября 2022 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2022. – С. 158-162.
2. Aramide B.P., Pityana S., Sadiku R., Jamiru T., Popoola P. Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, vol. 116, pp. 83-98. DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4.
3. Шварц А.А. Технический уровень и направления развития почвообрабатывающей техники // Актуальные проблемы инженерно-технического обеспечения АПК: материалы Международной научно-практической конференции, Курск, 23-25 января 2013 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова, 2013. – С. 6-8.
4. Ананьев М.И., Ишков А.В. Перспективы применения композиционных материалов для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих орудий повышенной износостойкости // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции: в 2 кн. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – С. 146-148.
5. Иванов С.И., Блажевский В.А. Перспективы применения композитных материалов в сельском хозяйстве // Сельскохозяйственные науки: вопросы и тенденции развития: материалы международной научно-практической конференции, Великие Луки, 20 декабря 2023 года. – Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. – С. 106-109.
6. Nadykto V., Kyurchev V., Bulgakov V., Findur P., Karaiev O. Influence of the Plough with Tekrone Mouldboards and Landsides on Ploughing Parameters // Acta Technologica Agriculturae. 2020, vol. 23, pp. 40-45. DOI: 10.2478/ata-2020-0007.

Сведения об авторе:

Кульпина Мария Олеговна – инженер.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Суконкин В.Ф., Свиридов А.С.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, сельскохозяйственная техника, узлы трения, износостойкость, полиамид, стеклонаполненный полиамид, термопластичный эластомер, полиоксиметилен, политетрафторэтилен, оксафен, литье под давлением.

Аннотация. Полимерные композиционные материалы являются перспективной альтернативой традиционным металлам в узлах трения сельскохозяйственной техники. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности и долговечности деталей, работающих в условиях абразивного износа, динамических нагрузок и перепадов температур. Целью исследования является обоснование выбора полимерной композиции для изготовления направляющих пальцев шнека и опор скольжения, а также описание технологических аспектов их производства. В статье представлен аналитический обзор современных полимерных материалов: полиамидов, полиформальдегидов, фторопластов и композитов оксафен, приведены их физико-механические и трибологические характеристики. На основе анализа предложено применять композицию на основе полиамида, армированного стекловолокном, модифицированную термоэластопластом. Добавление термоэластопласта позволяет снизить анизотропию свойств и повысить стойкость деталей к динамическим нагрузкам. В качестве технологии изготовления выбрано литье под давлением, определены оптимальные технологические параметры: температура по зонам цилиндра 200-265°C, температура формы 22-30°C, время цикла 15-21 с. Внедрение разработанной композиции и технологии позволяет увеличить ресурс деталей в 1,5-2 раза за счет снижения интенсивности абразивного износа, что обеспечивает надежную работу сельскохозяйственной техники и предотвращает срывы полевых работ.

IMPROVING THE DURABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS USING COMPOSITE MATERIALS

Sukonkin V.F., Sviridov A.S.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

Keywords: polymer composite materials, agricultural machinery, friction units, wear resistance, polyamide, glass-filled polyamide, thermoplastic elastomer, polyoxymethylene, polytetrafluoroethylene, oxaphen, injection molding.

Abstract. Polymer composite materials are a promising alternative to traditional metals in friction units of agricultural machinery. The relevance of the work is due to the need to increase the reliability and durability of parts operating under conditions of abrasive wear, dynamic loads and temperature fluctuations. The purpose of the study is to substantiate the choice of a polymer composition for the manufacture of screw guide pins and sliding supports, as well as to describe the technological aspects of their production. The article presents an analytical review of modern polymer materials: polyamides, polyformaldehydes, fluoroplastics and oxafene composites, their physico-mechanical and tribological characteristics. Based on the analysis, it is proposed to use a composition based on polyamide reinforced with glass fiber, modified with thermoplastic. The addition of thermoplastics makes it possible to reduce the anisotropy of properties and increase the resistance of parts to dynamic loads. Injection molding was chosen as the manufacturing technology, optimal technological parameters were determined: the temperature in the cylinder zones is 200-265°C, the mold temperature is 22-30°C, and the cycle time is 15-21 C. The introduction of the developed composition and technology makes it possible to increase

the life of parts by 1.5-2 times by reducing the intensity of abrasive wear, which ensures reliable operation of agricultural machinery and prevents disruptions of field work.

Введение. В условиях интенсивного ведения сельского хозяйства к надежности и долговечности техники предъявляются повышенные требования. Традиционные металлические детали, работающие в узлах трения, подвержены коррозии, интенсивному абразивному износу и обладают значительной массой. Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет решить эти проблемы благодаря малому весу, химической стойкости и возможности формования сложных геометрических форм [1]. Полимеры, в отличие от металлов, имеют лучшие показатели при нагрузках, выходящих за пределы нормальных рабочих условий: наличие абразива, влаги, динамических и знакопеременных нагрузок [2].

Целью исследования является обоснование выбора полимерных композиционных материалов для изготовления ответственных деталей (направляющая пальцев шнека, опора скольжения) и описание технологических аспектов их производства.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор современных полимерных материалов для узлов трения.
2. Обосновать выбор оптимальной композиции для изготовления деталей.
3. Разработать технологические параметры переработки методом литья под давлением.

Научная новизна исследования заключается в обосновании применения модифицированной композиции на основе полиамида, армированного стекловолокном, с добавлением термоэластопласта, что позволяет снизить анизотропию свойств и повысить стойкость к динамическим нагрузкам.

Материалы и методы. Исследования проводились на основе изучения литературных данных, методик обработки данных, обеспечивающих эффективность работы узлов трения сельскохозяйственной техники. Материалы, применяемые для изготовления деталей, различны. В современном машиностроении для узлов трения широко используют полиамиды (ПА), полиформальдегиды (ПОМ), фторопласты, а также композиты карбонит и оксафен [3].

Полиамиды (ПА) характеризуются высокой прочностью на растяжение, стойкостью к маслам и топливу, что делает их идеальными для использования в условиях высоких нагрузок. Ключевыми характеристиками полиамидов являются термостойкость, устойчивость к химическим веществам и эластичность. Однако они обладают гигроскопичностью, что требует сушки перед переработкой [4].

Полиформальдегиды (ПОМ) известны своей жесткостью, прочностью и стабильностью. В таблице 1 приведены характеристики различных типов полиформальдегидов.

Фторопласты (ПТФЭ) обладают выдающимися свойствами: высокой химической стойкостью, термостойкостью до +260°C и низким коэффициентом трения (до 0,04). Однако их механическая прочность невысока (20-35 МПа), что ограничивает применение в силовых конструкциях.

Табл. 1. Характеристики различных типов полиформальдегидов

Параметр	POM-H	POM-C	POM-GF30
Плотность, г/см ³	1,42	1,41	1,60
Прочность на разрыв, МПа	70-80	60-70	90-110
Модуль упругости, ГПа	3,0-3,5	2,6-3,0	7,0-8,0
Коэффициент трения	0,2-0,3	0,2-0,3	0,30,4

В узлах трения, эксплуатируемых в средах с высоким содержанием абразивов, применяются композитные полимеры карбонит и оксафен. Эти материалы обладают более высокими антифрикционными показателями и ресурсом по сравнению с полиамидами и бронзой [5]. Устойчивость к истиранию карбонита превышает текстолитовую в пять раз. Оксафен сохраняет все трибологические характеристики карбонита (табл. 2) и позволяет изготавливать сложные изделия.

Табл. 2. Характеристики материала оксафен

Свойство	Значение
Физико-механические свойства	
Плотность, г/см ³	1,32-1,4
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	115-220
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	35-60
Трибологические свойства	
Коэффициент сухого трения	0,08-0,23
Коэффициент масляного трения	0,04-0,06
Фрикционная теплостойкость, °C	от -80 до +300

Одним из примеров внедрения ПКМ являются экспериментальные глазки из полиамида на жатке комбайна CLAAS (рис. 1), которые продемонстрировали износ всего 22-23% от допустимого за 964 га наработки [6].



Рис. 1. Жатка комбайна CLAAS (VARIO 930)

Результаты и обсуждения. Детали сельскохозяйственной техники подвержены воздействию агрессивных сред и температурных перепадов (от -30°C до +60°C). На основе анализа к наиболее подходящим материалам отнесены: полиамиды (РА6, РА66), полиоксиметилены (POM), композиционные термопласты (РА+GF) (табл. 3).

Для использования в узлах трения (опорах скольжения) наилучшим материалом является группа армированных термопластов (РА+GF) [7].

Табл. 3. Рекомендуемые материалы для деталей сельхозтехники

Материал	Преимущества	Недостатки	Применение
Полиамиды (РА6, РА66)	Высокая прочность, износостойкость	Гигроскопичность	Втулки, корпуса подшипников
Полиоксиметилен (РОМ)	Высокая жесткость, низкий коэффициент трения	Чувствительность к кислотам	Шестерни, направляющие
Композиты РА+GF	Повышенная жесткость и термостойкость	Анизотропия свойств	Опора скольжения (рис. 2), нагруженные конструкции



Рис. 2. Опоры скольжения сельскохозяйственной техники (направляющие пальцев шнека, граблины мотовила)

Однако повышенная жесткость данных композитов при динамических нагрузках может вызвать разрушение детали из-за анизотропии свойств [8]. Для решения проблемы предлагается в композиционный материал на основе РА+GF вводить 1/3 часть термопластичного эластомера (ТЭП). Наиболее подходящим является термоэластопласт PolygoПЛАст 02-90-0,89 MBS на основе стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука, обладающий атмосферостойкостью, эластичностью и масло-бензостойкостью в диапазоне температур от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

Технология изготовления деталей литьем под давлением. Для опор скольжения наиболее подходящей технологией является литье под давлением. Принцип работы включает плавление сырья, впрыск расплава под давлением в пресс-форму, охлаждение и выталкивание готового изделия.

В качестве оборудования используются термопластавтоматы (ТПА). Технологическая схема приведена на рисунке 3.

Для выбранной композиции РА+GF с добавлением 30% ТЭП рекомендуются следующие технологические параметры:

- температура по зонам цилиндра: зона 1 (загрузка): $200-210^{\circ}\text{C}$; зона 2 (сжатие): $225-235^{\circ}\text{C}$; зона 3 (дозирование): $255-265^{\circ}\text{C}$;
- температура пресс-формы: $22-30^{\circ}\text{C}$ (обеспечивается водяным охлаждением).

Временные параметры цикла: впрыск (заполнение формы): 6-8 с; выдержка под давлением: 5-7 с; охлаждение (пауза): 4-6 с.

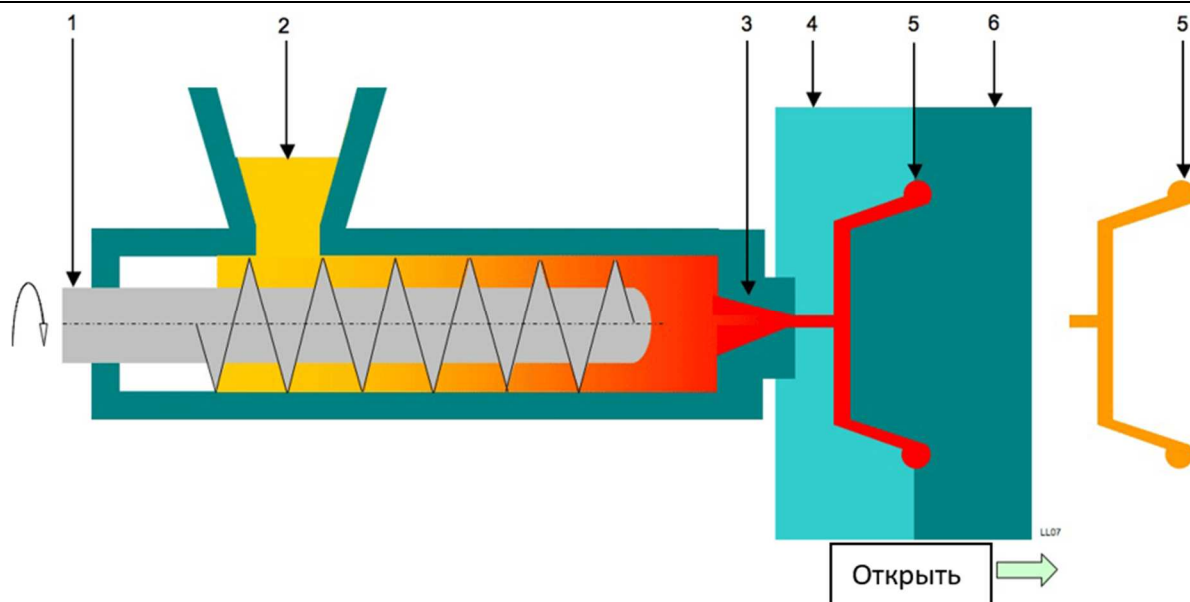


Рис. 3. Технологическая схема работы ТПА: 1 – шнек; 2 – дозирующее устройство гранулята; 3 – сопло; 4 и 6 – две половины пресс-формы; 5 – (красным) полость формы с каналами; 5 – (жёлтым) готовая отливка

В качестве разделительной смазки рекомендуется использовать силикон, нанесенный тонким слоем на поверхность пресс-формы. Данные параметры были использованы при изготовлении опытных образцов для дальнейших исследований абразивостойкости.

Анализ износа деталей и пути повышения долговечности.

Сельскохозяйственные машины в эксплуатации подвержены различным типам износа. По механизму разрушения их разделяют на механический (абразивный, усталостный, эрозионный), физико-химический (коррозионно-механический) и электрический.

Рассмотренные детали (направляющие пальцев шнека, опоры скольжения) в наибольшей степени подвержены механическому абразивному износу [9]. Абразивный износ возникает вследствие воздействия твердых частиц (почвы, песка, остатков растений), попадающих в зазоры сопряженных деталей.

Введение термоэластопласта в композит PA+GF решает две задачи. Во-первых, эластичная фаза демпфирует динамические нагрузки, снижая риск усталостного разрушения. Во-вторых, частицы ТЭП модифицируют структуру приповерхностного слоя, делая его менее склонным к микрорезанию абразивными частицами. Это позволяет увеличить ресурс детали в 1,5-2 раза по сравнению с немодифицированным PA+GF.

Выводы: Применение полимерных композиционных материалов в узлах трения сельскохозяйственной техники позволяет своевременно изготавливать надежные запасные детали взамен вышедших из строя, тем самым, не допуская срыва работы техники.

В результате применения вышеперечисленных средств и методов, можно сделать следующие выводы, которые в дальнейшей работе будут уточнены:

1. В результате аналитического обзора обоснован выбор композиции на основе полиамида, армированного стекловолокном (PA+GF), модифицированного

термоэластопластом, что позволяет снизить анизотропию свойств и повысить стойкость к динамическим нагрузкам.

2. Применение технологии литья под давлением с рекомендуемыми параметрами (температура зон 200-265°C, температура формы 22-30°C, время цикла 15-21 с) позволяет получать качественные изделия с высокими трибологическими характеристиками.

3. Введение термоэластопласта в композит PA+GF позволяет увеличить ресурс деталей в 1,5-2 раза за счет снижения интенсивности абразивного износа и демпфирования динамических нагрузок.

Список литературы

1. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов в машиностроении. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 301 с.
2. Шитов А.О., Казберов Р.Я., Гончарова Ю.А. Определение эффективной вязкости композиционного материала триботехнического назначения ULTRAN 630CF // Технический сервис машин. – 2022. – №1(146). – С. 105-113. – DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-1-105-113.
3. Габаев А.Х. Применение полимерных материалов в конструкции бороздообразующих рабочих органов сеялки для условий повышенной влажности почвы // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2019. – №2(24). – С. 95-99.
4. Борисов Г.А., Колодяжная И.Н. Применение современных неметаллических композиционных материалов для автотракторной и сельскохозяйственной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2012. – №3(15). – С. 44-45.
5. Гаврилов И.И., Гузаревич С.Н. Применение полимерных материалов при ремонте машин // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. – С. 236-239.
6. Кравченко И.Н., Феськов С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В., Гуцан А.А. Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа // Инженерные технологии и системы. – 2025. – Т. 35, №1. – С. 155-169. – DOI: 10.15507/2658-4123.035.202501.155-169.
7. Денисов В.А., Задорожний Р.Н., Романов И.В., Чумак Н.И., Шитов А.О. Триботехнические свойства материалов для опор скольжения культиваторов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, №4. – С. 13-18. – doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-13-18.

Сведения об авторах:

Суконкин Василий Федорович – инженер, магистрант;

Свиридов Алексей Сергеевич – научный сотрудник.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ

Витол Н.С., Изнаилов Б.М.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов*

Ключевые слова: партионность, машино-часы, сверхдлительная операция, импирический подбор величины партии, одна рабочая смена, стойкость технологического оснащения, технологическая операция.

Аннотация. Логика серийного производства в механообработке диктует свои условия: операционные размеры должны получаться автоматически. Этот принцип экономически эффективен, однако он достижим лишь при абсолютной стабильности системы «станок-приспособление-инструмент-деталь». Главный инструмент контроля здесь – партионность. Обработывая детали партиями на предварительно настроенном оборудовании, мы фактически выводим субъективную ошибку оператора за скобки. Если отталкиваться от ГОСТ 14.004-83, партия объединяет одинаковые предметы труда, запускаемые в производство с общим временем на наладку. В реальности же расчёт размера партии – это та самая точка отсчёта, вокруг которой строится все остальное: от выбора режимов резания и оценки ресурса инструмента до контроля объёмов незавершённого производства и календарного планирования.

IMPROVING TECHNOLOGICAL PREPARATION OF OPERATIONS USING CNC EQUIPMENT

Vitol N.S., Iznirov B.M.

Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov

Keywords: batch of parts, mashino-clock, ultra-long operation, empirical selection of the batch size, one work shift, durability of technological equipment, technological operation.

Abstract. The logic of mass production in mechanical processing dictates its own conditions: operational dimensions must be obtained automatically. This principle is cost-effective, but it can only be achieved with absolute stability in the machine-tool-fixture-tool-part system. The main control tool here is batching. By processing parts in batches using pre-configured equipment, we effectively eliminate the operator's subjective error. According to GOST 14.004-83, a batch is a group of identical workpieces that are launched into production at the same time. In reality, calculating the batch size is the starting point for everything else, from selecting cutting modes and evaluating tool life to controlling the volume of unfinished production and scheduling.

1. Теоретические исследования

Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций (ГОСТ 3.1121-84).

$$K_{30} = O/P, \quad (1)$$

где O – суммарное число различных операций, закрепленных за каждым рабочим местом; P – число рабочих мест, на которых выполняются данные операции.

Принято: $K_{30} \leq 1$ – массовое производство;

$1 < K_{30} \leq 10$ – крупносерийное производство;

$10 < K_{30} \leq 20$ – среднесерийное производство;

$20 < K_{30} \leq 40$ – мелкосерийное производство.

Коэффициент закрепления операций для единичного производства стандартом ГОСТ 3.1121-84 не регламентируется.

Исходя из приведённой формулы (1) для коэффициента закрепления операций $K_{з.о}$, необходимо установить соотношение между трудоемкостью выполнения операций и производительностью рабочих мест (оборудования), предназначенных для реализации данного технологического процесса при условии загрузки этого оборудования в соответствии с нормативными методиками. Однако для длительных операций с ЧПУ эта формула зачастую теряет смысл. Действительно, если, например, за каждым обрабатывающим центром ($P = 1$) закреплена операция ($O = 1$), которую он выполняет с одной деталью в течение нескольких смен (а партию деталей обрабатывает непрерывно в течение длительного срока), то $K_{з.о} = 1$, т.е. производство как бы массовое. В ГОСТ 3.1121-84 $K_{з.о}$ принимается для планового периода 1 месяц, а не нескольких смен. Из приведённого выше примера понятно, что если «сверхдлительная» операция выполняется в течение нескольких смен, то для обработки даже небольшой партии из 20-30 деталей (с учётом пятидневной рабочей недели), эта операция будет закреплена за станком постоянно, более чем на месяц. При этом любому специалисту ясно, что такая организация технологического процесса носит все признаки единичного или мелкосерийного производства. Если же, для уменьшения такта выпуска обработанных деталей, попытаться разместить эту операцию на нескольких обрабатывающих центрах (в некоторых источниках предусматривается $K_{з.о} < 1$), когда детали одного и того же типоразмера одной запускаемой партии обрабатываются сразу на двух и более станках), то $K_{з.о}$ становится существенно ниже единицы, и тогда уже в оценке типа производства наступает когнитивный диссонанс.

Всё это подводит к очевидному итогу: подготовка производства для таких длительных операций требует совершенно иной логики. В подобных жёстких реалиях главным критерием становится не классическое соотношение (1), а грамотный расчёт и оптимизация размера самой партии. Только так можно выстроить адекватный и рабочий техпроцесс.

В современной литературе представлена обширная база методов определения оптимального размера партии [1-3]. Однако существующие математические модели полностью игнорируют фактор продолжительности обработки, в особенности – феномен сверхдлинных технологических циклов. Этот теоретический пробел приводит к тому, что в условиях реального производства предприятия вынуждены прибегать к эмпирическому подбору величины партии, лишь постфактум обосновывая свой выбор контрольными расчётами.

Здесь необходимо определиться с вновь вводимым термином «длительная операция». По-видимому, длительной следует считать операцию, которая «нарушает» изначально формально определенный при разработке технологического процесса тип производства из-за очень большой нормы времени. Введение этого определения необходимо ввиду того, что стандартная методика определения типа производства с использованием формулы (1) не является универсальной, не учитывает новейших тенденций в развитии технологии машиностроения, и её применение в рассматриваемых ниже случаях вызывает много противоречий.

Представляется не требующим доказательства утверждение, что полная величина партии деталей должна быть обработана в течение одной рабочей смены, поскольку прерывание процесса обработки на время передачи смены другому исполнителю автоматически разбивает партию на более мелкие части со всеми вытекающими из этого негативными последствиями. К сожалению, этот аспект организации производства в современной технической и периодической литературе фактически не рассматривается.

Совершенно очевидно, что размер партии должен соответствовать стойкости технологического оснащения (инструмента) при выполнении технологических операций, если его замена и дополнительная наладка не заложены в штучное время ($T_{шт}$). В связи с этим необходимо отметить, что для станков с ЧПУ время на наладку оборудования, ввод программы и т.д. включается в подготовительно-заключительное время ($T_{пз}$), т.е. величина производственной партии (N) при обработке деталей на станках с ЧПУ должна рассчитываться, исходя из величины штучного времени, главной составляющей которого является основное технологическое время T_o :

$$N = \Phi_э / T_{шт}, \quad (2)$$

где $\Phi_э$ – эффективный фонд времени работы оборудования для обработки партии деталей.

Зависимость (2) справедлива в том случае, когда суммарная длительность обработки деталей в количестве, соответствующем предварительно рассчитанной партии, заведомо больше одной рабочей смены. При этом $\Phi_э$ представляет собой часть времени рабочей смены (продолжительность которой 480 мин), непосредственно используемую для обработки деталей, т.е., при восьмичасовой рабочей смене:

$$\Phi_э = 480 - T_{пз}, \quad (3)$$

Выражение (3) также является справедливым в том случае, когда суммарная длительность обработки деталей в количестве, соответствующем предварительно рассчитанной партии, заведомо больше одной рабочей смены. В противном случае выполняемую операцию не следует считать длительной.

В действующих методиках эффективный фонд времени работы оборудования определяется как часть действительного годового фонда времени. Однако в современных условиях в большинстве случаев предприятия организуют работу, исходя не из долгосрочных государственных планов, а в соответствии с полученными заказами. При этом заказчик определяет и период времени ($\Phi_{зак}$), за который предприятие должно изготовить заказанное количество деталей ($Q_{зак}$), и этот период далеко не обязательно должен быть равен или кратен годовому фонду времени. Поэтому количество партий (n) деталей, запускаемых в производство за период заказа, определяется следующим образом:

$$n = Q_{зак} / N. \quad (4)$$

Таким образом, при обработке деталей на станках с ЧПУ, в результате высокой степени концентрации технологических переходов, изначально рассчитанная по существующим методикам партия должна быть разделена на более мелкие партии в соответствии с (2).

Однако внешне непротиворечивое выражение (2) содержит возможность серьезной ошибки, поскольку в рамках длительной операции с ЧПУ имеются более или менее длительные технологические переходы, и среди них, безусловно, есть один или несколько самых длительных переходов, которые могут оказаться лимитирующими по требуемой стойкости инструмента. Имеется ввиду, что при выполнении таких переходов стойкости инструментов может не хватить для обработки всей партии деталей.

Список литературы

1. Болотов М.А., Жидяев А.Н., Проничев Н.Д., Хаймович А.И. Рекомендации по назначению режимов резания и выбору инструментов: методические указания. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 85 с.
2. Пантелеева О.Б., Белякова П.Е., Трубникова Л.В. Модель производства оптимальной партии продукции // Экономический рост как основа устойчивого развития России: сб. науч. статей 7-й Всероссийской научно-практической конференции. – Курск: Финансовый университет при Правительстве РФ, Курский филиал, 2022. – С. 194-197.
3. Панченко Е.С. Серийное машиностроение: управление незавершенным производством // Справочник экономиста. – 2016. – №10. – URL: https://www.profiz.ru/se/10_2016/upravljaem_NZP/

Сведения об авторах:

Витол Никита Сергеевич – студент;

Изнаилов Борис Михайлович – научный руководитель, доцент, профессор кафедры “Технология и системы управления в машиностроении”.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНУСНЫХ СТАКАНОВ С ФЛАНЦЕМ МЕТОДАМИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Кондратьев В.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Ключевые слова: штамповка, САПР, модуль, заготовка, технология, деталь, объем, проектирование, стакан, алгоритм, переходы.

Аннотация. Тема работы посвящена совершенствованию проектирования технологии изготовления деталей способами листовой штамповки. Предложены ряд формул для расчета параметров заготовок и алгоритмы для конструирования переходов для вытяжки конусных стаканов с фланцем и разработан программный модуль формирования чертежей детали и заготовки и карты эскизов, который включен в состав САПР.

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND SOFTWARE MODULE FOR DESIGN OF TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF CONICAL CUPS WITH FLANGE BY METHODS SHEET FORGING

Kondratyev V.I.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsina,

Yekaterinburg

Keywords: stamping, CAD, module, workpiece, technology, part, volume, design, glass, algorithm, transitions.

Abstract. The topic of the work is devoted to improving the design of technology production of parts by sheet forming. A number of formulas for calculating parameters of workpieces and algorithms for designing transitions for drawing conical cups with a flange are proposed, and a software module for generating drawings of a part and workpiece and a sketch map, which is included in CAD, is developed.

Введение

Процесс листовой штамповки связан с необходимостью постоянного освоения все новых видов деталей. Поэтому зачастую отсутствуют методики или имеются пробелы в методиках расчета технологических параметров.

Кроме этого, расчеты многих технологических параметров требуют выполнения весьма значительных вычислений [1-4]. Например, при определении формы и размеров заготовок, а также формы и размеров переходов при условии сохранения постоянства объема.

Совершенствование проектных работ рассматриваемых процессов требует разработки методов проектирования на основе точных зависимостей, что возможно на базе применения вычислительной техники.

Следует отметить, что известные CAD системы не содержат совершенных средств проектирования технологии листовой штамповки процесса вытяжки.

Работа ориентирована на получение зависимостей по расчету параметров заготовки и переходов.

Целью работы является разработка технологии и программного модуля для конструирования и производства многоступенчатых и конусных стаканов с фланцем с углом 30-60°, изготавливаемых методом листовой штамповки в среде SolidWorks (рис. 1).

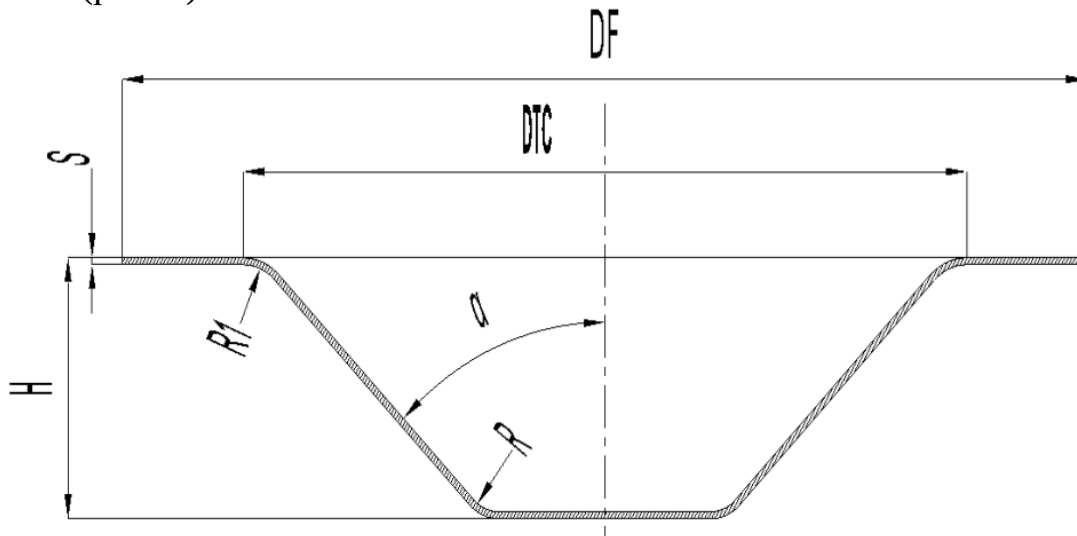


Рис. 1. Параметры конусного стакана: H – высота стакана; S – толщина стенки; H – высота стакана; α – угол конусности; DF – наружный диаметр фланца; DTC – внутренний диаметр фланца; $R1$ – наружный радиус скругления; R – внутренний радиус скругления

Для выполнения данной цели, были поставлены следующие задачи:

- определить размеры круглой заготовки;
- сконструировать промежуточный переход;
- получить зависимости для определения максимального количества ступеней и минимальной высоты ступеней многоступенчатого перехода (рис. 2);
- разработать методику определения числа и параметров переходов;
- создать программный модуль, для реализации вышеуказанных задач.

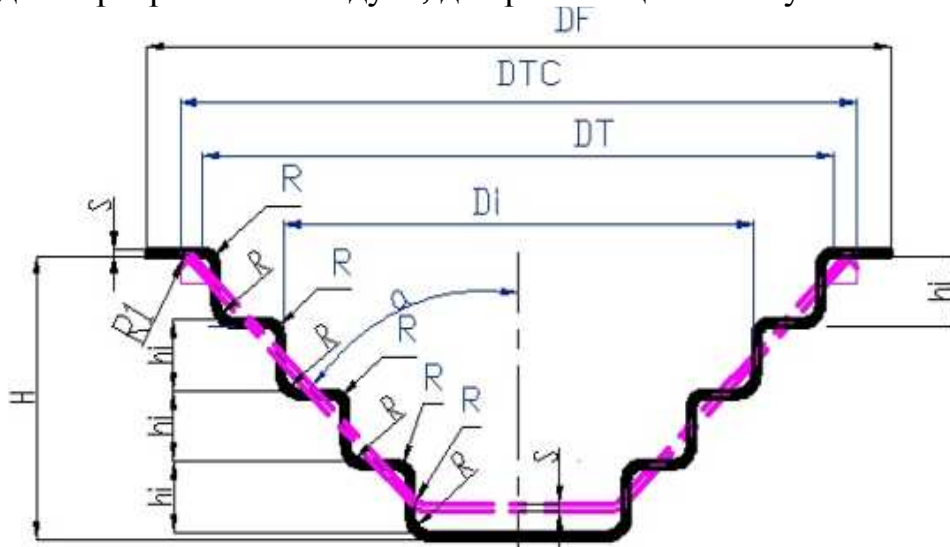


Рис. 2. Многоступенчатая заготовка конусного стакана

Методы решения задачи

Для решения поставленной задачи проектирования технологии процесса вытяжки применены методы моделирования. Так объем в процессе вытяжки не

меняется, толщина стенки остается постоянной у всей детали, принята модель перехода в форме многоступенчатой заготовки. Получены зависимости для расчета объема как отдельных элементов стакана, так и в целом с применением математических методов. Для решения задачи конструирования переходов применены математические методы для получения параметров с учетом постоянства объема.

Определение размеров заготовки

Формой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей принимается круг с толщиной равной толщине стенки стакана. Для определения диаметра заготовки получены зависимости для расчета объема готовой детали

Объем стакана вычисляется определением объема фланца V_{ϕ} плюс объем, образуемый вращением наружного контура $V_{нк}$ стакана без фланца минус объем, образуемый вращением внутреннего контура стакана без фланца $V_{вк}$.

Объем фланца

$$V_{\phi} = \frac{\pi}{2} \cdot S \cdot (DF^2 - DTC^2), \quad (1)$$

Для вычисления объемов, образуемых вращением наружного контура $V_{нк}$ стакана и вращением внутреннего контура стакана $V_{вк}$ получены зависимости.

Объем конической части контура стакана V_k :

$$V_k = \frac{\pi}{3} \cdot [H1 - R \cdot (1 - \sin \alpha)] \cdot \left\{ \left[\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) \right] \cdot \left(\frac{d}{2} + H1 \cdot \tan \alpha \right) + \left(\frac{d}{2} + H1 \cdot \tan \alpha \right)^2 \right\}.$$

Здесь

$$d = DTC - \frac{R \cdot R1}{\cos \alpha} + 2 \cdot \tan \alpha \cdot (R1 - H), \\ H1 = H - R1 \cdot (1 - \sin \alpha).$$

Объем полученный вращением нижней дугой контура стакана $V_{дн}$:

$$V_{дн} = -\pi \cdot \{ (-R) \cdot \left[\left(\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) - R \cdot \cos \alpha \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot R^2 \right] + \right. \\ \left. + R \cdot \sin \alpha \cdot \left[\left(\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) \right) \cdot \left(\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) - R \cdot \cos \alpha \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + R^2 - \frac{1}{3} \cdot R^2 \cdot \sin^2 \alpha \right] + \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \cdot R^2 \cdot \left(\frac{d}{2} + R \cdot \tan \alpha \cdot (1 - \sin \alpha) - R \cdot \cos \alpha \right) \right\}.$$

Объем полученный вращением верхней дугой контура стакана $V_{дв}$:

$$V_{дв} = \pi \cdot R1 \left[\frac{DTC^2}{4} \cdot (1 - \sin \alpha) + \frac{DTC}{2} \cdot R1 \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{DTC}{2} \cdot R1 \cdot \right. \\ \left. \sin \alpha \cdot \cos \alpha + R1^2 \cdot (1 - \sin \alpha) - \frac{R1^2}{3} \cdot (1 - \sin^3 \alpha) \right]$$

Все расчёты для тела образуемого вращением наружного контура $V_{нк}$, необходимо вычислять при

$$R = R + S \text{ и } H = H - S.$$

Суммарный объем, образуемый вращением наружного контура:

$$V_{HK} = V_K + V_{дн} + V_{дв}.$$

Аналогично вычисляется и объем V_{BK} , образованный вращением внутреннего контура конического стакана, но уже при условиях что

$$R = R_1 + S \text{ и } H = H - S.$$

Суммарный объем, образуемый вращением внутреннего контура:

$$V_{BK} = V_K + V_{дн} + V_{дв}.$$

Объем стакана:

$$V_{CT} = V_{\phi} + V_{HK} - V_{BK} + \left[\pi \cdot S \left(\frac{DTC}{2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

$$D_{заг} = 2 \sqrt{\left(V_{CT} / (\pi \cdot S) \right)}. \quad (3)$$

Конструирование промежуточного перехода

Для изготовления рассматриваемого стакана требуется промежуточный переход (рис. 2), представляющий собой многоступенчатую заготовку. Эта задача решается при соблюдении условия постоянства объема.

Конусный стакан, внутренней образующей проходит через центры высоты ступеней h_i , что позволяет получить связи между объектами (рис. 3).

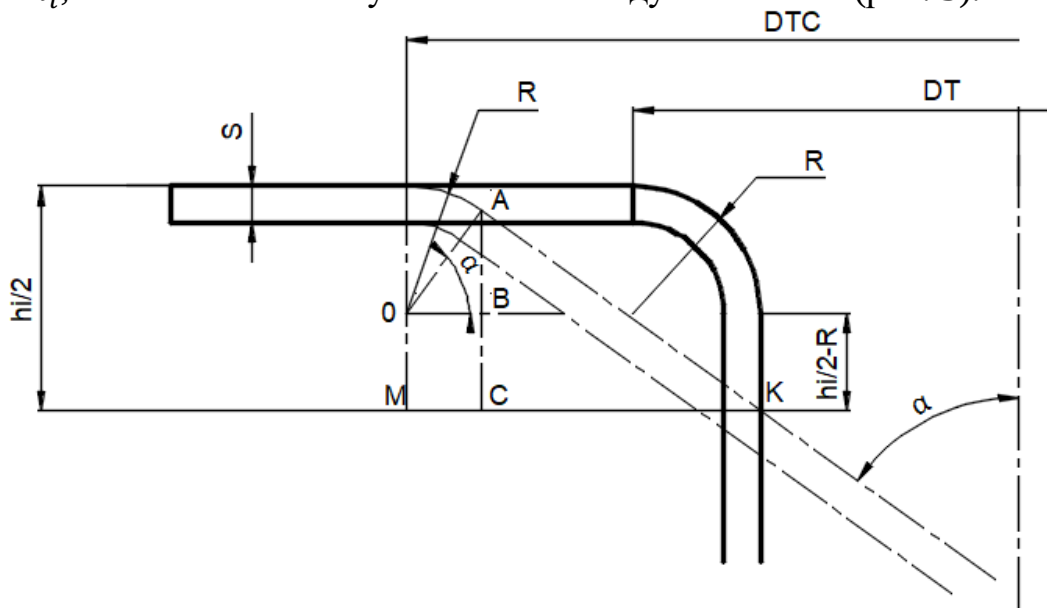


Рис. 3. Связи между объектами

Объем многоступенчатой заготовки V_z и конического стакана V_{CT} равны:

$$V_z = V_{CT}. \quad (4)$$

Требуется найти внутренний диаметр фланца заготовки DT . Для чего необходимо вычислить параметр $МК$. Поэтому определим соотношения с необходимыми геометрическими параметрами, обратившись к (рис. 3). Из треугольника OAB получаем:

$$\frac{OB}{OA} = \cos \alpha. \quad (5)$$

Следовательно, из уравнения (5) получаем:

$$OB = OA \cdot \cos \alpha,$$

$$OB = R \cdot \cos \alpha,$$

Далее необходимо найти СК, для этого рассмотрим прямоугольный треугольник $\Delta АСК$:

$$AC = AB + BC,$$

$$AB = R \cdot \sin \alpha,$$

$$BC = \frac{h_i}{2} - R - S,$$

$$AC = \frac{h_i}{2} - R - S + R \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

Из треугольника АСК найдём СК:

$$\frac{AC}{CK} = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right).$$

$$CK = \frac{AC}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}$$

Подставляя AC из (6) получаем:

$$CK = \frac{\frac{h_i}{2} - R - S + R \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}. \quad (7)$$

Находим МК и выводим формулу для нахождения диаметра DT:

$$МК = ОВ + СК$$

$$МК = R \cdot \cos \alpha + \frac{\frac{h_i}{2} - R - S + R \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}. \quad (8)$$

Находим диаметр DT:

$$\frac{DTC}{2} - \frac{DT}{2} = МК - R.$$

Отсюда:

$$DT = DTC - 2 \cdot (МК - R).$$

Подставляем МК из (8) получаем DT:

$$DT = DTC - 2 \cdot \left(R \cdot \cos \alpha + \frac{\frac{h_i}{2} - R - S + R \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} - R \right). \quad (9)$$

Определим минимальную высоту ступени, которая может равняться двум радиусам, но в таком случае, мы исключаем цилиндрическую составляющую. Дабы это исключить, минимальная высота равна:

$$h_{i \min} = 2R + 1.$$

Если угол $\alpha < \frac{\pi}{4}$, то

$$h_{i \min} = \frac{2R}{\operatorname{tg}(\alpha) + 1}.$$

Отсюда можно найти максимальное число ступеней:

$$n_{\max} = \operatorname{div} \frac{H}{h_{i \min}}.$$

Определим значения диаметров остальных ступеней

Диаметр первой ступени:

$$D_1 = DT - 2R.$$

Подставляя ранее полученное уравнение для DT получаем:

$$D_1 = \left[DTC - 2 \cdot \left(R \cdot \cos \alpha + \frac{\frac{h_i}{2} - R - S + R \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} - R \right) \right] - 2R.$$

Определим приращение радиусов для последующих ступеней:

$$D_i = D_{i-1} - 2\Delta R,$$

$$\Delta R = \frac{h_i}{\operatorname{tg}(\alpha)}.$$

Определим диаметры остальных ступеней:

$$D_i = D_{i-1} - 2 \frac{h_i}{\operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (10)$$

Определим объём многоступенчатой полый заготовки

Объём полый ступенчатой заготовки целесообразно рассматривать состоящим из нескольких простых тел (рис. 4-7).

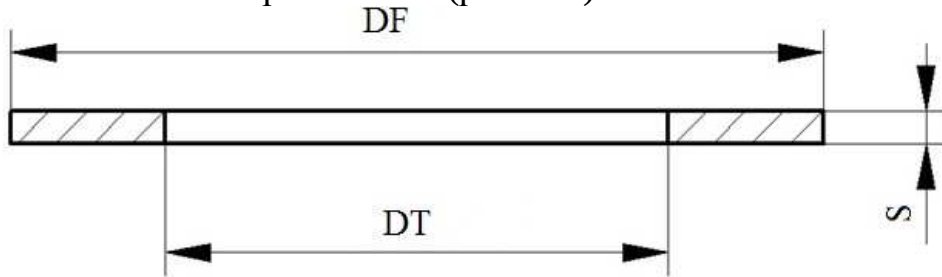


Рис. 4. Фланец

Формула расчёта объёма фланца:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot S}{4} \cdot (DF^2 - DT^2). \quad (11)$$

Формула для расчёта объёма тела, получаемого при вращении вогнутых дуг (рис. 5):

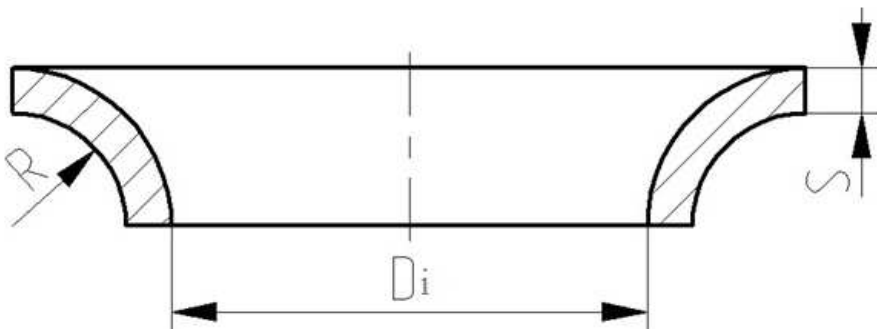


Рис. 5. Тело полученное вращением вогнутых дуг

$$V_2 = \sum_{i=1,2,\dots,n} \frac{\pi^2}{2} \cdot S \cdot \left(\frac{D_i}{2} + S + R \right) \cdot (2 \cdot R + S) - 2\pi RS \cdot (R + S) - \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot S^3. \quad (12)$$

Формула для расчёта объёма полого цилиндра высотой H , толщиной стенки S и внутренним диаметром D_i (6).

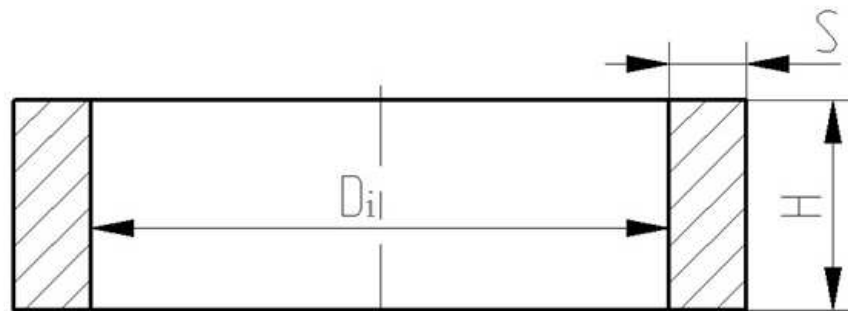


Рис. 6. Полый цилиндр

Формула для расчёта полого цилиндра:

$$V_3 = \pi S H (D_i + S),$$

$$H = h_i - 2R - S,$$

Получаем

$$V_3 = \sum_{i=1,2,\dots,n} \pi S (h_i - 2R - S) (D_i + S). \quad (13)$$

Формула для расчёта объёма тела, получаемого при вращении выпуклых дуг [2] (рис. 7):

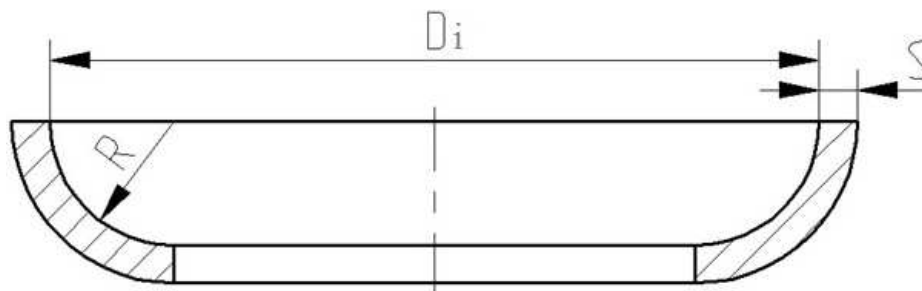


Рис. 7. Тело, полученное при вращении выпуклых дуг

$$V_4 = \sum_{i=1,2,\dots,n} \pi \left\{ \left(\frac{D_i}{2} - R \right)^2 \cdot S + \frac{2}{3} \cdot [(R + S)^3 - R^3] + \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{D_i}{2} - R \right) \cdot [(R + S)^2 - R^2] \right\} - \frac{\pi \cdot (D_i - 2 \cdot R)^2}{4} \cdot S. \quad (14)$$

Последний элемент представляет из себя цилиндр с диаметром \$D_n\$ и высотой равной толщине стакана \$S\$.

Формула расчёта объёма:

$$V_5 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_n - 2 \cdot R)^2 \cdot S. \quad (15)$$

Формула определения объёма многоступенчатой полой заготовки

$$V_z = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5. \quad (16)$$

Приведем алгоритм нахождения высоты многоступенчатой заготовки

Задаем количество ступеней заготовки \$n\$ и высоту заготовки \$H\$.

1. Если \$n > n_{max}\$, то:

1.1.1. Количество ступеней превышает максимальное.

2. Определяем высоту ступени \$h_i = H/n\$.

3. Рассчитываем объем многоступенчатой заготовки \$V_z\$.

4. Если \$V_z < V_{ст}\$, то:

4.1. Выполняем цикл до тех пор, пока \$(V_z < V_{ст})\$.

- 4.1.1. $h_i = h_i + 0.1$.
- 4.1.2. Находим V_z .
- 4.2. $h_{i \min} = h_i - 0.1$.
- 4.3. $h_{i \max} = h_i$.
- 4.4. Выполняем цикл до тех пор, пока $(\text{Abs}(V_z - V_d) > 0.1)$.
 - 4.4.1. $h_i = h_{i \min} + (h_{i \max} - h_{i \min}) / 2$.
 - 4.4.2. Находим V_z при новой высоте V_z .
 - 4.4.3. Если $V_z > V_{\text{ст}}$.
 - 4.4.3.1 $h_{i \max} = h_i$.
 - 4.4.4. Иначе:
 - 4.4.4.1 $h_{i \min} = h_i$.
5. Если $V_z > V_{\text{ст}}$, то:
 - 5.1. Выполнять цикл до тех пор, пока $(V_z > V_{\text{ст}})$.
 - 5.1.1. $h_i = h_i - 0.1$.
 - 5.1.2. Находим V_z .
 - 5.2. $h_{i \min} = h_i - 0.1$.
 $h_{i \max} = h_i$.
 - 5.3. Выполняем цикл до тех пор, пока $(\text{Abs}(V_z - V_d) > 0.1)$.
 - 5.3.1. $h_i = h_{i \min} + (h_{i \max} - h_{i \min}) / 2$.
 - 5.3.2. Находим V_z .
 - 5.3.3. Если $V_z > V_d$.
 - 5.3.3.1. $h_{i \max} = h_i$.
 - 5.3.4 Иначе:
 - 5.3.4.1. $h_{i \min} = h_i$.

Изготовления

В итоге высота заготовки определится: $H = n \cdot h_i$.

Алгоритм определения количества переходов для вытяжки многоступенчатой заготовки с фланцем

1. Определяем возможность осуществить вытяжку многоступенчатой заготовки за одну операцию, для этого определим условный коэффициент вытяжки $m_{\text{ст}}$ по формуле З.М. Кальмановича [1]

$$m_{\text{ст}} = \frac{\frac{h_1 d_1}{h_2 D} + \frac{h_2 d_2}{h_3 D} + \dots + \frac{h_{n-1} d_{n-1}}{h_n D} + \frac{d_n}{D}}{\frac{h_1}{h_2} + \frac{h_2}{h_3} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} + 1}. \quad (17)$$

2. Если $m_{\text{ст}} > m_1$ (допустимый коэффициент вытяжки [1]), то

2.1. Вытяжку осуществляем за один переход.

Иначе

2.2. Выполнять цикл до тех пор, пока $n \neq 1$.

2.2.1. Рассмотрим деталь, состоящую из $n-1$ ступеней, причём объём $n-1$ ступени равен сумме объёмов части $n-1$ и n ступени ранее рассматриваемого n ступенчатого стакана (рис. 8, 9). При определении параметров объединенной ступени используем (11)-(15).

2.2.2. Считаем уже для $n-1$ ступенчатой заготовки условный коэффициент вытяжки $m_{\text{ст}}$ по формуле З.М. Кальмановича.

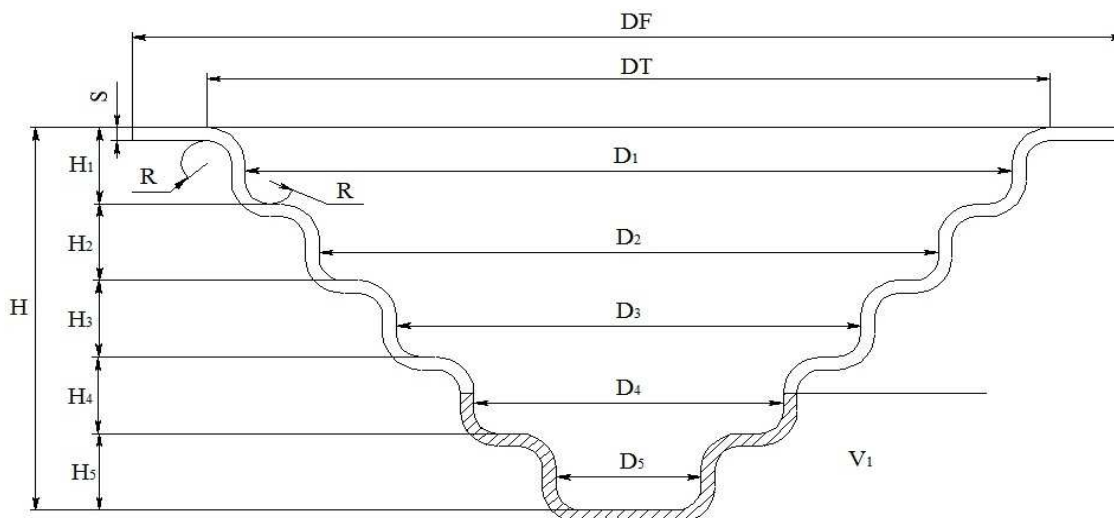


Рис. 8. Перераспределяемый объем 4 и 5 ступени в 4

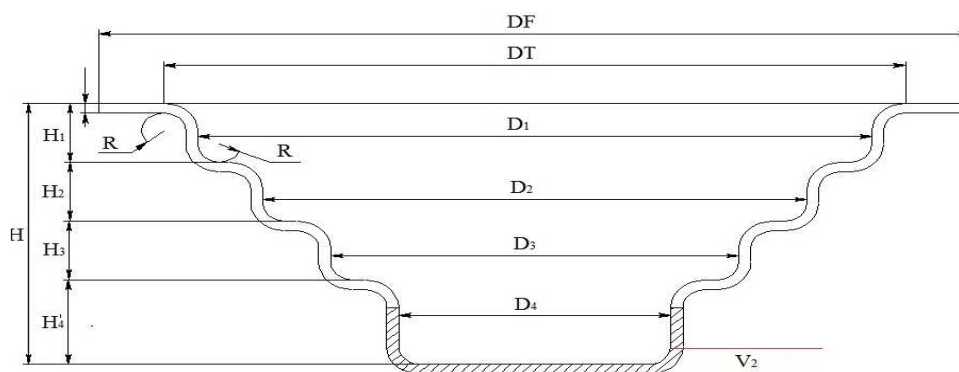


Рис. 9. Перераспределенный объем 4 и 5 ступени в 4

2.2.3. Если $m_{\text{ст}} < m_1$ (допустимый коэффициент вытяжки), то

2.2.3.1. Переходим к пункту 2.2 и $n = n - 1$.

2.2.4. Иначе:

2.2.3.2. Выходим из цикла и рассматриваем ступень $n+1$, объем которой равен сумме объемов последующего многоступенчатого стакана.

2.3. Далее осуществляем поочередную вытяжку ступеней в обратном порядке согласно методике вытяжки цилиндрических деталей с широким фланцем. Определяем количество операций.

Полученные зависимости по определению параметров заготовки и переходов были использованы для создания программного модуля по получению чертежа детали и заготовки и карты эскизов, и он включен в состав САПР проектирования технологии изготовления деталей, получаемых из листа.

Список литературы

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, 1967. – 504 с.
2. Тарновский И.Я., Вайсбурд Г.А., Еремеев Г.А. Автоматизация проектирования технологии горячей штамповки. – М.: Машиностроение, 1969. – 238 с.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.
4. Капустин Н.М., Кузнецов П.М., Схиртладзе А.Г. и др. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учебник для втузов / Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.

Сведения об авторе:

Кондратьев Владимир Иванович – к.т.н., доцент.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КОЛОВРАТНЫХ НАСОСОВ С БОЛЬШИМИ ЗАЗОРАМИ МЕЖДУ КУЛАЧКАМИ ПРИ ПОДАЧЕ ВЫСОКОВЯЗКИХ ПИЩЕВЫХ СРЕД

Наумов В.А., Левичева О.И.

Калининградский государственный технический университет, Калининград

Ключевые слова: коловратный насос, производительность, высоковязкие пищевые среды, зазоры между кулачками, перепад давления, частота вращения ротора.

Аннотация. Выполнено сравнение производительности коловратных насосов со стандартными и с увеличенными зазорами между кулачками. Были использованы находящиеся в открытом доступе результаты заводских испытаний 4-х компаний, выпускающих такие насосы. Производительность зависит от вязкости перекачиваемых пищевых масс, частоты вращения ротора и перепада давления в сети. Установлено, что большие зазоры при высоких перепадах давления снижают подачу высоковязких пищевых сред из-за роста обратного перетекания перекачиваемой среды через увеличенные зазоры.

PERFORMANCE OF ROTARY LOBE PUMPS WITH LARGE CLEARANCES BETWEEN CAMS WHEN DELIVERING HIGHLY VISCOUS FOOD MEDIA

Naumov V.A., Levicheva O.I.

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad

Keywords: rotary lobe pump, performance, high-viscosity food media, clearances between cams, pressure drop, rotor speed.

Abstract. A comparison of the rotary lobe pumps performance with standard and increased clearances between lobes was conducted. Publicly available factory test results from four companies that manufacture these pumps were used. Performance depends on the viscosity of the pumped food products, the rotor speed, and the pressure drop in the system. It was found that large clearances with high pressure drops reduce the flow rate of highly viscous food products due to increased backflow of the pumped product through the increased clearances.

Во многих технологических линиях по производству высоковязких пищевых продуктов применяются объемные насосы. Традиционно в таких технологических трубопроводах использовались винтовые или шестеренные насосы. В известной монографии А.В. Горбатова [1] было показано, что коловратный насос (КН) позволяет наилучшим образом сохранить структуру высоковязких пищевых продуктов при достаточно высоких показателях энергетической эффективности. Однако стоимость КН из-за особенностей конструкции выше других насосов, поэтому долгое время они не имели широкого распространения. В настоящее время КН все больше применяются при транспортировании тех полуфабрикатов, для которых критически важно сохранить структуру. Исследование проблем повышения эффективности применения КН для межоперационного транспортирования высоковязких пищевых сред является весьма актуальным.

Многие компании, выпускающие КН, размещают в открытом доступе, на своих Интернет-ресурсах [2-4] результаты заводских испытаний с указанием всех условий проведения опытов. Результаты испытаний показали, что

производительность КН зависит от динамической вязкости перекачиваемых пищевых масс (ДВП), частоты вращения ротора (ЧВР), перепада давления в сети (ПДС). В [5] был выполнен сравнительный анализ производительности КН указанных компаний, но только для агрегатов со сравнительно небольшими зазорами между кулачками. Тогда как в промышленности находят применение КН с увеличенными зазорами для транспортирования пищевых масс с определенными включениями, например, плавленого сыра с грибами [6].

В [7] была получена формула для расчета подачи КН серии TUL [8] с большими зазорами между кулачками:

$$Q = V \cdot (n - A \cdot p / \eta^z), \quad \eta = \mu / \mu_w, \quad p = \Delta P / P_A, \quad (1)$$

где Q – подача КН, $\text{дм}^3/\text{с}$; V – рабочий объем КН, дм^3 ; n – ЧВР, с^{-1} ; ΔP – ПДС, кПа ; P_A – атмосферное давление, кПа ; μ – ДВП, $\text{Па} \cdot \text{с}$; μ_w – динамическая вязкость воды при 20°C , $\text{Па} \cdot \text{с}$; A, z – эмпирические константы, найденные по результатам испытаний [8]. Например, для TUL-125 значения $A = 20,37$; $z = 0,625$.

Цель работы – сравнить подачу высоковязких пищевых сред насосами со стандартными и с увеличенными зазорами между кулачками.

Для сравнения были выбраны КН, показанные в таблице 1, с близкими величинами рабочего объема ($\Delta P_m, \mu_m$ – максимально допустимые ПДС и ДВП, соответственно).

Табл. 1. Технические параметры КН четырех компаний

Марка КН	Компания	$V, \text{дм}^3$	$\Delta P_m, \text{кПа}$	$\mu_m, \text{Па} \cdot \text{с}$
034-WCB	Waukesha Cherry-Burrell [2]	0,227	750	200
PLP 2-1.5	Pomac Industries Group [3]	0,220	1500	100
Vitalobe-215	KSB Aktiengesellschaft [4]	0,244	1800	80
TUL-25	Donjoy Technology Co., Ltd. [7]	0,240	1200	30

По таблице 1 рабочий объем рассматриваемых КН, хотя и близок, но различается. Для сравнения, как в [5], перейдем к безразмерной подаче:

$$q = Q / (V \cdot n_m), \quad n_m = 16,67 \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

На рисунке 1 приведено сравнение q КН при $\eta = 200, n = 0,5 \cdot n_m$.

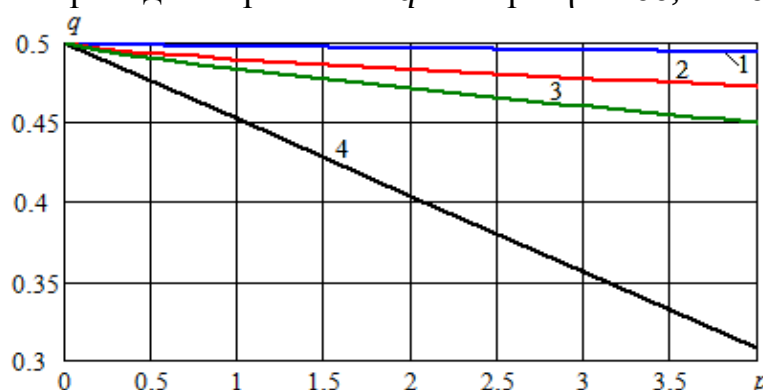


Рис. 1. Зависимость безразмерной производительности КН 4-х компаний от ПДС:
1 – 034-WCB; 2 – PLP 2-1.5; 3 – Vitalobe-215; 4 – TUL-25

У КН серии TUL из-за больших зазоров влияние вязкости на производительность остается заметным вплоть до $\eta = 10000$. Лишь при больших величинах ДВП подача достигает теоретического значения и перестает зависеть от

p . У насосов [2, 3] такой эффект наблюдается уже при $\eta \geq 300$, а у [4] – при $\eta \geq 500$ при стандартных зазорах и при $\eta \geq 1000$ – при увеличенных зазорах. Причина – в росте обратного перетекания перекачиваемой среды через зазоры.

Таким образом, безразмерная производительность TUL-25 много меньше, чем у 3-х других насосов. Так при $p=4$ у КН 034-WCB производительность составляет 98,9% максимальной теоретической подачи, PLP 2-1.5 – 94,6%, Vitalobe-215 – 90,1%. Тогда как у TUL-25 лишь 61,6%. При проектировании систем трубопроводного транспортирования высоковязких пищевых сред с $p > 1$ необходимо учитывать снижение подачи КН из-за обратного перетекания жидкости через большие зазоры между кулачками.

Список литературы

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов: монография. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
2. Waukesha Cherry-Burrell. Rectangular flange positive displacement pumps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.spxflow.com/waukesha-cherry-burrell/products/>
3. Pomac Industries Group. Food beverages lobe Pump PLP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pomacpumps.com/>
4. KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/>
5. Наумов В.А., Левичева О.И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред // Известия КГТУ. – 2025. – №78. – С. 67-80.
6. Левичева О.И. Усовершенствование аналитической модели нагрузочных характеристик пищевых коловратных насосов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 18-27.
7. Наумов В.А., Левичева О.И. Влияние вязкости пищевых масс на подачу коловратных насосов китайского производства // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов». – Керчь: Изд-во Керченского гос. морского техн. ун-та, 2025. – С. 255-260.
8. Donjoy Technology Co., Ltd. Food Lobe Pump [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://donjoytechnology.com/product/>

Сведения об авторах:

Наумов Владимир Аркадьевич – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник;

Левичева Оксана Игоревна – аспирант.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПО НАГРУЗКАМ ЦИКЛОИДАЛЬНОЙ СЕКТОРНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Иванцов А.Д., Синицына Ю.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: планетарно-цевочный редуктор, секторная передача, циклоидальное зацепление, распределение нагрузки, контактные напряжения, делительный диаметр.

Аннотация. В данной статье рассмотрена возможность проектирования циклоидальной секторной передачи, введены новые параметры, характеризующие передачу, описаны этапы ее проектирования, проведено сравнение нагрузочной способности такой передачи с планетарно-цевочной и сделан вывод о необходимости увеличения размера передачи для достижения необходимой прочности.

EQUIVALENT IN LOADS CYCLOIDAL SECTOR GEAR DESIGN POSSIBILITY ASSESSMENT

Ivantsov A.D., Sinitsyna Yu.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: cycloid speed reducer, sector gear, cycloidal gearing, force distribution, contact stresses, pins diameter.

Abstract. This article considers the possibility of designing a cycloidal sector gear, introduces new parameters that characterize the gear, describes the stages of its design, compares the load capacity of such a gear with a cycloidal gear, and concludes that it is necessary to increase the size of the transmission to achieve the required strength.

Циклоидальные передачи нашли широкое применение в механизмах, передающих большие нагрузки. Благодаря многопарности зацепления и другим свойствам, в таких передачах удается достичь компактности конструкции, больших передаточных чисел, малого люфта и высокого показателя коэффициента полезного действия. Особенности и применение таких передач рассмотрены в работе [1].

Многопарность зацепления является серьезным преимуществом циклоидальной передачи в сравнении с другими, но в то же время создает статически неопределимую систему, которая требует более высокой точности изготовления деталей и сборки. Рассмотрим конструкцию передачи, в которой обойма разбита на несколько равных частей, каждая из которых взаимодействует только со своим сателлитом. В этом случае можно говорить о секторной передаче. Она имеет меньше граничных условий (цевок, контактирующих с сателлитом), следовательно требует меньшей точности изготовления. Сокращение числа цевок внутри каждой части может позволить еще сильнее упростить процесс производства и сборки передачи. Таким образом мы получаем передачу, которая при прочих равных имеет более простую для изготовления и сборки конструкцию. Появляется необходимость сравнить конструкции этих передач (рис. 1) по нагрузочной способности, чтобы оценить возможность их взаимозаменяемости.

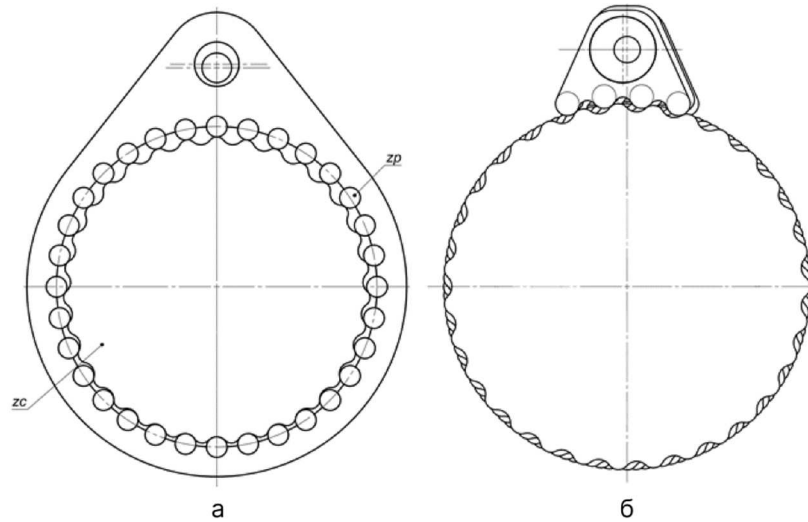


Рис. 1. Вид конструкции циклоидальной (а) и секторной (б) передач

Проектирование секторной передачи основано на нескольких этапах, описанных в таблице 1 и наглядно изображенных на рисунке 2, для этого вводятся параметры: z_i – количество секторов, z_o – количество цевок в одном секторе.

Табл. 1. Этапы проектирования секторной передачи

Этап	Действие
1 $\Rightarrow$ 2	Разделение обоймы ПЦР на z_i секторов
2 $\Rightarrow$ 3	Сокращение количества цевок в каждом секторе до значения z_o
3 $\Rightarrow$ 4	Преобразование передачи путем размножения сателлита и поворота каждой пары сателлит-сектор для размещения всех секторов на одном валу

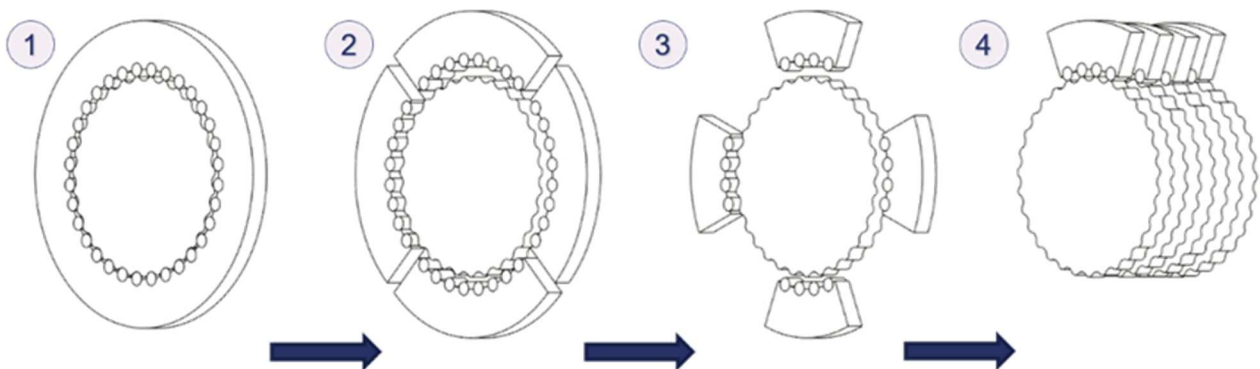


Рис. 2. Этапы проектирования секторной передачи

Для оценки сил в точках контакта цевок и сателлита была использована существующая методика, описанная в работах [2, 3]. В качестве примера будем рассматривать редуктор с передаточным числом 41 и параметрами $z_i = 3$ и $z_o = 7$. В результате расчета силы в зацеплении ПЦР и секторной получим график изменения силы на одной цевке за один оборот эксцентрикового вала (рис. 3). Отметим заметное превышение силы в секторной передаче над полной, которое численно равно 2,4.



Рис. 3. Сила в одной цевке за один оборот эксцентрика

Для полноты анализа рассмотрим также контактные напряжения в месте контакта сателлита и цевки. График изменения напряжения за один оборот эксцентрикового вала представлен на рисунке 4. Здесь тоже можно отметить заметное превышение напряжения в секторной передаче над полной, которое численно равно 1,68.

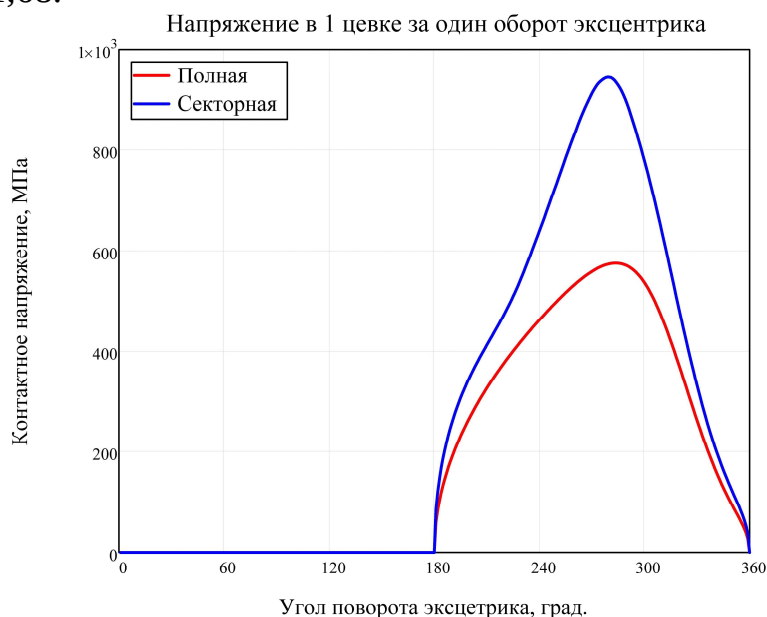


Рис. 4. Контактное напряжение в одной цевке за один оборот эксцентрика

Делительный диаметр циклоидальных передач рассчитывается из допущения, что одновременно в зацеплении находится половина от общего числа цевок. В секторной передаче общее число цевок сокращается и наблюдается рост возникающих в передаче нагрузок. Возникает предположение, что увеличение делительного диаметра передачи может позволить снизить уровень нагрузок до значений в полной передаче, что подтверждается результатами расчета и приведенном графике (рис. 5).

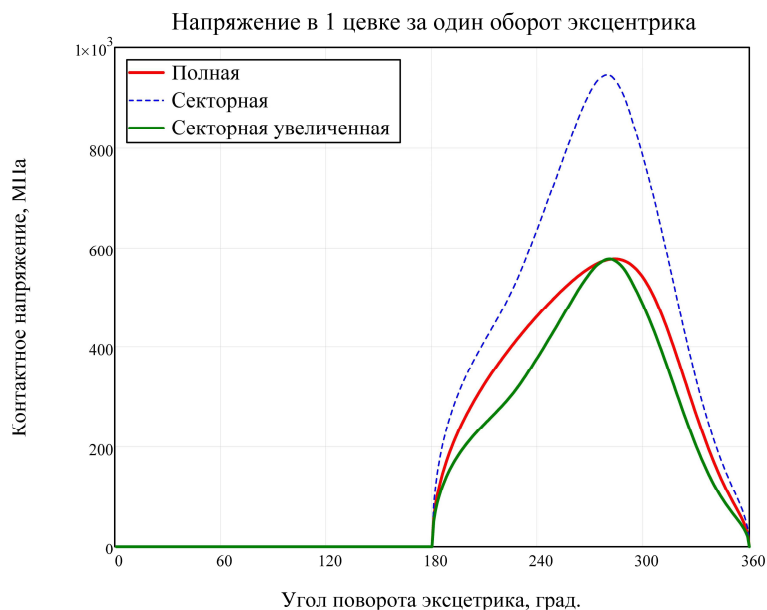


Рис. 5. Контактное напряжение в одной цевке за один оборот эксцентрика для увеличенной секторной передачи

В заключение этой работы можно сделать вывод, что существует возможность модернизировать циклоидальную передачу путем разбиения обоймы на сектора и сокращения числа цевок внутри каждого сектора, но для получения равной с полной передачей по прочности конструкции необходимо увеличивать делительный диаметр передачи.

Список литературы

1. Ермолаев М.М., Сеницына Ю.В. Исследование влияния податливости подшипника на работу планетарно-цевочной передачи // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – №4(721). – С. 15-22.
2. Ермолаев, М.М., Чиркин А.В. Расчет Планетарно-цевочных редукторов. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 62 с.
3. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи. – Л.: Машиностроение, 1966. – 308 с.

Сведения об авторах:

Иванцов Арсений Денисович – магистрант;

Сеницына Юлия Владимировна – к.т.н., профессор, доцент кафедры основ конструирования машин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ТРЕНИЯ ПОЛИАМИДА С РАЗЛИЧНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ ПРИ ПОДАЧЕ В ЗОНУ ТРЕНИЯ АБРАЗИВНО-МАСЛЯННОЙ СУСПЕНЗИИ

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: полиамид, графит, дисульфид молибдена, гидравлическое масло, абразивно-масляная суспензия, момент трения, сталь 45.

Аннотация. В данной работе приведены результаты испытаний по определению момента трения образцов полиамида в паре со сталью 45. Исследование трибологических характеристик исходного полиамида и его композитов, наполненных графитом и дисульфидом молибдена, осуществлялось по схеме: «колодка (полимер) – ролик (сталь 45)» с непрерывной подачей абразивно-масляной суспензии в зону контакта. Результаты показали, что графитонаполненные образцы имели более низкий момент трения, чем образцы исходного и наполненного дисульфидом молибдена полиамида

DETERMINATION OF THE FRICTION MOMENT OF POLYAMIDE WITH VARIOUS FILLINGS WHEN AN ABRASIVE-OIL SUSPENSION IS SUPPLIED TO THE FRICTION ZONE

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: polyamide, graphite, molybdenum disulfide, hydraulic oil, abrasive-oil suspension, friction moment, steel 45.

Abstract. This paper presents the results of tests to determine the friction moment of polyamide samples paired with 45 steel. The study of the tribological characteristics of the original polyamide and its composites filled with graphite and molybdenum disulfide was carried out using the following scheme: “block (polymer) – ring (45 steel)” with a continuous supply of abrasive-oil suspension into the contact zone. The results showed that graphite-filled samples had a lower friction torque than the samples of the original and molybdenum disulfide-filled polyamides.

Полиамид-6 является инженерным полимером, сочетающим в себе высокие физико-механические характеристики и устойчивость к агрессивным средам. Данные полимеры нашли широкое применение в узлах трения. С помощью наполнения полимерной матрицы различными композитами становится возможным изменение трибологических свойств полимеров. Но несмотря на большое количество опубликованной научной литературы, остаются нерешенными вопросы, поведения полимеров при контакте со стальными поверхностями особенно в условиях абразивного износа.

Для определения трибологических характеристик полимеров были изготовлены образцы полиамида-6 (ПА-6) [1], модифицированные полиуретаном и содержавшие 1-5% стекловолокна (СВ) диаметром 10 мкм. Перед испытаниями полимерные заготовки подверглись механической обработке, в результате которой

были получены образцы с размерами 25×25×15 мм. Испытания на трение и износ были проведены на возвратно-поступательной машине трения с применением схемы: «палец (сталь) – плоскость (полимер, композит)» при нагрузке 78,5-157 Н и скорости перемещения контробразца 0,083-0,25 м/с в течение 60 минут. Пальчиковый контробразец диаметром 10,2 мм был изготовлен из нержавеющей стали (62 HRC). Длина и радиус скругления пальчикового образца составляли 15 и 4,75 мм. Длина хода составила 10 мм. По завершении испытаний при нагрузке 157 Н и скоростью перемещения контробразца 0,16 м/с получено, что наименьшим коэффициентом трения 0,077 обладали образцы, содержавшие 5% СВ, что в 2,22 раза ниже, чем у образцов не содержавших СВ 0,171. Стоит отметить, что удельная интенсивность изнашивания $4,08 \times 10^{-5}$ мм³/Нм образцов, содержавших 5% СВ была в 4,33 раза меньше, чем у образцов не содержавших СВ $17,7 \times 10^{-5}$ мм³/Нм. Установлено, что армирование полиамида стекловолокном эффективно снижает коэффициент трения и повышает износостойкость. Также замечено, что с увеличением скорости перемещения контробразца коэффициент трения полимерных образцов уменьшался.

Образцы диаметром 20 и толщиной 2 мм были изготовлены из ПА-6 (1,14 г/см³) [2] наполненного 10-30 мас.% полифенилсульфидом (ПФС) (1,35 г/см³). Триботехнические испытания проходили по схеме: «шар (сталь) – диск (полимер, композит)» при нагрузке 10-20 Н и частоте вращения диска 500-1500 об/мин в течение 40 минут. Шар, изготовленный из нержавеющей стали, имел диаметр 6 мм. По завершении испытаний найдено, что наименьший коэффициент трения 0,35 имели образцы, содержавшие 30 мас.% ПФС, что в 1,18 раз иже, чем у образцов, не наполненных ПФС 0,415. Отмечено, что самая низкая удельная интенсивность изнашивания $3,85 \times 10^{-5}$ мм³/Нм замечена у образцов, не наполненных ПФС что в 3,42 раза меньше, чем у образцов, содержавших 30 мас. % ПФС $13,18 \times 10^{-5}$ мм³/Нм. Установлено, что с увеличением содержания ПФС коэффициент трения композитов уменьшался. При этом при повышении нагрузки удельная интенсивность изнашивания увеличивалась.

Композиты, изготовленные из ПА-6 (4-6 нм, 3,05-3,3 г/см³) [3] с добавлением в матрицу 0,25-1,0 мас. % алмазных наночастиц, несущих на поверхности карбоксильные группы (ND-COOH) и 0,25 мас. % алмазных наночастиц с присоединенными молекулами этилендиамина (ND-EDA) были выбраны в качестве образцов для проведения испытаний на трение и износ. Испытания для определения триботехнических характеристик были проведены по схеме: «палец (полимер, композит) – диск (сталь)» при нагрузке 20-80 Н и скорости скольжения 0,26 м/с. Путь трения составил 2 км. Пальчиковые полимерные образцы имели диаметр 5 и высоту 15 мм. Диск был изготовлен из стали 52100 (64 HRC) и имел шероховатость поверхности Ra 0,4 мкм. По завершении испытаний было установлено, что при нагрузке 80 Н наименьший коэффициент трения 0,35 имели образцы, содержавшие 1,0 мас.% ND-COOH, что в 2,68 раз ниже, чем у образцов исходного ПА-6 0,94. Отмечено, что самая низкая удельная интенсивность изнашивания $6,6 \times 10^{-6}$ мм³/Нм также имели образцы, содержавшие 1,0 мас.% ND-COOH, что в 1,47 раз меньше, чем у образцов исходного ПА-6 $9,7 \times 10^{-6}$ мм³/Нм. Стоит заметить, что образцы, содержавшие 0,25 мас % ND-EDA показывали на 20% более низкий коэффициент трения 0,78, чем образы исходного ПА-6. При

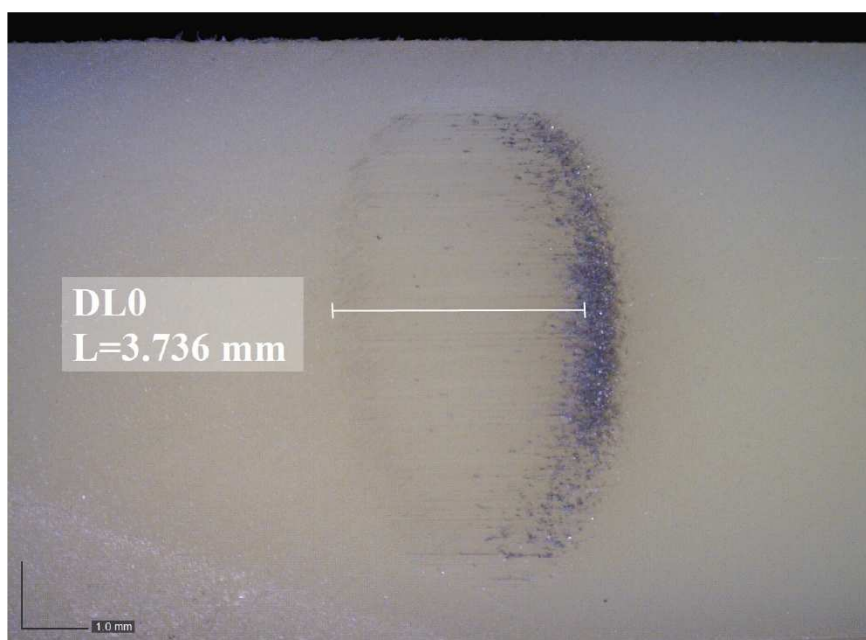
этом удельная интенсивность изнашивания $7,1 \times 10^{-6}$ мм³/Нм образцов, содержащих 0,25 мас. % ND-EDA была на 7,5% больше, чем у образцов, содержащих 1,0 мас. % ND-COOH. Также получено, что повышением нагрузки коэффициент трения увеличивался.

Целью работы являлось определение момента трения полиамидов с различным наполнением при трении о ролик из стали 45 при непрерывной подаче в зону контакта абразивно-масляной суспензии.

Образцы полимеров с размерами 20×10×10 мм были изготовлены из исходного (ПА-6), графитонаполненного (ПА-6Гр) и модифицированного дисульфидом молибдена (ПА-6MoS₂) полиамида. Испытания для определения коэффициента трения были проведены по схеме: «колодка-ролик» при нагрузке 400 Н и скорости скольжения 0,785 м/с с непрерывной подачей абразивно-масляной суспензии. Ролик диаметром 50 и высотой 10 мм был изготовлен из стали 45 (145 HV_{0,1}). Суспензия на основе гидравлического масла МГЕ-10А, содержащая 3 мас. % порошок карбида кремния (М28, 20 мкм), подавалась со скоростью 40±5 капель/мин. Перед каждым испытанием образующая поверхность ролика обрабатывалась наждачной бумагой зернистостью Р180.

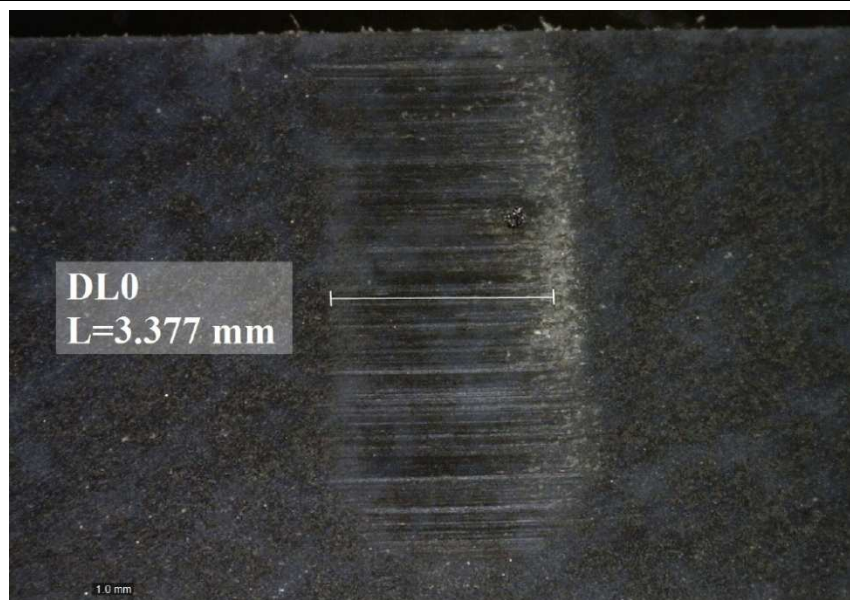
На рисунке 1 представлены снимки поверхностей трения образцов полиамида после испытаний. Изучение морфологии поверхностей трения полимерных образцов позволило установить, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание.

На рисунке 2 представлены графики момента трения полиамидов. Отмечено, что момент трения 0,787 Нм образцов ПА-6Гр был на 8,7 и 13,9% более низкий момент трения чем образцы ПА-6 0,856 Нм и ПА-6MoS₂ 0,897 Нм.

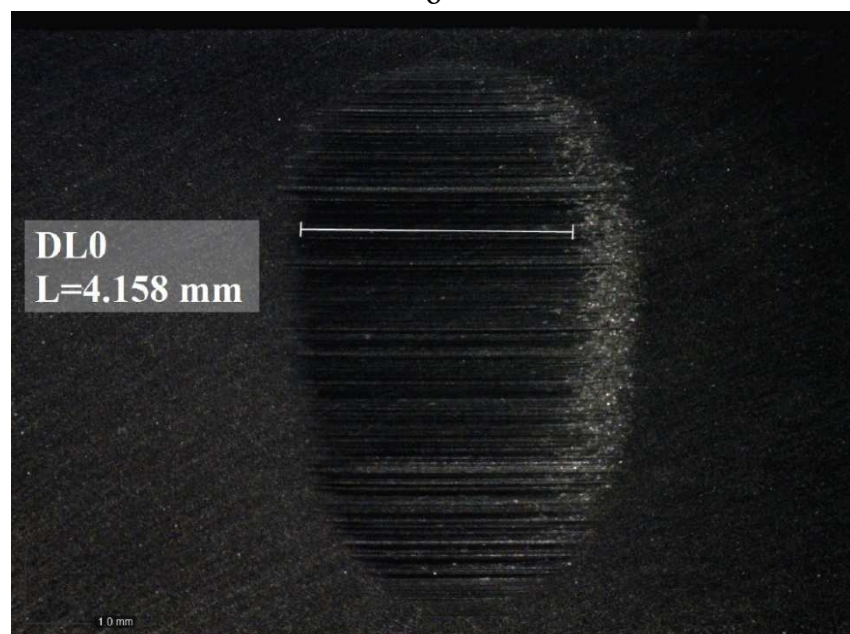


а

Рис. 1 Снимки поверхностей трения полимеров после испытаний: а – ПА-6

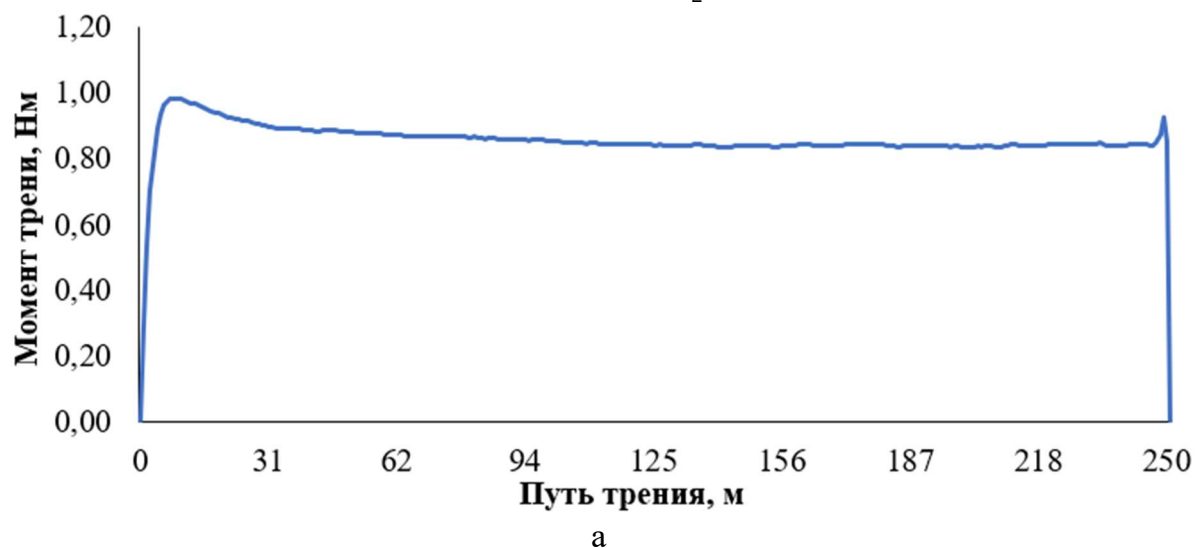


б



в

Рис. 1 Снимки поверхностей трения полимеров после испытаний: б – ПА-6Гр, в – ПА-6MoS₂



а

Рис. 2 Графики момента трения полиамидов: а – ПА-6

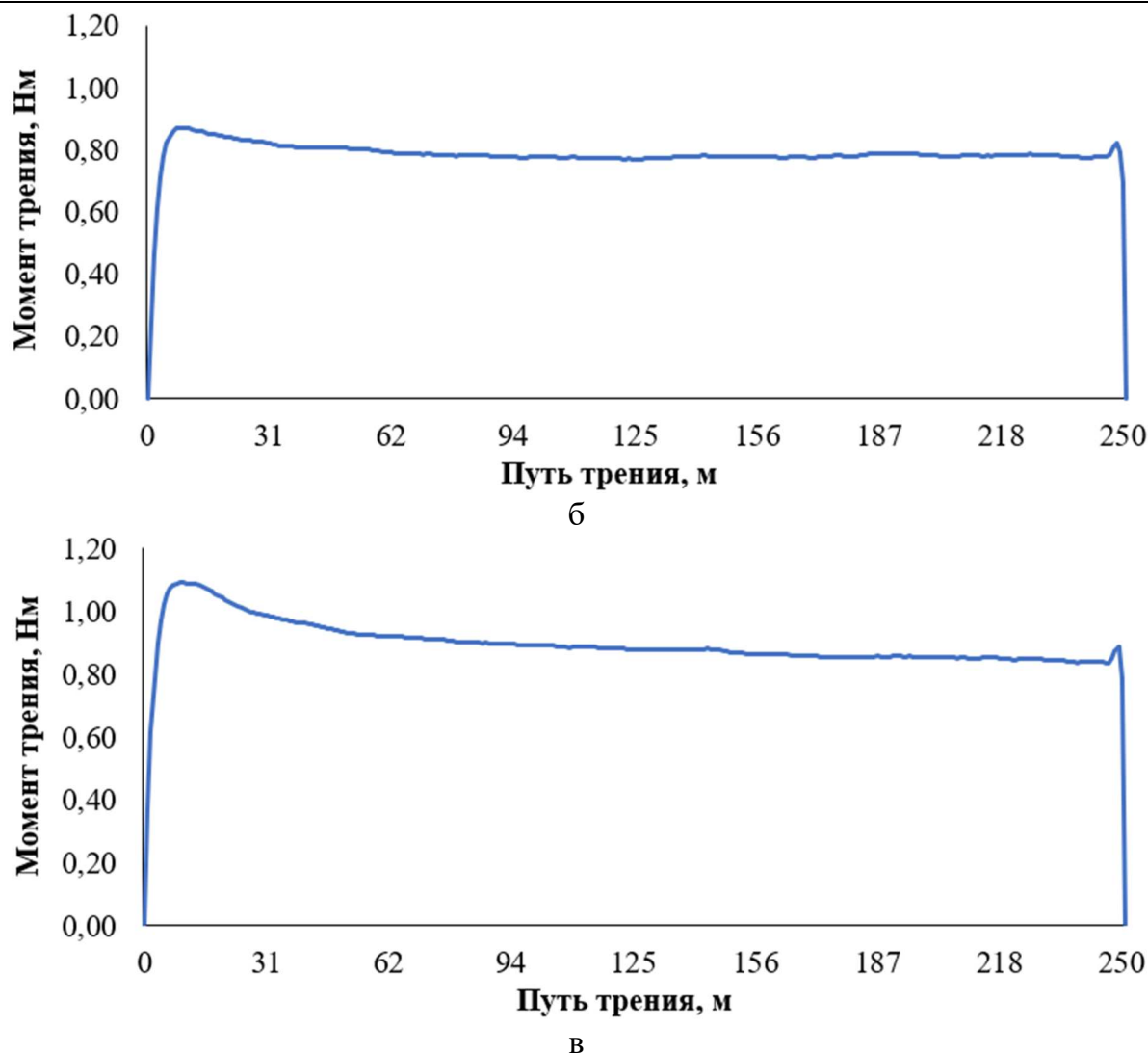


Рис. 2 Графики момента трения полиамидов: б – ПА-6Гр, в – ПА-6MoS₂.

Выводы. По результатам испытаний установлено, что образцы ПА-6Гр имели на 8,7 и 13,9% более низкий момент трения, чем образцы ПА-6 и ПА-6MoS₂. Найдено, что основным механизмом изнашивания образцов являлось микрорезание.

Список литературы

1. Li D. X., Deng X., Wang J., Yang J., Li X., Mechanical and tribological properties of polyamide 6-polyurethane block copolymer reinforced with short glass fibers // *Wear*. 2010, vol. 269, pp. 262-268. DOI: 10.1016/j.wear.2010.04.004.
2. Zhou S., Zhang Q., Huang J., Ding D., Friction and wear behaviors of polyamide-based composites blended with polyphenylene sulfide // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2012, vol. 27(7), pp. 977-991. DOI: 10.1177/0892705712461516.
3. Karami P., Shojaei A., Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles // *Tribology International*. 2017, vol. 115, pp. 370-377. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.003.

Сведения об авторах:

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

Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ВОЗВРАТНО- ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ

Бирюков В.П., Якубовский А.А.

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

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, полиэфиримид, полифенилсульфид, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, возвратно-поступательное трение.

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты по определению коэффициентов трения и интенсивности изнашивания образцов полимеров (полифенилсульфида, полиэфиримида, полиэфиркетона и сверхвысокомолекулярного полиэтилена) на возвратно-поступательной машине трения с применением смазки «Литол-24». Определено, что образцы полифенилсульфида имели наименьшую интенсивность изнашивания $5,8 \times 10^{-3}$, но наименьший коэффициент трения 0,031, был у образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а его интенсивность изнашивания в 2,2 раза больше, по сравнению с полифенилсульфидом. Образцы полиэфирэфиркетона и полиэфиримида обладали большей износостойкостью в 1,4-2,2 раза в сравнении с образцами сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

DETERMINATION OF WEAR INTENSITY AND FRICTION COEFFICIENTS OF POLYMERS DURING RECIPROCATING MOTION OF SAMPLES

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.

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

Keywords: polymers, poly etheretherketone, polyetherimide, polyphenylsulfide, ultra-high molecular weight polyethylene, coefficient of friction, wear rate, reciprocating friction.

Abstract. This paper examines the results of determining the coefficients of friction and the intensity of wear of polymer samples of polyphenyl sulfide, polyetherimide, polyether ketone and ultrahigh molecular weight polyethylene) on a reciprocating friction machine using Litol-24 lubricant. It was determined that the samples of polyphenyl sulfide had the lowest wear rate of 5.8×10^{-3} , but the lowest coefficient of friction of 0.031 was in the samples of ultrahigh molecular weight polyethylene, and its wear rate was 2.2 times higher than that of polyphenyl sulfide. The samples of polyesteresterketone and polyetherimide had a higher wear resistance of 1.4-2.2 times compared with the samples of ultra-high molecular weight polyethylene.

В современном машиностроении полимеры и полимерные композитные материалы (ПКМ) заняли прочные позиции и продолжают расширять сферу влияния. Их востребованность обусловлена комплексным решением ряда задач: от снижения веса конструкций до упрощения технологических процессов и сокращения затрат.

Образцы сверхвысокомолекулярного [1] полиэтилена (СВМПЭ) были улучшены за счет добавления SiO_2 , SiO_2 (570) и SiO_2 (550) и изготовлены с размерами $14 \times 10 \times 10$ мм. Трибологические испытания проводили на возвратно-поступательной машине трения по схеме «шар (ZCuSn10Zn2 , диаметром 6 мм) –

плоскость (полимеры и композиты)» при нагрузке 10 Н и 40 Н, скорости скольжения 1 Гц, длиной хода 8 мм, времени испытания 20 мин. При 10 Н средние значения коэффициента трения для СВМПЭ, СВМПЭ/ SiO₂, СВМПЭ/ SiO₂ (570) и СВМПЭ/ SiO₂ (550) составили 0,018, 0,035, 0,045 и 0,059 соответственно. При 40 Н средние значения коэффициента трения составили 0,012, 0,022, 0,054 и 0,069. При нагрузке 10 Н скорости износа СВМПЭ, СВМПЭ/ SiO₂, СВМПЭ/ SiO₂ (570) и СВМПЭ/ SiO₂ (550) составили 2,78, 2,34, 1,71 и $1,40 \times 10^4$ мм³/Н·м соответственно. При нагрузке 40 Н соответствующие скорости износа материалов составили 9,06; 7,6; 7,03 и $6,17 \times 10^4$ мм³/Н·м. Добавление SiO₂ снизило скорость износа полимеров, и СВМПЭ/SiO₂(550) показал самую низкую скорость износа.

Полимеры и композиты [2] на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) были напечатаны на 3-D принтере с размерами 8×8×40 мм и имели следующий состав ПЭЭК-100%, ПЭЭК и углеродное волокно (SCF)-10%, ПЭЭК и SCF-10% и нитрид кремния (Si₃N₄)-2%, ПЭЭК и SCF-10% и (Si₃N₄)-2% и дисульфид молибдена (MoS₂)-3%. Твердость чистого ПЭЭК по Шору-D составила 76,8, что на 3,4 %, 5,6% и 9,5% ниже композитов ПЭЭК/10SCF, ПЭЭК/10SCF/2Si₃N₄ и ПЭЭК/10SCF/2Si₃N₄/3MoS₂ соответственно. Трибологические испытания проводили на возвратно-поступательной машине трения по схеме «шар (GCr15, диаметр 10 мм) – плоскость (полимер, композиты)» при нагрузке 50 Н, 75 Н и 100 Н, скорости скольжения 0,3 м/с и временем 40 мин. Композит SCF/Si₃N₄/MoS₂/PEEK продемонстрировал наилучшие общие трибологические характеристики его стационарный коэффициент трения снизился на 20,5%, 42,9% и 50,0% при нагрузках 50 Н, 75 Н и 100 Н соответственно по сравнению с чистым PEEK в среднем равным 0,4.

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) смешивали [3] с углеродными нанотрубками (Wh), в пропорции Wh1 - 0,6 г к ПЭЭК – 29 г и Wh2 – 1,2 г к ПЭЭК – 29 г после спекания получали образцы с размерами 20×10×4 мм. Трибологические испытания проводил на возвратно-поступательной машине трения по схеме «Шарик (GCr15, диаметр 6,35 мм) - диск» при нагрузке 60 Н, частотой 6 Гц, скорости скольжения 96 мм/с, длиной хода 8 мм и временем испытания 30 мин, при температуре 25-210С°. Средний коэффициент трения Wh2/ПЭЭК составил 0,219; 0,237; 0,245; 0,259 и 0,304 соответственно, что на 14,12%, 10,23%, 10,91%, 8,80% и 7,32% ниже, чем у чистого ПЭЭК. Скорость износа Wh2/ПЭЭК при различных температурах составляла приблизительно 0,10; 0,19; 0,91; 1,52 и $2,15 \times 10^5$ мм³/Н·м, что на 83,61%, 75,64%, 45,83%, 53,66% и 76,81% меньше по сравнению с чистым ПЭЭК, а у Wh2/ ПЭЭК снизился на 67,21%, 60,26%, 41,07%, 43,29%, 68,82%.

Цель работы определение коэффициентов трения и интенсивности изнашивания образцов полимеров полифенилсульфида, полиэфиримида, полиэфирэфиркетон и сверхвысокомолекулярного полиэтилена при испытании на возвратно-поступательной машине трения.

Образцы полимеров полифенилсульфида (ZX530), полиэфиримида (ZX410), полиэфирэфиркетона (ZX324) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) (PE9000) были вырезаны из листовых заготовок размером 1000×70×10 мм. Испытания по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания были проведены на машине трения возвратно-поступательного движения МТВ-М при частоте 200 мин⁻¹ и нагрузке 2000 Н, в

течении 20 минут. Для смазки образцов использовали пластичную антифрикционную смазку «Литол-24». Перед испытанием образцы полимеров и контробразец были шлифованы на шлифовально-полировальном станке с использованием бумаги с зернистостью Р600. Контробразец был выполнен из стали 45 с размерами 12×20×80 мм с нанесенными канавками шириной 1 мм и с шагом 5 мм по нормали к вектору линейной скорости перемещения, твердость контробразца составляла 480-510 HV_{0,1}. Твердость полимеров составляла ZX530 – 23,52 HV_{0,01}, ZX410 – 27,82 HV_{0,01}, ZX324 – 35,31 HV_{0,01}, ZX530 – 5,3 HV_{0,01}. Результаты испытаний по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты триботехнических испытаний

Марка образца	Интенсивность изнашивания образца	Интенсивность изнашивания контробразца	Коэффициент трения
	$I_1 \cdot 10^{-3}$	$I_2 \cdot 10^{-3}$	f
ZX 530	5,8	0,4	0,075
ZX 410	6,9	1,4	0,061
ZX 324	9,1	0,3	0,064
PE 9000	12,6	0,2	0,031

По результатам приведенных в таблице данных установлено, что наибольший коэффициент трения был у полифенилсульфида 0,075, а наименьший у сверхвысокомолекулярного полиэтилена 0,031, промежуточные значения коэффициентов трения получены для полиэфиримида и полиэфирэфиркетона 0,061, 0,064. Наибольшая интенсивность изнашивания была у образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена $12,6 \times 10^{-3}$. Образцы полиэфирэфиркетона и полиэфиримида обладали большей износостойкостью в 1,4-2,2 раза в сравнении со СВМПЭ.

Выводы

Определено, что образцы полифенилсульфида имели наименьшую интенсивность изнашивания $5,8 \times 10^{-3}$, а наименьший коэффициент трения 0,031, у образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а его интенсивность изнашивания в 2,2 раза больше, чем у образцов полифенилсульфида. Образцы полиэфирэфиркетона и полиэфиримида обладали большей износостойкостью в 1,4-2,2 раза в сравнении с образцами сверхвысокомолекулярного полиэтилена соответственно.

Список литературы

1. Li B., Huang Q., Zhou X., Huang J., Liu B., Li X. Tribological Mechanism of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Reinforced by Nano-Silica Under Water Lubrication Conditions // Polymer Composites. 2026, vol. 47, pp. 1761-1776. doi.org/10.1002/pc.70250.
2. Yang Y., Ma S., Wang Z., Fu S., Yue H., Lu Y. Synergistic strengthening and tribological regulation in multi-phase 3D-printed PEEK composites // Composites Communications. 2026, vol. 61, pp. 102707. doi.org/10.1016/j.coco.2026.102707.
3. Huang S., Zhan S., Jia D., Zhou Y., Ma L., Liu L., Chen S., Cheng B., Duan H. Tribological Performance and Wear Life Prediction of Whisker Carbon Nanotube-Modified Polyether Ether

Ketone Composites Across a Broad Temperature Spectrum // Polymer Composites. 2025, vol. 46, pp. 16156-16170. doi.org/10.1002/pc.70036.

Сведения об авторах:

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

Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник.

ПОДХОД К ВХОДНОМУ КОНТРОЛЮ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Харланова К.С.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел

Ключевые слова: подшипник качения, нормированное интегральное время, входной контроль, техническое обслуживание, диагностика, трибодиагностика.

Аннотация. Подшипники качения являются одним из наиболее критичных элементов механизмов с движущимися компонентами вокруг оси. Выход из строя подшипников часто приводит к аварийным остановкам производства, следовательно, и к экономическим потерям. Традиционные методы контроля не позволяют в полной мере оценить качество сборки подшипников на этапах входного контроля и технического обслуживания. В РФ производство подшипников качения покрывает около 25% внутреннего спроса, и наблюдается тенденция к снижению объемов производства. В связи с этим увеличивается количество импортных подшипников, и, как следствие, повышается активность «серого» импорта. Именно поэтому важно использовать при контроле состояния подшипников качения электрический параметр нормированного интегрального времени.

AN APPROACH TO INCOMING INSPECTION OF ROLLING BEARINGS BASED ON ELECTRICAL PARAMETERS

Kharlanova K.S.

I.S. Turgenev Oryol State University, Oryol

Keywords: rolling bearing, normalized integral time, incoming inspection, maintenance, diagnostics, tribodiagnostics.

Abstract. Rolling bearings are among the most critical components in machines with moving components around an axis. Bearing failure often leads to emergency production shutdowns and, consequently, economic losses. Traditional inspection methods do not fully assess the quality of bearing assembly during incoming inspection and maintenance. In Russia, rolling bearing production covers approximately 25% of domestic demand, and production volumes are declining. Consequently, the number of imported bearings is increasing, and, consequently, the activity of "gray" imports is on the rise. This is why it is important to use the electrical parameter of normalized integral time when monitoring the condition of rolling bearings.

Подшипники качения являются одними из наиболее важных элементов современных машин и механизмов. Их техническое состояние во многом определяет надежность, безопасность и экономическую эффективность работы промышленного оборудования и машин в целом. Отказы подшипниковых узлов занимают значительную долю в общей структуре отказов редукторов, электродвигателей, шпиндельных узлов металлорежущих станков и турбомашин, приводя к длительным простоям производственных линий и существенным финансовым потерям. В связи с этим, задача своевременной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса подшипников качения на всех этапах их жизненного цикла является одной из ключевых в области технической эксплуатации промышленного оборудования [1].

Целью настоящей работы является подтверждение принципиальной возможности использования диагностического параметра нормированного интегрального времени (НИВ) электрического контактирования деталей при входной диагностике подшипников качения (входной контроль).

В настоящее время наиболее распространенным методом контроля состояния подшипников качения является вибродиагностика, базирующаяся на анализе значений виброскорости и виброускорения, а также спектрального состава вибрационного сигнала. Данный подход позволяет успешно выявлять развитые дефекты, однако, его чувствительность на ранних стадиях зарождения усталостных повреждений (микропиттинг, зарождение трещин в подповерхностных слоях) часто оказывается недостаточной. Это обусловлено тем, что на начальных этапах деградации энергия вибрации в широкополосном диапазоне частот возрастает незначительно, в то время как микро ударные импульсы, возникающие при взаимодействии дефектных поверхностей, уже имеют выраженный характер [2].

Одним из ключевых параметров, характеризующих процессы ударного и контактного взаимодействия в зоне взаимодействия тел качения с дорожками колец, является нормированное интегральное время микроконтактирования (НИВ). В отличие от амплитудных показателей, НИВ оценивает длительность и энергетическую накопленность ударных импульсов, что делает его потенциально более информативным для оценки степени тяжести дефекта. НИВ рассчитывается по формуле 1.

$$K = (\sum_1^n t_k - t_n) / T = \sum_1^n \tau / T, \quad (1)$$

где K – значение НИВ; n – количество импульсов микроконтактирования; t_k, t_n – время начала и конца импульса; T – время измерения; τ – длительности импульса контактирования.

Диапазон измерения НИВ составляет от 0 до 1. Чем меньше значение НИВ, тем лучше технические характеристики подшипника качения.

В работах С.Ф. Корндорфа, К.В. Подмастерьева, В.В. Мишина, и др. показана высокая корреляция между параметрами контактных импульсов и наличием дефектов смазки или локальных повреждений поверхностей. Однако, системные исследования, посвященные закономерностям изменения НИВ, на этапах жизненного цикла подшипника (от входного контроля, приработки и до работы в нормальных условиях) позволяют оценить комплексно состояние подшипника и определить возможность дальнейшего его использования в узле машины [3].

Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования параметра НИВ для новых подшипников и бывших в эксплуатации с различной наработкой. Усредненные результаты измерений приведены на рисунках 1, 2.

На графиках видно, что в процессе приработки у нового подшипника НИВ на порядок больше. Это связано с тем, что в подшипнике минимальное количество смазки, и контактные площадки своими неровностями совершают контактное взаимодействия до равномерного распределения смазочного слоя в дорожках качения, постепенно стирая вершины микронеровностей.

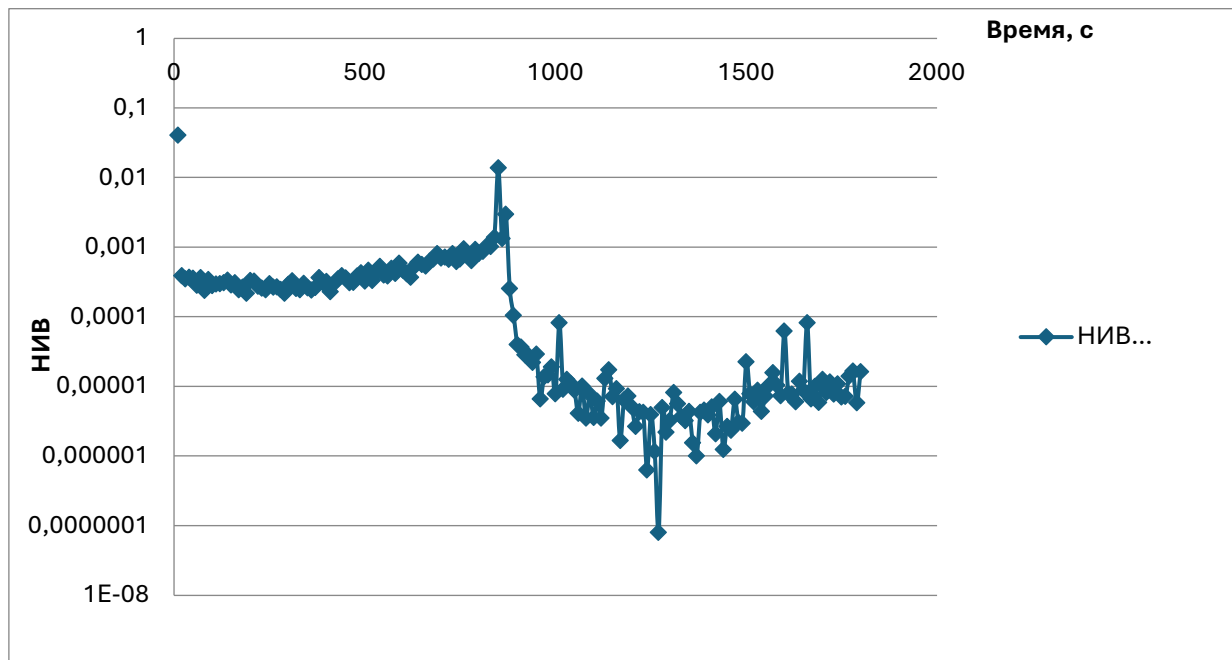


Рис. 1. Среднее логарифмическое значение НИБ в использованных подшипниках качения 208

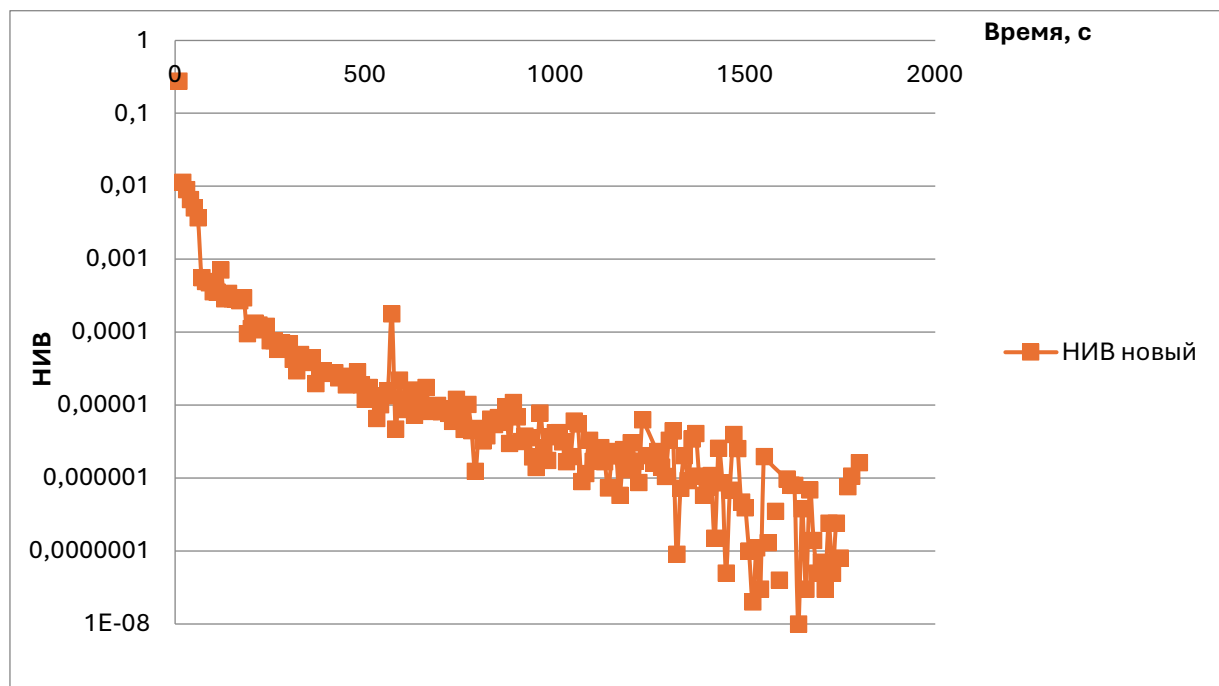


Рис. 2. Среднее логарифмическое значение НИБ в новых подшипниках качения 208

Расчетным методом выявлено, что при значениях НИБ от 10^{-8} до 10^{-5} подшипник в ряде случаев может использоваться повторно. Согласно регламенту бывшие в употреблении подшипники качения можно повторно монтировать после тщательной очистки и качественной смазки. Для новых подшипников НИБ должно составлять менее 10^{-5} .

В результате проведенных экспериментов и теоретического расчета можно утверждать, что при измерении НИБ в процессе диагностики подшипников качения можно экспериментально обосновать целесообразность дальнейшего использования подшипника в узле трения до следующего этапа технической диагностики. Диагностика подшипников качения позволяет избежать

использования некачественных подшипников и дает экспериментальную информацию о возможности их вторичной установки в узлы трения.

Список литературы

1. Герике П.Б., Герике Б.Л. Применение единых критериев для диагностики и прогнозирования технического состояния подшипников // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – №4(180). – С. 76-82. – DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-76-82.
2. Кокиева Г.Е., Друзянова В.П. Исследование долговечности двигателей // Ларионовские чтения-2021. Сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции, Якутск, 25 февраля 2021 года. Том 2. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2021. – С. 199-205.
3. Харланова К.С., Рязанцев П.Н. Подход к входному контролю подшипников качения в машиностроении на базе электрических параметров // Индустриальная Россия: вчера, сегодня, завтра: Сборник научных статей по материалам XV Международной научно-практической конференции, Уфа, 07 июня 2024 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2024. – С. 79-84.

Сведения об авторе:

Харланова Кристина Сергеевна – аспирант.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАПЛАВОЧНЫХ ПРУТКОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СМЕСЕЙ СИСТЕМЫ SN-SB-CU + TiNi МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

*Калашников И.Е.¹, Черненко Д.В.¹, Федорцов Р.С.¹, Быков П.А.¹,
Кобелева Л.И.¹, Михеев Р.С.²*

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва;*

²*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: композиционные материалы, система Sn-Sb-Cu, частицы TiNi, прессование, экструзия, стабильность трения.

Аннотация. Предложены композитные материалы системы Sn-Sb-Cu – TiNi для обеспечения стабильности процесса трения и разработана экономичная технология их изготовления. Проведено исследование структуры и свойств образцов для оценки возможности замены дорогостоящего импортного дисперсного матричного порошка RotoTec LT 29240 на порошок, получаемый из отечественного антифрикционного сплава В83.

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL MODES FOR THE PRODUCTION OF SURFACING RODS FROM POWDER COMPOSITE MIXTURES OF THE SN-SB-CU + TiNi SYSTEM BY THE EXTRUSION METHOD

*Kalashnikov I.E.¹, Chernenok D.V.¹, Fedortsov R.S.¹, Bykov P.A.¹,
Kobeleva L.I.¹, Mikheev R.S.²*

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

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

Keywords: composite materials, Sn-Sb-Cu system, TiNi particles, pressing, extrusion, friction stability.

Abstract. Composite materials of the Sn-Sb-Cu–TiNi system were proposed to ensure the stability of the friction process. An economical technology for the production of such materials was developed. A study of the structure and properties of samples was conducted to assess the possibility of replacing expensive imported dispersed matrix powder RotoTec LT 29240 with powder obtained from domestic antifriction alloy В83.

Интерметаллидное соединение TiNi и подобные ему сплавы обладают свойствами термомеханической памяти формы, сверхэластичности и демпфирования в сочетании с высокими прочностными и пластическими характеристиками, повышенными длительной прочностью и долговечностью, коррозионной стойкостью. Существует ряд технологий формирования поверхностных слоев из подобных материалов с использованием лазерной и аргонодуговой наплавки, плазменного напыления и наплавки взрывом [1]. При применении этих методов получены прочные и надежные поверхностные слои требуемой толщины и дисперсности. Изделия с такими слоями находят применение в авиационной, космической, автомобильной, горной, транспортной и

других областях в том числе и в составе трибоузлов. Представляется целесообразным опробовать порошковое соединение TiNi в качестве армирующего компонента широко применяемых антифрикционных сплавов системы Sn-Sb-Cu. Поскольку при эксплуатации узлов трения наибольшему физико-химическому воздействию подвергается их поверхностный слой, то изготовление всей конструкции узла трения полностью из композиционных материалов (КМ) является не рациональным. Поэтому особый интерес представляют процесс нанесения антифрикционных покрытий из подобных КМ на этапах изготовления и планового ремонта узлов трения методами дуговой наплавки. Для практической реализации нанесения антифрикционных покрытий методами дуговой наплавки требуется разработать и изготовить наплавочные прутки системы Sn-Sb-Cu + TiNi. В связи с этим, целью работы являлось изготовление оснастки (комплектов фильер и пресс-форм) для прессования и экструзии композиционных смесей, а также матричного порошка системы Sn-Sb-Cu и определение технологических режимов изготовления наплавочных прутков разных диаметров из матричных сплавов марок Б83 и RotoTech LT 29240.

Следует отметить, что важным достоинством экструзии, как это отмечается в работе [2], является возможность получения изделий большой длины с равномерной плотностью даже из плохо прессующихся материалов (тугоплавкие металлы, интерметаллические соединения, твердые сплавы, материалы на основе оксидов). Наплавочные материалы в форме прутков изготавливали экструзией, выбранной по критериям возможности получения изделий требуемых геометрических размеров, а также обеспечения заданного содержания частиц TiNi в объеме матричного сплава [3].

Для получения прутков заданных диаметров изготовили и применяли фильеры диаметром 3 и 6 мм, входящие в комплект оснастки (пресформа, фильеры, проставка, пуансон и толкатель) для прессования и экструзии композиционных смесей (рис. 1, а), а также матричных порошков системы Sn-Sb-Cu. Для получения матричного порошка из сплава Б83 предварительно изготавливали стружку на токарном станке обрабатывая заготовку с начальным диаметром 50 мм. Выбранные режимы обработки (скорость резания 200-250 м/мин, глубина резания 0,1 мм) позволили получить короткую спирально-свитую стружку для дальнейшей обработки в планетарной мельнице. Порошковую смесь, представляющую собой стружку матричного сплава Б83 либо порошок RotoTech LT 29240, наполнитель TiNi в количестве 3 и 6 масс. %, обрабатывали в планетарной мельнице Retch PM100. Режим обработки: частота вращения барабана – 300 об/мин, длительность обработки – 10 мин, защитная среда – газ аргон. В результате локальной пластической деформации стружки матричного сплава Б83, в сочетании с механическим внедрением частиц TiNi получали однородную композиционную порошковую смесь.

Технологические операции изготовления стержней:

1. Компактирование в пресс-форме изготовленной композиционной смеси при давлении 300 ± 5 МПа.
2. Выдержка компактированной заготовки в камерной электропечи сопротивления СНОЛ 10/11-В при температуре $320 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

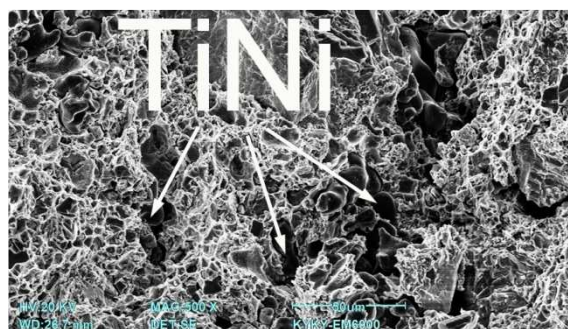
3. Экструзии через фильеры диаметром 3 мм или 6 мм на механическом прессе NORDBERG N3550 при усилии 115-120 кН и температуре $280 \pm 20^\circ\text{C}$. Главными критериями при выборе значений технологических параметров режима экструзии (усилия и температуры) являлись возможность экструдирования всего объема изготовленной композиционной порошковой смеси, а также соответствие диаметра и длины присадочных материалов требованиям ГОСТ 21449.

Внешний вид изготовленных наплавочных прутков диаметром 3 и 6 мм представлен на (рис. 1, б).

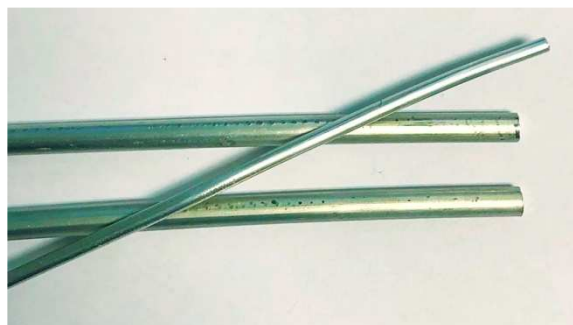
Для определения внутренних макродефектов и наличия интерметаллидных частиц TiNi исследовали изломы изготовленных образцов присадочных КМ с помощью средств электронной микроскопии с применением растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6000PLUS, укомплектованного детекторами вторичных и обратно отражённых электронов. Поверхность образцов присадочных КМ (рис. 1, в) для исследования получали методом излома по стандартной методике, применяемой для прутков из цветных сплавов (ГОСТ Р 52597).



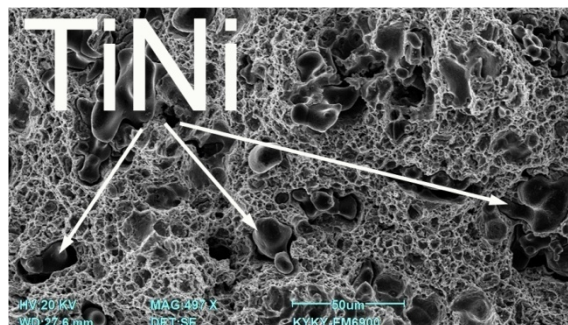
а



в



б



г

Рис. 1. Комплект для прессования и экструзии композиционных смесей (а), внешний вид изготовленных наплавочных прутков диаметром 3 и 6 мм (б); характерная поверхность изломов образцов: Б83 + 3 масс.% TiNi (в), RotoTechLT 29240 + 3 масс.% TiNi (г)

Особенностью картин разрушения этих образцов является их однородность, все образцы имеют вязкий характер разрушения. В изломах образцов обоих составов наблюдаются равномерно распределенные интерметаллидные частицы TiNi.

Таким образом, осуществлен процесс компактирования материалов матрицы и армирующих наполнителей используя преимущества методов порошковой металлургии (обеспечения равномерности распределения наполнителей в объеме матрицы и сохранение требуемой доли армирования) и жидкофазных технологий

(создание условий для физического контакта, смачивания и контролируемого межфазного взаимодействия между поверхностью наполнителей и жидкой фазой матрицы). Конечный продукт в виде новых наплавочных композиционных материалов изготовлен процессом экструзии подготовленных композиционных порошковых смесей в присутствии жидкой фазы.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00980.

Список литературы

1. Blednova Zh.M., Rusinov P.O., Balaev E.Y. Improving product performance by forming surface compositions from SME materials with a gradient of properties and phase transformation temperatures // Material Design & Processing Communications. 2020, no. 6, p. 132. doi.org/10.1002/mdp2.132.
2. Пятов В.В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2002. – 237 с.
3. Калашников И.Е., Кобелева Л.И., Михеев Р.С., Быков П.А., Катин И.В. Структура и свойства присадочных композиционных материалов для формирования антифрикционных поверхностных слоев с повышенной износостойкостью // Материаловедение. – 2025. – №10. – С. 13-21. – doi.org/10.31044/1684-579X-2025-0-10-13-21.

Сведения об авторах:

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

Черненко Дмитрий Владимирович – инженер-исследователь Лаборатории конструкционных сталей и сплавов им. академика Н.Т. Гудцова;

Федорцов Руслан Сергеевич – младший научный сотрудник Лаборатории физикохимии и механики металлических материалов;

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

Кобелева Любовь Ивановна – к.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов;

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖЛ-14Н-ВИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Бердников О.О., Капалин Н.Ю., Реченко Д.С.

Омский государственный технический университет, Омск

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, зона резания, твердосплавный инструмент, температура резания, термические напряжения, микротрещины, режимы резания.

Аннотация. В работе рассмотрены физико-химические процессы, протекающие в зоне резания при обработке жаропрочного сплава ВЖЛ-14Н-ВИ твердосплавным инструментом. Особое внимание уделено влиянию режимов резания на формирование дефектов в виде микротрещин в зоне тонких стенок детали. Проведены экспериментальные исследования при различных скоростях резания и подачах, а также выполнены теоретические расчёты температуры и термических напряжений. Установлено, что при превышении критических температурно-силовых параметров происходит разрушение поверхностного слоя материала. Полученные результаты позволяют определить рациональные режимы обработки, исключающие образование дефектов.

PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN THE CUTTING AREA DURING PROCESSING OF HEAT-RESISTANT ALLOY VZHL-14H-VI WITH A CARBIDE TOOL

Berdnikov O.O., Kapalin N.Y., Rechenko D.S.

Omsk State Technical University, Omsk

Keywords: heat-resistant alloys, cutting area, carbide tool, cutting temperature, thermal stresses, microcracks, cutting modes.

Abstract. The paper considers the physico-chemical processes occurring in the cutting zone during processing of the heat-resistant alloy VZHL-14H-VI with a carbide tool. Special attention is paid to the effect of cutting modes on the formation of defects in the form of microcracks in the area of thin walls of the part. Experimental studies have been carried out at various cutting speeds and feed rates, as well as theoretical calculations of temperature and thermal stresses. It is established that when the critical temperature and force parameters are exceeded, the surface layer of the material is destroyed. The results obtained make it possible to determine rational processing modes that exclude the formation of defects.

Введение. Жаропрочные никелевые сплавы широко применяются в авиационной и энергетической промышленности благодаря высокой прочности и устойчивости к воздействию высоких температур [1]. Однако их обработка резанием сопровождается рядом технологических трудностей, обусловленных низкой теплопроводностью, склонностью к наклёпу и высокой прочностью при повышенных температурах [2].

Одной из характерных проблем при механической обработке данных материалов является образование дефектов поверхностного слоя, в частности микротрещин, особенно в зонах с пониженной жёсткостью, таких как тонкие стенки. Возникновение таких дефектов существенно снижает эксплуатационные характеристики деталей и требует дополнительного контроля.

В связи с этим актуальным является исследование физико-химических процессов, протекающих в зоне резания, а также установление их связи с режимами обработки и условиями формирования дефектов.

Физико-механические процессы в зоне резания.

В процессе резания жаропрочных сплавов в зоне контакта инструмента и заготовки протекает комплекс взаимосвязанных физических и химических явлений. Основным фактором является интенсивное тепловыделение, обусловленное пластической деформацией материала и трением на контактных поверхностях. При этом температура в зоне резания может достигать 800-1000°C, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя обработанной поверхности [3].

Механические напряжения, возникающие вследствие сил резания и локальной деформации, накладываются на термические напряжения, вызванные неравномерным нагревом и охлаждением материала. В условиях обработки тонкостенных элементов происходит концентрация напряжений, способствующая зарождению дефектов.

Дополнительное влияние оказывают адгезионные процессы и образование нароста на режущей кромке, что приводит к нестабильности процесса резания и локальным перегрузкам. При высоких температурах активизируются диффузионные процессы между инструментом и заготовкой, а также окисление поверхностного слоя, что снижает его прочностные характеристики. Совокупность указанных факторов приводит к формированию микротрещин при превышении критических для обрабатываемого материала значений температур и напряжений [4].

Материалы и методика эксперимента. Обработка проводилась на токарном станке с ЧПУ CTX Beta 800. В качестве режущего инструмента использовалась твердосплавная пластина типа VNMG 160412-MR4 TS2500. Обрабатываемый материал – жаропрочный сплав ВЖЛ-14Н-ВИ. Контроль качества поверхности осуществлялся методом люминесцентного контроля с использованием установки ЛЮМ1-ОВ, позволяющего выявлять поверхностные дефекты в виде микротрещин. В ходе эксперимента варьировались скорость резания и подача при постоянной глубине резания 0,5 мм. Режимы обработки и результаты контроля представлены в таблице 1.

Табл. 1. Режимы обработки и результаты контроля

№ опыта	V, м/мин	F, мм/об	Наличие дефекта
1	20	0,10	Да
2	8	0,072	Нет
3	10	0,09	Нет
4	17	0,088	Нет

Теоретический анализ процессов в зоне резания. Для обоснования причин возникновения микротрещин при обработке жаропрочного сплава ВЖЛ-14Н-ВИ проведён теоретический анализ термомеханических процессов в зоне резания. Расчёты выполнены на основе экспериментальных режимов обработки с

использованием приближённых зависимостей, применяемых для труднообрабатываемых никелевых сплавов.

Расчёт силы и мощности резания.

Сила резания определялась по эмпирической зависимости:

$$P_z = C_p \cdot t^x \cdot f^y \cdot V^n.$$

Мощность резания определялась по формуле:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{60}.$$

Температура в зоне резания оценивалась по зависимости:

$$T = T_0 + K \cdot V^{0.25} \cdot f^{0.15}.$$

Расчет термических напряжений производится по формуле:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T.$$

где P_z – тангенциальная сила резания, Н; C_p – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; t – глубина резания, мм; f – подача, мм/об; V – скорость резания, м/мин; x, y, n – показатели степени для глубины резания, подачи и скорости резания соответственно; T_0 – начальная температура, °С; K – коэффициент для никелевых сплавов, учитывающий теплофизические свойства обрабатываемого материала, условия трения и теплообмена в зоне резания; E – модуль упругости, МПа; α – коэффициент линейного расширения; $\Delta T = T - 20$.

Примем для никелевых сплавов: $C_p = 3000$; $x = 1$; $y = 0,8$; $n = -0,1$; $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $K = 25$; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5}$; $\Delta T = T - 20^\circ\text{C}$.

Результаты расчёта представлены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты расчёта

№ опыта	V , м/мин	F , мм/об	P_z , Н	N , Вт	T , °С	σ , МПа	Наличие дефекта
1	20	0,1	≈ 950	≈ 317	≈ 820	≈ 2080	Да
2	8	0,072	≈ 520	≈ 69	≈ 620	≈ 1560	Нет
3	10	0,09	≈ 690	≈ 115	≈ 680	≈ 1700	Нет
4	17	0,088	≈ 880	≈ 249	≈ 780	≈ 1970	Нет

Анализ результатов показывает, что увеличение скорости резания и подачи приводит к существенному росту силовых нагрузок, действующих в процессе резания, что особенно критично при обработке деталей, имеющих тонкие стенки. Полученные значения мощности резания свидетельствуют о значительном росте энергопотребления при увеличении скорости резания, что напрямую влияет на температурный режим обработки. Установлено, что при максимальной скорости резания температура в зоне резания достигает значений свыше 800°C , что характерно для интенсивного термического воздействия на поверхностный слой обрабатываемого материала.

На рисунке 1 показана зависимость температуры T , °С в зоне резания от скорости резания V , м/мин. Наблюдается устойчивый рост температуры с увеличением скорости, при этом в области 17-20 м/мин температура достигает критических значений порядка 800°C .

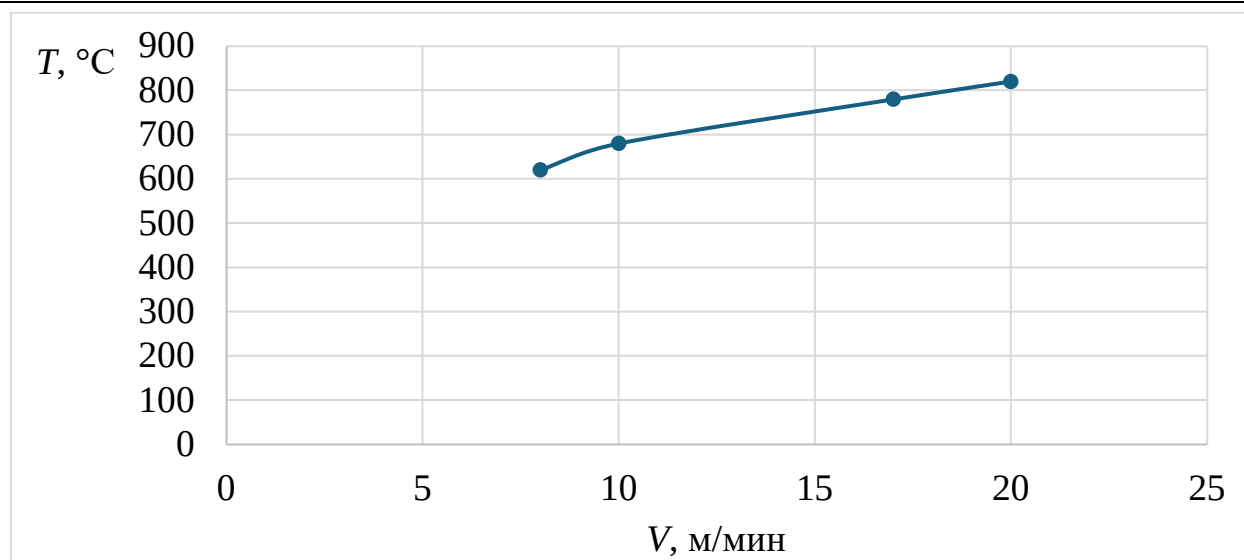


Рис. 1. Зависимость температуры T , °C в зоне резания от скорости резания V , м/мин

Зависимость термических напряжений σ , МПа от скорости резания V , м/мин имеет аналогичный характер. При скорости 20 м/мин напряжения превышают 2000 МПа, что соответствует условиям возникновения микротрещин (рис. 2).

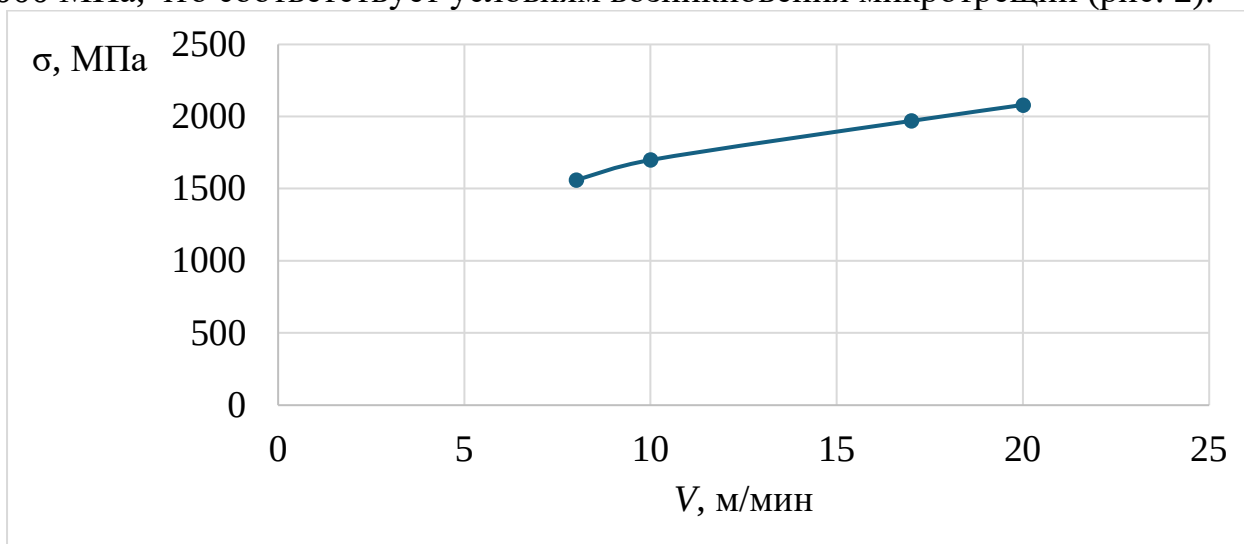


Рис. 2. Зависимость термических напряжений σ , МПа от скорости резания V , м/мин

Анализ условий возникновения дефектов

Сопоставление расчётных данных с результатами контроля показало, что появление микротрещин наблюдается при достижении температур при достижении порядка 800°C и термических напряжений около 2000 МПа и более. В этих условиях выполняется критерий разрушения $\sigma_{\text{терм}} + \sigma_{\text{мех}} > \sigma_{\text{предел}}$, особенно явно это проявляется в зоне тонких стенок, где происходит концентрация напряжений.

В результате теоретического анализа установлено, что основным фактором образования микротрещин является совокупное воздействие повышенной температуры и термических напряжений, возникающих при высоких скоростях резания. Критическим является диапазон температур свыше 800°C, при котором напряжённое состояние материала достигает значений, близких к пределу прочности. Снижение скорости резания до 8-17 м/мин приводит к уменьшению

температуры и напряжений на 15-25%, что обеспечивает отсутствие дефектов и стабильность процесса обработки.

Анализ результатов

Анализ экспериментальных данных показал, что ключевым фактором, влияющим на образование микротрещин, является скорость резания. При скорости 20 м/мин наблюдается возникновение дефектов, тогда как при снижении скорости до 8-17 м/мин дефекты отсутствуют.

Результаты теоретических расчётов подтверждают экспериментальные данные. Установлено, что при максимальной скорости резания температура в зоне резания достигает порядка 800°C, а термические напряжения превышают 2000 МПа. В данных условиях реализуется механизм разрушения поверхностного слоя.

При снижении скорости резания происходит уменьшение тепловыделения и уровня напряжений, что предотвращает образование микротрещин. Таким образом, наблюдается прямая зависимость между режимами резания, параметрами напряжённо-деформированного состояния и качеством обработанной поверхности.

Выводы

Установлено, что при обработке сплава ВЖЛ-14Н-ВИ ключевым фактором образования микротрещин является температура в зоне резания. Определено, что при температуре выше 800°C и напряжениях порядка 2000 МПа происходит разрушение поверхностного слоя материала. Экспериментально подтверждено, что снижение скорости резания до 8-17 м/мин исключает образование дефектов. Показана взаимосвязь между режимами резания, термомеханическими процессами и качеством поверхности. Рекомендованы рациональные режимы обработки, обеспечивающие отсутствие дефектов при обработке тонкостенных элементов.

Список литературы

1. Жеребцов С.Н., Зыкин П.В., Хамитов Р.Н., Ганичева Л.С., Рогачев Е.А. Токарная обработка дисков авиационных ГТД, изготовленных из жаропрочных сплавов // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – №9. – С. 505-509.
2. Ласуков А.А. Обработка никелевых сплавов // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – С. 56-58.
3. Колтыгин А.В., Баженов В.Е., Белова А. А. и др. Влияние термической обработки на фазовый состав, структуру, твердость и электропроводность никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ // Известия вузов. Черная металлургия. – 2025. – №68(1). – С. 60-68.
4. Даниловских М.Г., Летенков О.В. Зона резки и контроль температуры // Международный научный журнал «Символ науки». – 2023. – №3(1). – С. 16-21.

Сведения об авторах:

Бердников Олег Олегович – аспирант;

Капалин Николай Юрьевич – аспирант;

Реченко Денис Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ НА ОСНОВЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Лашков В.А.¹, Кондрашева С.Г.²

¹ОСП «Институт прикладных исследований АН РТ», Казань;

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань

Ключевые слова: резьбовые соединения, самоторможение, вибрация, стопорение, пластическая деформация, машиностроение.

Аннотация. Рассмотрены факторы, снижающие надежность крепежных резьбовых соединений в машиностроении: вибрация, переменные нагрузки и температурные деформации. Представлены разработанные конструкции стопорящихся соединений, использующие упругопластическую деформацию конца резьбового стержня, разделенного на сегменты и сектора. Показаны пути повышения их усталостной прочности и ремонтпригодности для обеспечения безаварийной работы машин.

ENHANCING THE RELIABILITY OF THREADED JOINTS IN MECHANICAL ENGINEERING UNDER DYNAMIC LOADS BASED ON ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

Lashkov V.A.¹, Kondrasheva S.G.²

SSS «Institute of Applied Research of the AS RT», Kazan;

Kazan National Research Technological University, Kazan

Keywords: threaded joints, self-locking, vibration, locking, plastic deformation, mechanical engineering.

Abstract. The factors that reduce the reliability of threaded fasteners in mechanical engineering are considered: vibration, variable loads, and thermal deformations. The developed designs of locking connections that use the elastoplastic deformation of the end of a threaded rod, divided into segments and sectors, are presented. Ways to improve their fatigue strength and maintainability to ensure trouble-free operation of machines are shown.

В современном машиностроении крепежные резьбовые соединения являются неотъемлемой частью большинства конструкций, составляя до 60% от общего числа элементов оборудования [1]. От их надежности напрямую зависит безопасность эксплуатации машин и механизмов, работающих в сложных условиях. Механическая энергия вращающихся узлов, нагрев узлов и перепады температур приводят к возникновению вибрации и температурных деформаций деталей. Эти факторы вызывают изменения размеров зазоров и появление дополнительных динамических нагрузок.

По статистике, многие аварии и разрушения оборудования, эксплуатируемого в подобных условиях, обусловлены в том числе и несоответствием резьбовых соединений требованиям надежности стопорения, хотя все крепежные резьбы удовлетворяют условию самоторможения, так как угол подъема резьбы значительно меньше приведенного угла трения. Однако практика эксплуатации показывает, что

при переменных нагрузках и вибрациях значение коэффициента трения снижается. Вследствие микросмещений поверхностей трения происходит самоотвинчивание гаек [2], и условие самоторможения нарушается.

$$T_{\text{отв}} = 0,5Fd_2[(D_{\text{ср}}/d_2)f + \tan(\varphi - \psi)] > 0, \quad (1)$$

где $T_{\text{отв}}$ – момент отвинчивания гайки (Н/м); F – осевая сила, (Н); d_2 – средний диаметр болта (мм); $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр гайки (мм); f – коэффициент трения; φ – угол трения; ψ – угол подъема винтовой линии.

Если исключить из уравнения (1) трение на торце гайки, то условие самоторможения в резьбе запишется в виде соотношения

$$\psi < \varphi. \quad (2)$$

Для предотвращения самоотвинчивания резьбовых деталей применяют различные способы: создание дополнительного трения в резьбе, использование фиксирующих деталей или материалов. При разработке надежного стопорящегося соединения, работоспособного в условиях значительных вибрационных и ударных нагрузок, а также при повышенных температурах, часто за основу принимают схему с развальцовкой конца резьбового стержня. Недостатком подобных крепежных узлов является образование глухого неразъемного соединения, которое при техническом обслуживании или ремонте приходится срезать, делая его непригодным для повторного использования.

В результате проведенных исследовательских и проектных работ для исключения недостатков существующих конструкций разработана серия стопорящихся резьбовых соединений [4-6], защищенных патентами Российской Федерации на изобретения.

В работе [4] задача повышения надежности стопорения решалась за счет создания напряжений в радиальном и осевом направлениях конца болта резьбового стержня и основной гайки (рис. 1, а). В данной конструкции основная гайка 2 выполнена с удлиненным «воротником» 3, на котором с наружной стороны нарезана резьба, а контргайка 4 – с глухим отверстием и коническим элементом 10. Резьбовой конец болта 1 имеет цилиндрическую полость 7 и прорези 8, образующие сегменты 9. При закручивании контргайки конический элемент обеспечивает расширение сегментов, приводящее к упругим или пластическим деформациям. Однако данное решение характеризуется сложностью конструкции и стопорения, что обусловлено несоблюдением принципа унификации и трудоемкостью изготовления.

В работе [5] представлен упрощенный вариант конструкции (рис. 1, б), предполагающий использование стандартных крепежных деталей и инструмента одного типоразмера. В этой конструкции конец резьбового стержня 1 размещен внутри основной удлиненной гайки 2, которая выполнена с отверстиями по граням 10 и кольцевой проточкой 9. При закручивании контргайки 3, выполненной в виде винта, ее конический элемент обеспечивает упругие и пластические деформации резьбового конца болта на уровне кольцевой проточки 9. Основным недостатком обеих описанных конструкций [4, 5] является разрушение сегментов при многократном использовании в результате потери усталостной прочности.

Наиболее перспективной с точки зрения сохранения целостности «работающих» сегментов является схема их попеременного нагружения.

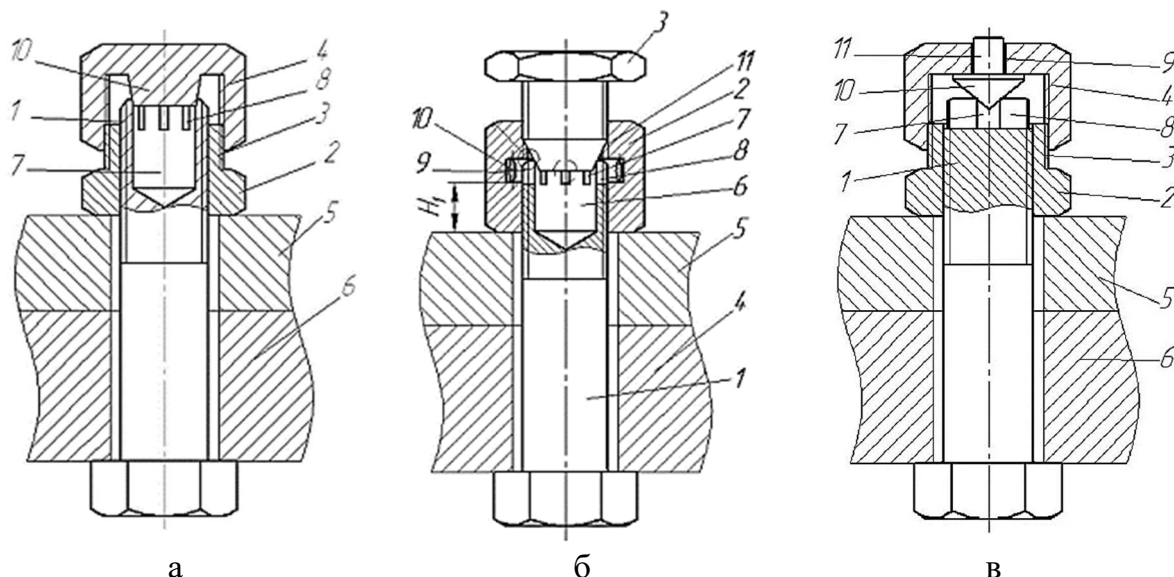


Рис. 1. Стопорящиеся резьбовые соединения (варианты):

- а) (пат. №2802165): 1 – болт с резьбовым стержнем, 2 – основная гайка, 3 – «воротник» основной гайки, 4 – контргайка, 5, 6 – детали, 7 – цилиндрическая полость, 8 – прорези, 9 – сегменты (не показаны), 10 – усеченный конический элемент;
- б) (пат. №2833789): 1 – болт с резьбовым стержнем, 2 – основная гайка, 3 – контргайка, 4, 5 – детали, 6 – цилиндрическая полость, 7 – прорези, 8 – сегменты, 9 – кольцевая проточка, 10 – отверстия, 11 – конический элемент; H_1 – высота стандартной низкой гайки;
- в) (пат. №2854287): 1 – болт с резьбовым стержнем, 2 – основная гайка, 3 – «воротник» основной гайки, 4 – контргайка, 5, 6 – детали, 7 – прорези, 8 – сектора, 9 – центральное отверстие, 10 – клин, 11 – цилиндрический хвостовик

Применение конструкции стопорящегося резьбового соединения (рис. 1, в), представленной в работе [6], позволяет повысить усталостную прочность узла в процессе его многократного использования. Это достигается за счет увеличения циклов нагружения секторов при их переменном пластическом расширении и сжатии в различных плоскостях. В данной конструкции на «воротнике» 3 основной гайки 2 нарезана наружная резьба, а контргайка 4 выполнена глухой с отверстием под хвостовик расширяющего элемента 11, имеющего форму клина 10. Наличие прорезей 7 на резьбовом конце в различных плоскостях обеспечивает попеременное их нагружение при пластических деформациях, что способствует более равномерному распределению напряжений и повышает долговечность соединения.

Таким образом, для исключения самоотвинчивания гаек резьбовых соединений при динамических нагрузках, вибрации и температурных деформациях, способных привести к авариям машин и механизмов, разработаны конструкции стопорящихся соединений, в основе которых использован принцип упругой и пластической деформации конца резьбового стержня при затягивании контргайки. При этом, техническое решение с клиновым расширяющим элементом [6], позволяет повысить усталостную прочность и обеспечить возможность многократного использования крепежных элементов, что соответствует современным требованиям надежности и ремонтпригодности в машиностроении.

Список литературы

1. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
2. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин. – М.: Изд-во «Юрайт». 2016. – 408 с.
3. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 139-140.
4. Патент №2802165 РФ. Стопорящееся резьбовое соединение / В.А. Лашков, С.Г. Кондрашева, Д.А. Хамидуллина, А.И. Халилов, А. Клементьева, Э.Ф. Аллахвердиева. – Заявка №2023110380 от 24.04.2023; опубл. 22.08.2023, Бюл. №24.
5. Патент №2833789 РФ. Стопорящееся резьбовое соединение / В.А. Лашков, С.Г. Кондрашева, Д.А. Хамидуллина, Ю.Г. Никишина. – Заявка №2024122327 от 06.08.2024; опубл. 28.01.2025, Бюл. №4.
6. Патент РФ. Стопорящееся резьбовое соединение / В.А. Лашков, С.Г. Кондрашева, Д.А. Хамидуллина, Ф.М. Шамиев, А.В. Старкова. – Заявка №2025116816 от 18.06.2025; опубл. 29.12.2025, Бюл. №1.

Сведения об авторах:

Лашков Вячеслав Александрович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник;

Кондрашева Светлана Геннадьевна – к.т.н., доцент.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ПОДШИПНИКОВОГО ЩИТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНДУКТОРА С ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Муравьев Д.В.

Омский государственный университет путей сообщения, Омск

Ключевые слова: резьба, отверстие, точность, восстановление, сверление, кондуктор.

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция автоматизированного кондуктора для восстановления резьбовых отверстий в подшипниковом щите тягового электродвигателя, применение которого позволит повысить точность обработки за счет снижения вибраций, радиального биения и упругих деформаций осевого инструмента, уменьшить погрешность шага отверстий и повысить производительность. Описаны конструкция, схема базирования кондуктора при установке на щит и принцип его действия.

TECHNOLOGY FOR REPAIRING THE BEARING SHIELD OF A TRACTION ELECTRIC MOTOR USING A CONDUCTOR WITH A PNEUMATIC DRIVE

Muravyov D.V.

Omsk State University of Railway Engineering, Omsk

Keywords: thread, hole, precision, restoration, drilling, conductor.

Abstract. The article discusses the design of an automated conductor for restoring threaded holes in a TEM bearing shield, the use of which will improve machining accuracy by reducing vibrations, radial runout and elastic deformations of the axial tool, reduce the step error of the holes and increase productivity. The design and layout of the conductor when installed on the shield and the principle of its operation are described.

Подшипниковый щит тягового электродвигателя (ТЭД) устанавливается на статоре и позволяет якорю свободно вращаться относительно обмоток статора в моторно-якорных подшипниках, запрессованных в щите. Кроме того, щиты предотвращают проникновение внутрь двигателя влаги, пыли и грязи.

Анализ статистических данных по отказам ТЭД выявил зависимость количества и частоты появления дефектов подшипникового щита от циклических и динамических нагрузок, действующих на колесно-моторный блок (КМБ) с опорно-осевым подвешиванием ТЭД при передаче воздействий от колесной пары через моторно-осевые подшипники и тяговую зубчатую передачу [1].

В частности, статистика отказов КМБ электровоза 2ЭС6 в эксплуатации показывает, что в период с 2022 по 2024 гг. количество внеплановых ремонтов по дефектам подшипникового щита ТЭД ЭК-810 (рис. 1) увеличилось на 30%.

Среди основных дефектов подшипникового щита выделяют ослабление резьбовых соединений в результате износа, пластической деформации и срыва витков резьбы под болты крепления крышки моторно-якорного подшипника (МЯП), излом крепежных болтов, износ отверстий под крепежные болты.

Восстановление резьбы под болты крепления крышки МЯП возможно одним из следующих методов, а именно: нарезание новой резьбы после заварки изношенной; постановка дополнительной детали (ввертыша); рассверливание

отверстия под резьбу большего диаметра; постановка композитных втулок [2]. Однако каждый из перечисленных методов не лишен недостатков.

Приоритетным способом ремонта является заварка с последующим резьбонарезанием, но избыточное выделение тепла при сварке способствует появлению трещин и короблению, что приводит к снижению качества и точности резьбы.

Способ постановки дополнительной детали трудоемок, дорог и может использоваться при подходящих габаритах детали [3].

Рассверливание отверстий под резьбу большего диаметра сопряжено с нарушением размеров щита и необходимостью увеличения диаметров отверстий в крышке МЯП, что требует дополнительных трудозатрат.

Таким образом, наиболее эффективным и рентабельным способом восстановления отверстий подшипникового щита в настоящее время является заварка с последующей механической обработкой под ремонтный размер. Технология восстановления резьбовых отверстий 1 (М16-6Н) под болты крепления крышки МЯП (рис. 2) выглядит так: изношенную резьбу высверливают, а отверстие заваривают электродуговой сваркой в среде защитного газа, после чего зачищают поверхность от наплывов металла и шлака, выполняют разметку отверстий, сверление, зенкерование, зенкование фаски под резьбу и нарезание новой резьбы метчиком [4].



Рис. 2. Тяговый электродвигатель ЭК-810

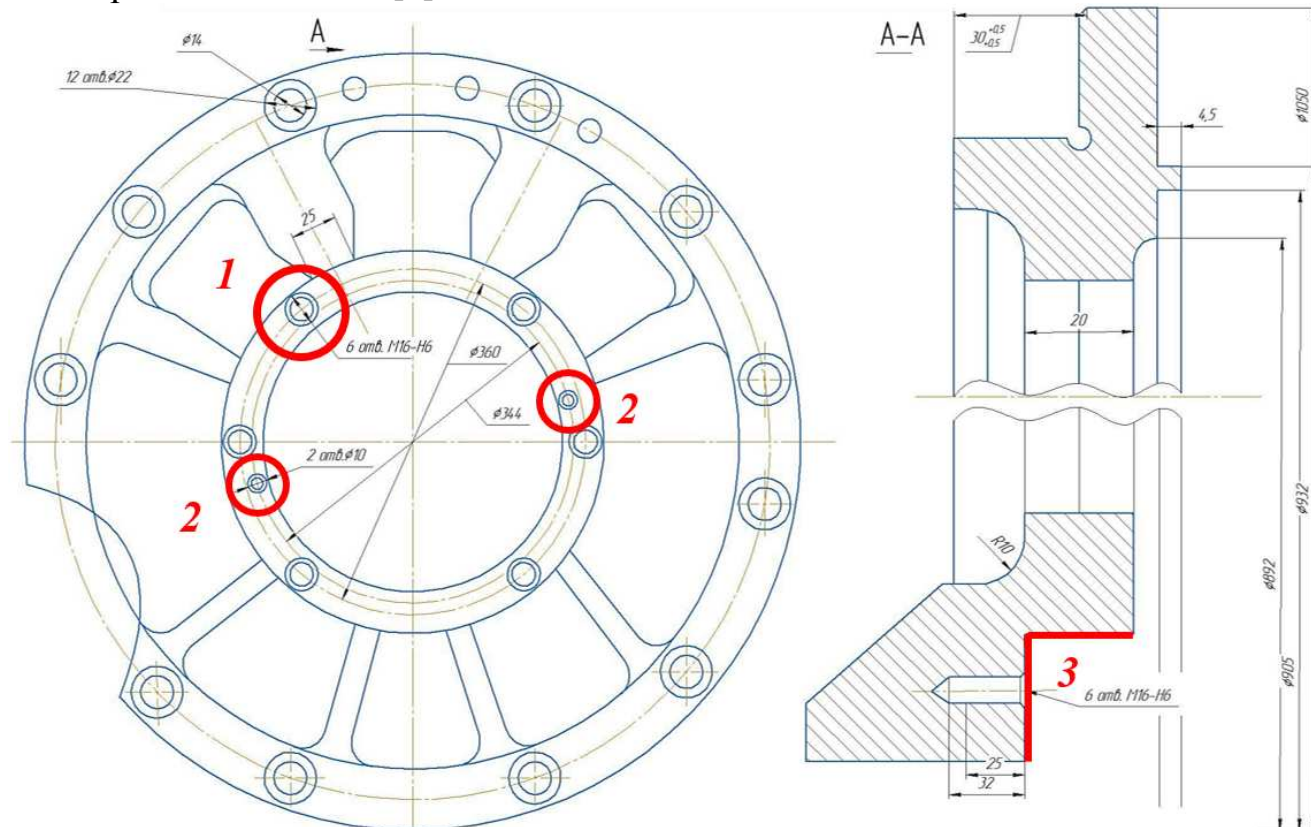


Рис. 2. Подшипниковый щит ТЭД ЭК-810 электровоза 2ЭС6

Недостатком данной технологии, помимо коробления щита при сварке, является накопление погрешности относительного шага отверстий при разметке и нарушение их позиционного допуска. Кроме того, сверление позволяет обеспечить точность обработки в пределах 12-14 качества, поскольку сверло обладает низкой радиальной жесткостью, в результате чего возможно отклонение сверла от оси просверливаемого отверстия или дифферент к плоскости обработки. Перечисленные технологические дефекты обработки способствуют нарушению работы якоря ТЭД из-за перекоса вала якоря в моторно-якорных подшипниках и ухудшают работу коллекторно-щеточного узла.

Выявленные проблемы ремонта предлагается нивелировать за счет повышения точности сверления заваренных отверстий с использованием мобильного автоматизированного кондуктора, который монтируется на щит и закрепляется в посадочном отверстии под МЯП. К тому же, потребность в проектировании подобного устройства была отражена в виде запроса на разработку в 2023 году на платформе «Единое окно инноваций» ОАО «РЖД».

Концепция устройства представлена в виде проектного эскиза на рисунке 3.

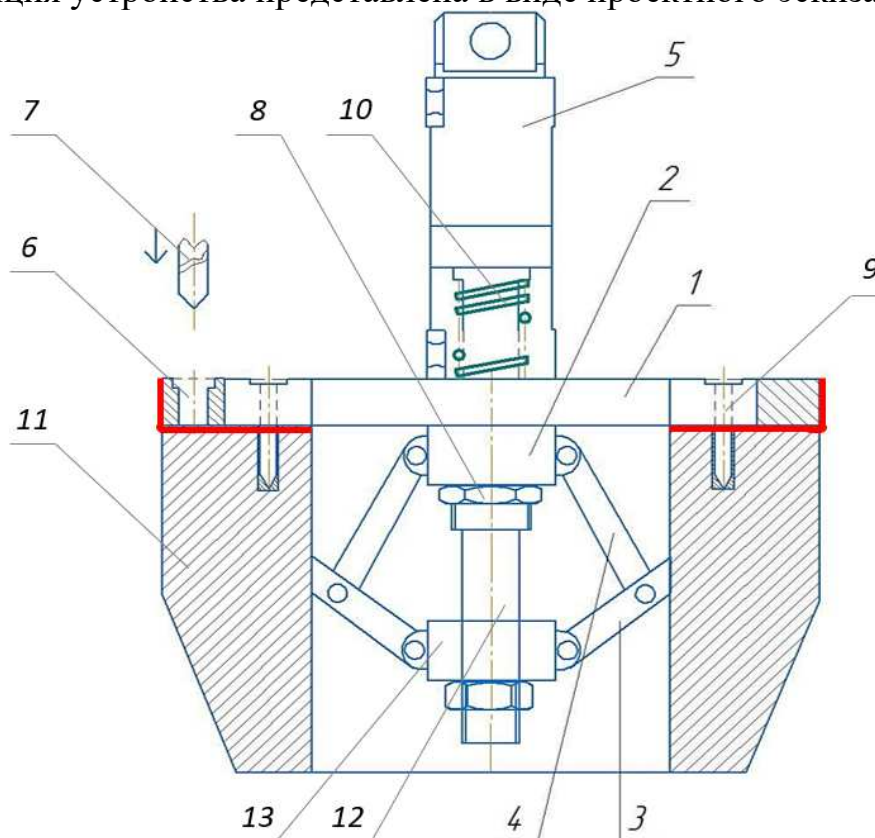


Рис. 3. Автоматизированный кондуктор для восстановления резьбовых отверстий подшипникового щита ТЭД ЭК-810: 1 – кондукторная плита; 2 – опора; 3 – зажимной рычаг; 4 – тяга рычага; 5 – пневмоцилиндр; 6 – кондукторная втулка; 7 – режущий инструмент; 8 – гайка; 9 – штифт; 10 – возвратная пружина; 11 – горловина МЯП

Автоматизированный кондуктор с пневматическим приводом включает кондукторную плиту 1, опору 2, зажимные рычаги 3 с тягами 4 и пневмоцилиндр 5 (см. рис. 3). В кондукторной плите устанавливаются кондукторные втулки 6 для направления осевого режущего инструмента 7 (сверла или зенкера) и повышения его радиальной жесткости при обработке отверстий под резьбу. Плита комплектуется набором закаленных сменных или быстросменных кондукторных

втулок под сверло и зенкер в отдельности, учитывая разность их диаметров, для повышения производительности обработки за счет сокращения времени на последовательную смену втулок под каждый инструмент. Кондукторная плита по диаметру соответствует крышке крепления МЯП и точно копирует положение восстанавливаемых отверстий.

На кондукторной плите 1 по центру устанавливается и закрепляется пневмоцилиндр 5 с фиксацией снизу при помощи опоры 2 и нажимной гайки 8. Пневмоцилиндр содержит две рабочие камеры, оснащен выдвижным штоком 12, на конце которого закреплена готовка 13, и возвратной пружиной 10.

Кондуктор оснащен шарнирно-рычажным зажимным механизмом, который состоит из опоры 2, зажимных рычагов 3, тяг 4, шарнирно соединяющих рычаги с опорой. При этом свободным концом зажимные рычаги закрепляются на головке 13 штока 12 (см. рис. 3).

Подшипниковый щит при обработке устанавливается на стол станка и закрепляется прижимами, а кондукторная плита 1 вставляется в посадочное отверстие крышки МЯП в горловине 11 (см. рис. 3) и ориентируется строго по комбинированной поверхности 3 (см. рис. 2). При этом соблюдается схема базирования, лишаящая плиту пяти степеней свободы, за счет создания трех опорных точек на плоской поверхности и двух точек – на цилиндрической стенке горловины. Окончательное базирование кондуктора осуществляется одним или двумя штифтами 9, которые вводятся в позиционные отверстия 2 Ø10 мм (см. рис. 2) горловины МЯП 11 через кондукторную плиту 1 (см. рис. 3).

При подаче сжатого воздуха в нижнюю рабочую камеру пневмоцилиндра 5 шток 12 поднимается, разводя зажимные рычаги 3, связанные через тяги 4 с опорой 2, в стороны и прижимая их к стенке отверстия горловины 11. Далее производится обработка отверстий 1 под резьбу М16-6Н осевыми режущими инструментами, проходящими через отверстия в кондукторных втулках, и нарезание восстанавливаемой резьбы (см. рис. 2). После окончания обработки воздух поступает в верхнюю рабочую камеру пневмоцилиндра 5 и шток 12 опускается вниз, отводя зажимные рычаги 3 от стенки горловины 11 и освобождая кондукторную плиту из щита, после чего кондуктор снимается. Возвратная пружина 10 обеспечивает дополнительное отжатие штока вниз.

Таким образом, в ходе проектных изысканий отмечено, что рекомендуемая технология восстановления резьбовых отверстий в подшипниковом щите тягового электродвигателя ЭК-810 электровоза 2ЭС6 позволит:

1. Повысить точность обработки за счет направления режущего инструмента через отверстия кондукторных втулок и снижения вибраций, радиального биения и упругих деформаций инструмента, обеспечив работу на более высоких скоростях резания.

2. Уменьшить погрешность шага относительного расположения ремонтируемых отверстий и повысить точность их позиционного допуска в результате устранения увода инструмента от оси просверливаемого отверстия.

3. Повысить производительность ремонта за счет исключения предварительной разметки отверстий, а также повысить точность обработки крупногабаритных подшипниковых щитов на радиально-сверлильных станках, не оснащенных системой числового программного управления (ЧПУ).

Проектное решение готовится к подаче заявки на патент на полезную модель «Автоматизированный кондуктор для восстановления резьбовых отверстий в подшипниковом щите тягового электродвигателя».

Список литературы

1. Долгова А.В., Шкодун П.К. К вопросу о совершенствовании технологии ремонта тяговых электродвигателей локомотивов // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, №1-2 (13). – С. 51-54. – URL: <https://moluch.ru/archive/13/1064>.
2. Емелин А.В., Зименский А.С., Савенко А.В. Ремонт корпусов, подшипниковых щитов и резьбовых соединений электрических машин мощностью от 1 до 25 кВт // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – №8-2(66). – С. 100-102.
3. Захаров Ю.А., Ремзин Е.В., Мусатов Г.А. Анализ способов восстановления корпусных деталей транспортно-технологических машин и комплексов // Молодой ученый. – 2014. – №19 (78). – С. 202-204. – URL: <https://moluch.ru/archive/78/13647>.
4. Волков А.Н. Устройство и ремонт электровоза 2ЭС6 «Синара»: учебное пособие. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. – 680 с. – URL: <https://umczdt.ru/books/1202/242196/>.

Сведения об авторе:

Муравьев Дмитрий Валерьевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

АНАЛИЗ ВИЗИТНЫХ КАРТ ОРГАНИЗАЦИЙ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Фуфаева В.М.
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

Ключевые слова: машиностроение, визитная карта, выставка, QR-код, реклама, маркетинг, сравнительный анализ, эргономика.

Аннотация. В статье рассмотрены визитные карты организаций машиностроительного комплекса с целью изучения размещаемой на них информации. Внимание уделено наличию символьных элементов, а также наличию и числу QR-кодов, представляющих собой элементы эргономического подхода в рекламе, управлении и продвижении деятельности организаций машиностроительного комплекса.

ANALYSIS OF BUSINESS CARDS OF ORGANIZATIONS OF THE MODERN MACHINE-BUILDING COMPLEX

Panteleeva A.M., Golovanov I.Yu., Lagutkin M.G., Fufaeva V.M.
MIREA – Russian Technological University, Moscow

Keywords: mechanical engineering, business card, exhibition, QR code, advertising, marketing, comparative analysis, ergonomics.

Abstract. The paper presents an analysis of business cards of organizations of the machine-building complex in order to study the information placed on them. Attention is paid to the presence of symbolic elements, as well as the presence and number of QR codes, which represent elements of an ergonomic approach to advertising, management and promotion of the activities of organizations of the machine-building complex.

В условиях стремительного развития цифровых технологий существенно расширяются возможности интеграции различных форм представления информации.

Современные инструменты позволяют сочетать текстовые и графические элементы, формируя комплексные информационные конструкции, отличающиеся высокой степенью наглядности и удобства восприятия. Подобный синтез лежит в основе креолизованных текстов, где смысл формируется за счёт тесного взаимодействия вербальных и визуальных компонентов, а исключение любого из них приводит к нарушению целостности сообщения [1].

Одним из примеров реализации креолизованных текстов являются визитные карты. Их оформление напрямую влияет на эффективность взаимодействия с потенциальной аудиторией. В частности, использование QR-кодов позволяет перенести часть информации во внешние цифровые источники, тем самым снижая нагрузку информацией на визитной карте.

Следует учитывать, что высокая плотность информационного потока в современном медиaprостранстве снижает эффективность традиционных текстовых форм передачи данных: их обработка требует большего времени и когнитивных усилий. В этих условиях визуальные средства коммуникации

приобретают приоритетное значение, обеспечивая более быстрое и интуитивное усвоение содержания.

Анализ визитных карт показывает, что такие элементы, как QR-коды, применяются недостаточно активно. Значительное количество организаций по-прежнему предпочитает перегружать карту информацией, что негативно сказывается на её восприятии [2].

Проанализируем степень креолизации текста визитных карт организаций машиностроительного комплекса, собранных на специализированных выставках:

- 1) 27-я Международная специализированная выставка «Шины, РТИ и каучуки-2025», проходившая с 14 по 17 апреля 2025 года в ЦВК «Экспоцентр» [3];
- 2) 25-я юбилейная Международная выставка «Металлообработка-2025», проходившая с 26 по 29 мая 2025 года в ЦВК «Экспоцентр» [4].

Совокупно в выставках приняли участие 1519 организаций из 12 стран: Беларуси, Индии, Ирана, Италии, Китая, Кореи, Малайзии, Пакистана, России, Таиланда и Турции [3, 4].

Для анализа было собрано 105 визитных карт. Определим количество карт, в дизайне которых применяются графические элементы (например, миниатюра дома, вместо слова «адрес»). Также разделим карты по наличию и количеству QR-кодов.

На рисунке 1 представлена статистика наличия графических элементов на визитных картах организаций машиностроительного комплекса.



Рис. 1. Наличие графических элементов на визитных картах

Статистика, представленная на рисунке 1 показывает, что лишь треть организаций машиностроительного комплекса использует графические символы. Большая же часть организаций перегружает карты информацией.

Наличие графических элементов способствует формированию более структурированной и доступной для восприятия информации.

На рисунке 2 представлена статистика наличия и количества QR-кодов на визитных картах организаций машиностроительного комплекса.

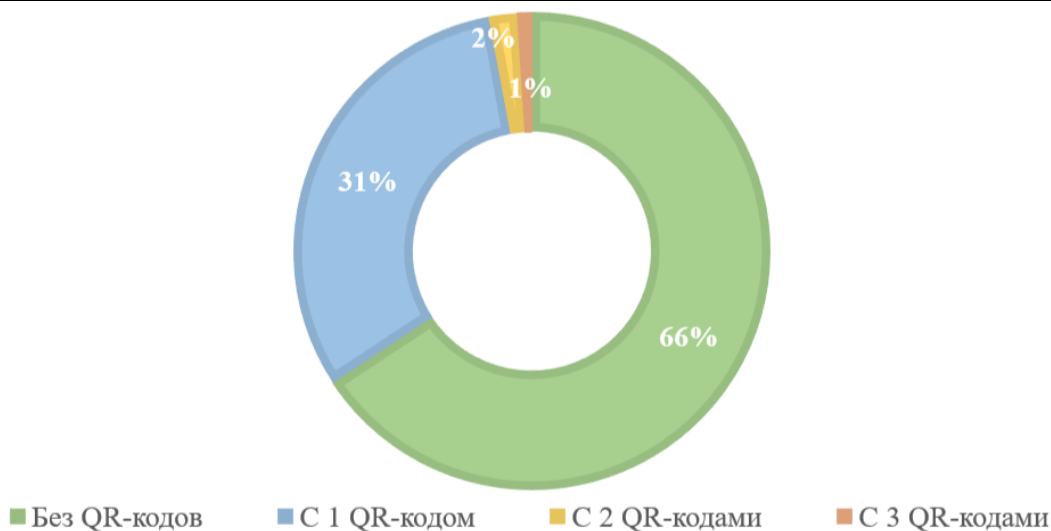


Рис. 2. Наличие и количество QR-кодов на визитных картах

Из рисунка 2 можно сделать вывод, что только третья часть организаций применяет QR-коды. Карты с 2 и 3 QR-кодами отличаются наиболее простым для восприятия дизайном, что важно в области эргономики маркетинга организации.

Список литературы

1. Дергачев К.В., Кузьменко А.А., Спасенников В.В. Анализ взаимосвязи объекта и парадигмы исследования в эргономике с использованием информационных технологий // Эргодизайн. – 2019. – №1(3). – С. 12-22.
2. Голованов И.Ю., Даянова Д.Д., Рештаненко А.А., Тишина А.Ю., Чернявская В.В., Щетинина Ю.В. Креолизация рекламного текста в современной промышленности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – №9(159). – DOI: 10.60797/IRJ.2025.159.9.
3. Итоги выставки «Шины, РТИ и каучуки-2025» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.expoctr.ru/ru/press-center/press-releases/itogi-vystavki-shiny-rti-i-kauchuki-2025/?ysclid=mmxj49trgg965754145&clckid=56439656>.
4. Итоги выставки «Металлообработка-2025» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.expoctr.ru/ru/press-center/press-releases/itogi-vystavki-metalloobrabotka-2025/?ysclid=mmxj3z1kps244985672&utm_source=ya.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=ya.ru&utm_referrer=ya.ru&clckid=0d8acd4e.

Сведения об авторах:

Пантелеева Алина Михайловна – студент;

Голованов Иван Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Лагуткин Михаил Георгиевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Фуфаева Валентина Михайловна – к.т.н., преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ПРИ ПАТЕНТОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

*Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Фуфаева В.М.
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

Ключевые слова: патентование, нейросеть, техническое устройство, разработка, совершенствование устройства, изобретение.

Аннотация. В статье представлен краткий обзор и анализ перспектив использования нейросетей при патентовании разработок в области техники. Выделены основные преимущества и недостатки использования современных нейросетей. На основании проведенного обзора и анализа отмечена перспективность создания заявок для патентования новых технических разработок на основе обзорных статей, каталогов и справочников.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF USING NEURAL NETWORKS IN PATENTING TECHNICAL DEVELOPMENTS

*Panteleeva A.M., Golovanov I.Yu., Lagutkin M.G., Fufaeva V.M.
MIREA – Russian Technological University, Moscow*

Keywords: patenting, neural network, technical device, development, device improvement, invention.

Abstract. The paper presents a brief overview and analysis of the prospects for using neural networks in patenting developments in the field of technology. The main advantages and disadvantages of using modern neural networks are highlighted. Based on the conducted review and analysis, the prospects of creating applications for patenting new equipment based on review articles, catalogs and reference books were noted.

Появление нейросетей вызвало интерес у инженеров, их начали рассматривать как новый инструмент в решении технических задач.

С одной стороны, нейросеть можно использовать в роли «виртуального ассистента» инженера: она быстро отвечает на вопросы по проектированию, генерирует код и готовит текстовые описания технических устройств. Эти качества способствуют ускорению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, сокращению затрат труда на рутинные операции.

С другой стороны, возникает вопрос качества получаемых результатов и затрат времени, необходимых на проверку их достоверности [1-4].

Преимущества использования нейросетей [1-4]:

1. Нейросеть может выступать интеллектуальным консультантом в технической поддержке и ускорении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: она предлагает варианты конструктивных решений, альтернативных материалов, выявляет потенциальные проблемы устройства. Всё это служит хорошей отправной точкой для дальнейшей доработки устройства.

2. Нейросеть эффективно генерирует черновики текстов: описания изделий, технические отчёты, пояснительные записки. Можно отметить, что получаемые нейросетью тексты не имеют ошибок в орфографии и грамматике, что заметно упрощает доработку документов. Использование нейросетей для первичной формулировки заявок на патенты позволяет сократить время на их оформление.

3. Нейросеть выступает генератором решений при поиске нетривиальных подходов. Даже если предложение от нейросети неполное и требует доработки, оно расширяет круг потенциальных решений. Таким образом, нейросеть может стать альтернативой привычному «мозговому штурму».

4. На основе имеющихся данных нейросеть может создать таблицы, подписи к фигурам и проанализировать экспериментальные данные, делая информацию в заявке более связной и понятной. Всё это может положительно отразиться на ясности формулировок в патентных заявках.

Недостатки и риски использования нейросетей [1-4]:

1. Главная проблема современных нейросетей – неточность и так называемые «галлюцинации». Нейросеть может приводить недостоверные данные, ссылаться на несуществующие нормативные документы и различные публикации. Генерация фигур по текстовому описанию часто получается в том виде, в котором их невозможно приложить к заявке на патент. Кроме того, нейросети отстают от последних технических стандартов, их данные могут не соответствовать новым нормативным документам. Это относится и к поправкам, вносимым в статьи гражданского кодекса Российской Федерации, в соответствии с требованиями которых должны быть подготовлены заявки на патенты. Если обновление нормативных документов, как и внесение поправок в различные базы, то научные публикации и патенты выходят регулярно – следовательно, в области новых технических разработок нейросеть существенно устаревает с каждым днём с момента её последнего обновления.

2. Передача уникальных технических текстов в нейросеть небезопасна: нейросети сохраняют пользовательские данные, включая введенную информацию, для своего обучения. Таким образом секреты производства, важные чертежи или формулы заявок могут попасть в тренировочный набор нейросети, а затем и в открытый доступ.

3. При перефразировании исходного запроса существенно изменяется получаемый ответ. Следовательно, требуется значительное количество времени для получения комплексного ответа на основании нескольких различных запросов, который мог бы дать полезный материал для создания заявки на патент.

Таким образом на данном этапе развития нейросетей, их можно использовать как мощный инструмент для генерации идей (метода перебора вариантов и «мозгового штурма»), с последующим контролем специалиста.

Стоит отметить, что многие утверждения в публикациях, посвящённых потенциалу использования нейросетей в инженерном деле, остаются гипотезами.

Например, отсутствует статистика о том, насколько ускоряется научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы при использовании нейросетей, сколько случаев утечек информации происходит в конкретных нейросетях.

На данный момент отсутствуют данные о сопоставлении преимуществ и недостатков разных нейросетей при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (в частности, при разработке и патентовании нового оборудования, написании заявок на патенты).

Очевидно, что в будущем необходима разработка методики обучения инженеров и патентных поверенных работе с нейросетями, а также необходима разработка стандарта безопасного взаимодействия с нейросетями [2-4].

Интерес представляет направление, в котором нейросеть создаёт заявки на патенты нового оборудования на основе обзорных статей, каталогов и справочников. Так может быть частично решена проблема «галлюцинаций» нейросетей. Однако, этот подход существенно ограничивает исходный материал для получения ответа. Такой подход позволит лишь определить перспективные направления для разработки оборудования, но не даст конкретных рекомендаций (ответ будет основан на общедоступной информации и будет очевиден для специалиста в данной области). Следовательно, с помощью данного подхода не могут быть получены и заявки на изобретения о новых способах (за исключением комбинированных способов из материалов исходного запроса).

Список литературы

1. Храмов С.А., Тихомиров Р.П., Меркулова Ю.А. Проблемы защиты интеллектуальных прав собственности в сфере использования нейросетей // International Law Journal. – 2023. – Т. 6, №8. – С. 182-186.
2. Рязанский А.В. Анализ библиометрических показателей в области развития и использование ChatGPT. Часть 1 // Научные высказывания. – 2025. – №16(84). – С. 10-17.
3. Рязанский А.В. Анализ библиометрических показателей в области развития и использование ChatGPT. Часть 2 // Научные высказывания. – 2025. – №16(84). – С. 18-24.
4. Liu Ch., Fomin N.I., Xiao Sh., Sun G., Lyu Yu. How ChatGPT Is Shaping Next-Generation Patent Solutions // Buildings. 2025, vol. 15, no. 13, p. 2273.

Сведения об авторах:

Пантелеева Алина Михайловна – студент;

Голованов Иван Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Лагуткин Михаил Георгиевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Фуфаева Валентина Михайловна – к.т.н., преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОСТЕННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

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

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

Ключевые слова: остаточные напряжения, оболочка, метод конечных элементов, остаточные напряжения, автофреттирование, толстостенная сфера.

Аннотация. Исследование посвящено вопросу моделирования поля остаточных напряжений в стенке толстостенной сферической оболочки, нагруженной внутренним давлением, с помощью метода конечных элементов. Проведена качественная оценка распределения остаточных главных напряжений в стенке сферы для упругопластической модели материала с линейным изотропным упрочнением. По результатам расчетов эквивалентные остаточные напряжения немонотонно изменяются по толщине стенки, принимая наибольшие значения на внутренней поверхности.

FINITE ELEMENT MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN THE WALL OF A THICK-WALLED SPHERICAL SHELL UNDER INTERNAL PRESSURE LOADING

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

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

Keywords: residual stresses, shell, finite element method, residual stresses, autofrettage, thick-walled sphere.

Abstract. The study is devoted to the modeling of the residual stress field in the wall of a thick-walled spherical shell loaded with internal pressure using the finite element method. A qualitative assessment of the distribution of residual principal stresses in the wall of a sphere for an elastoplastic material model with linear isotropic hardening is performed. According to the results of the calculations, the equivalent residual stresses vary non-monotonically along the thickness of the wall, reaching their maximum values on the inner surface.

При построении численных методик расчета напряженно-деформированного состояния толстостенных оболочек в условиях нагружения и разгрузки, решения упругопластических задач автофреттирования [1-3] важное значение имеет вопрос оценки адекватности разрабатываемых математических моделей. Для решения данной проблемы широко используются различные пакеты конечно-элементного анализа, которые позволяют анализировать напряженно-деформированное состояние тела при заданных условиях нагружения. В рамках данного исследования требовалось провести расчет поля остаточных напряжений в стенке толстостенной сферы, нагруженной внутренним давлением с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Ansys и проанализировать напряженное состояние в стенке оболочки. При этом поведение материала описывалось упругопластической моделью с линейным изотропным упрочнением.

Расчет проводился для сплава 15Х12ВНМФ с механическими характеристиками: модулем Юнга $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона 0,3,

пределом текучести 510 МПа, модулем упругости 1011 МПа. В виду центральной симметрии при действии равномерного давления была рассмотрена 1/8 часть сферы с (рис. 1), для которой были определены граничные условия. Внутренний радиус сферы принимался 50 мм, а внешний радиус – 100 мм. При проведении серий численных экспериментов была подобрана конечно-элементная сетка со следующими характеристиками: 42958 узлов и 9750 элементов. Приложенное равномерное внутреннее давление достигало значения 800 МПа.

По результатам численных экспериментов на рисунке 2 представлено распределение остаточных эквивалентных напряжений по Мизесу в стенке оболочки. Учитывая заданные условия нагружения, следует отметить, что радиальные и окружные напряжения, возникающие в оболочке, будут являться главными. Соответственно, на рисунке 3, рисунке 4 представлено распределение минимальных и максимальных главных остаточных напряжений.

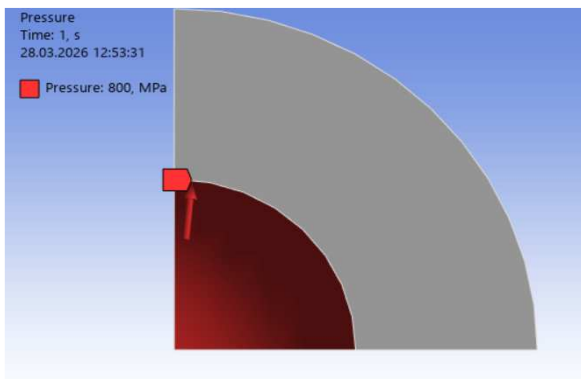


Рис. 1. Постановка задачи исследования

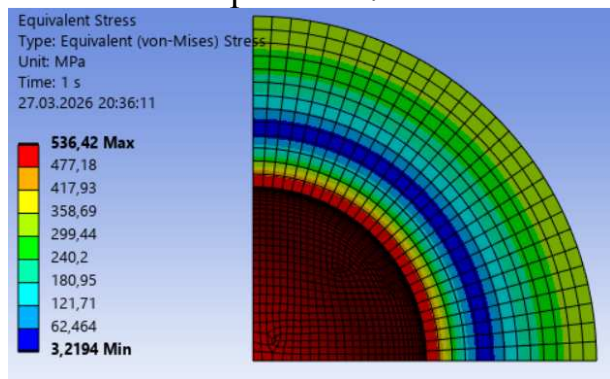


Рис. 2. Эквивалентные остаточные напряжения в сфере при разгрузке

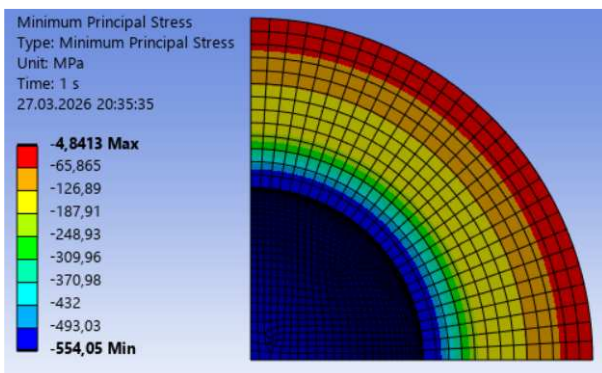


Рис. 3. Минимальные остаточные главные напряжения в сфере при разгрузке

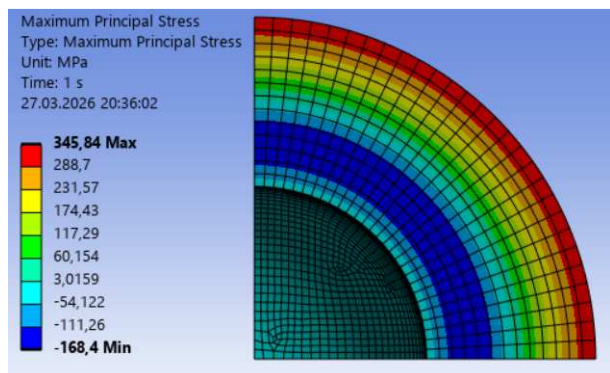


Рис. 4. Максимальные остаточные главные напряжения в сфере при разгрузке

Согласно результатам расчета стенка перешла в стадию пластического деформирования. Максимальные главные остаточные напряжения распределены по толщине стенки неравномерно и отличаются немонотонностью. Вблизи внутренней поверхности напряжения принимают отрицательные значения, а вблизи наружной – положительные. При этом в области между внутренней поверхностью стенки и срединной поверхностью напряжения достигают минимума. Анализируя минимальные главные остаточные напряжения, можно отметить, что напряжения являются сжимающими, монотонно уменьшаются по толщине, принимая наибольшее по модулю значение на внутренней границе, а

наименьшее – на внешней границе. Согласно распределению остаточных эквивалентных напряжений наибольшие значения достигаются на внутренней поверхности. По мере продвижения вдоль радиальной координаты напряжения сначала уменьшаются, достигая минимума, а затем возрастают. Таким образом, полученные результаты наглядно демонстрируют наличие кольца остаточных сжимающих напряжений на внутренней поверхности сферы при разгрузке.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-79-10135, <https://rscf.ru/project/25-79-10135/>.

Список литературы

1. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К. Гидростатическое сжатие толстостенной сферической оболочки при нелинейном законе упрочнения // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – №4-3(70). – С. 169-174. – DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.020.
2. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К. Оценка несущей способности оболочек с центральной симметрией в условиях физической и геометрической нелинейностей // Жилищное строительство. – 2025. – №12. – С. 12-17. – DOI: 10.31659/0044-4472-2025-12-12-17.
3. Андрианов И.К. Уравнение совместности деформаций Генки в задаче о нагружении несжимаемой толстостенной сферической оболочки внешним давлением // Актуальные математические проблемы механики деформируемого твердого тела: Материалы VIII Всероссийской с международным участием научной конференции, посвященной 60-летию создания Донецкого научного центра, Донецкого государственного университета и научной школы академика Александра Сергеевича Космодамианского, Донецк - Севастополь, 18-21 сентября 2025 года. – Донецк: ФГБОУ ВО "Донецкий государственный университет", 2025. – С. 18-20.

Сведения об авторах:

Чепурнова Елена Константиновна – научный сотрудник;

Андрианов Иван Константинович – к.т.н., доцент;

Солецкий Вячеслав Вадимович – научный сотрудник;

Чернышова Дарья Витальевна – научный сотрудник.

ИЗУЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ОСНОВЫ ТРИБОТЕХНИКИ» В ФОРМАТЕ УЧЕБНОГО ОНЛАЙН КУРСА

*Дмитриева Л.А., Лукьянов А.С., Стариков А.И.
Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: триботехника, трение, трибосистема, обучение, учебный курс, тестирование.
Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы изучения дисциплины «Основы триботехники» в формате учебного онлайн курса. Приведены общие характеристики этой дисциплины. Цели и задачи при освоении курса. Возможность проверки знаний обучающихся тестированием, для чего создается банк вопросов. Материалы могут быть полезны для студентов и аспирантов, обучающихся на инженерных специальностях.

STUDYING THE DISCIPLINE «FUNDAMENTALS OF TRIBOLOGY» IN THE FORMAT OF AN ONLINE TRAINING COURSE

*Dmitrieva L.A., Lukyanov A.S., Starikov A.I.
Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: tribotechnics, friction, tribosystem, training, course, testing.

Abstract. This article discusses the study of the course "Fundamentals of Tribology" as an online course. It provides general characteristics of the course, along with the goals and objectives for mastering the course. A question bank is created to test students' knowledge. The materials may be useful for undergraduate and graduate students studying engineering specialties.

Управление трением – правильный выбор материалов по трению и износостойкости, рациональное конструирование подвижных сопряжений и оптимизация условий эксплуатации – может существенно продлить срок жизни машин при незначительном увеличении их стоимости [1].

Трибология, как научная дисциплина, охватывает экспериментально-теоретические исследования физических (механических, электрических, магнитных, тепловых), химических, биологических и других явлений, связанных с трением.

Трибосистема – сложная термодинамическая система, образуемая при взаимодействии трущихся тел, а также промежуточной среды и части окружающей среды. Это совокупность всех участвующих в процессах трения, изнашивания и теплообразования элементов их свойств и связей, параметров, воздействующих на эти элементы извне, а также характеристик трения, изнашивания и теплообразования.

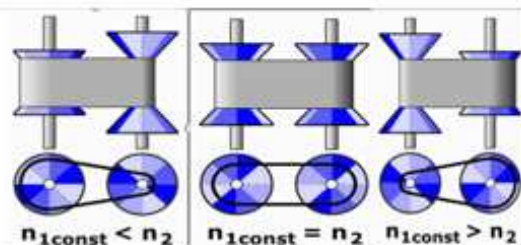
Триботехника – это упорядоченные знания о практическом применении трибологии, это техническая наука о практическом применении трибологии при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации трибологических систем (узлов трения и деталей машин, приборов и аппаратов, а также инструментов в технологических производствах) [2].

Изучение дисциплины «Основы триботехники» в формате онлайн курса значительно облегчает задачу по усвоению материала обучающимися. Дает свободу изучения предлагаемого учебного материала по времени. Преподавателю

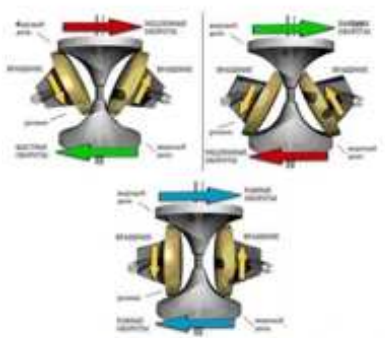
дает возможность представить лекции, в режиме видеолекций, и в печатном виде. Проверять знания учащихся с помощью тестирования. Оценивать расчетно-графические работы и сохранять их для дальнейшего исправления. Размещать на страницах курса научную и учебную литературу, сообразно изучаемому разделу. Заставки для лекций с фотографиями, рисунками, чертежами дают представление о излагаемом в разделе материале. Фрагмент раздела «Трение» (рис. 1).

Раздел 3. Трение (4 часа)

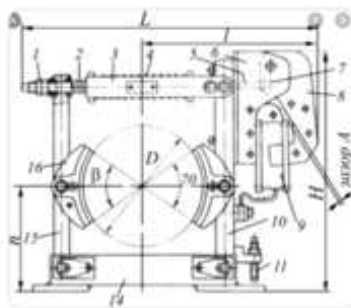
Без трения невозможна работа многих механических систем, а работа ременных передач, фрикционных вариаторов, тормозов и муфт целиком основана на использовании сил трения.



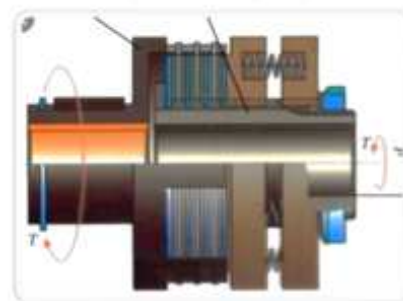
Клиноременный вариатор



Торцовый вариатор



Двухколодный тормоз



Дисковая фрикционная муфта

Рис. 1. Фрагмент раздела «Трение»

К основным целям освоения дисциплины «Основы триботехники» следует отнести:

- освоение теоретических основ надежности, долговечности и эффективности работы узлов машин, связанными с их преждевременным износом и повышенными потерями энергии на непроизводительное трение механических трибосистем;

- изучение принципов работы, свойства, технические характеристики, конструктивные особенности и нагруженность деталей и узлов общемашиностроительного применения.

К основным задачам:

- изучение природы трения, износа и смазочного действия реализуемых в машинах;

- анализ реальных процессов, происходящих в реальных машинах, снижающих эффективность их работы и экономические показатели;

- поиски реальных триботехнических решений для модернизации имеющегося парка оборудования и разработки вновь создаваемых машин. Для решения этих задач и разработан курс «Основы триботехники».

Курс предназначен для подготовки бакалавров и специалистов по любому направлению, очной, очно-заочной и заочной форм обучения. Может быть полезен для специалистов, магистров, инженеров, аспирантов. Использован для курсов повышения квалификации по специальности «инженер-триболог».

Создатель курса имеет возможность записать пользователей на курс, как группой, так и индивидуально. Контролировать пользователя по времени, затраченному на изучения курса. Просматривать журнал событий. Контролировать обучение, с помощью отчета по элементам курса и выполнение элементов курса, по дате и затраченному времени на изучение раздела или темы. Отслеживать участие в курсе. Проверять знания обучающегося по вопросам тестовых заданий, для чего создается банк вопросов.

После освоения онлайн курса «Основы триботехники» обучающиеся будут знать достижения науки и техники, передовой, отечественный и зарубежный опыт в области триботехники; методы исследований взаимодействия триботехнических систем. Уметь решать различные инженерные триботехнические задачи; использовать моделирование процессов трения и изнашивания. Владеть методами и приемами для объективной оценки качества работы узлов трения машин, поиском реальных триботехнических решений для модернизации парка оборудования и разработки вновь создаваемых машин; навыками расчета и принципом оптимизации трибосистемы; выбором наиболее эффективных методов изготовления, обработки и упрочнения трибологических материалов [3].

Список литературы

1. Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике: теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
3. Лужнов Ю.М., Александров В.Д. Основы триботехники: учебное пособие / под ред. Ю.М. Лужнова. – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.

Сведения об авторах:

Дмитриева Людмила Александровна – старший преподаватель кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»;

Лукьянов Александр Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»;

Старилов Алексей Игоревич – старший преподаватель кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование».

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ В СФЕРЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМИ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

Бирюкова И.П.¹, Панюшкин Н.Н.²

¹*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж;*

²*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж*

Ключевые слова: формирование компетенций, лабораторный практикум, физический эксперимент, статистическая обработка информации, статистическая гипотеза.

Аннотация. Рассматривается проблема формирования общепрофессиональных компетенций у студентов инженерных специальностей и направлений подготовки в лабораторном практикуме по физике. Предлагается включать в лабораторные работы задания на проверку статистических гипотез и построение регрессионных моделей, что позволит заложить методологическую основу для дальнейшего формирования компетенций будущих инженеров в сфере статистической обработки информации.

FORMATION OF COMPETENCIES IN THE FIELD OF STATISTICAL INFORMATION PROCESSING IN PHYSICS LABORATORY WORKSHOPS

Biryukova I.P.¹, Panyushkin N.N.²

¹*Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh;*

²*Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh*

Keywords: competence formation, laboratory practice, physical experiment, statistical information processing, statistical hypothesis.

Abstract. The article discusses the problem of developing general professional competencies among engineering students through laboratory work in physics. The authors propose including tasks for testing statistical hypotheses and constructing regression models in laboratory work, which would lay the methodological foundation for the further development of future engineers' competencies in statistical information processing.

Начальному этапу формирования общепрофессиональных компетенций, в том числе в физических практикумах технических вузов, уделяют внимание многие исследователи высшей школы. Создаются модели формирования компетентности инженеров при выполнении лабораторных работ, в рамках которых студенты включаются в практическую деятельность поискового характера, способствующую формированию положительной мотивации к выполнению исследований, освоению физических теорий и их практического применения, овладению методологией физического эксперимента, развитию личностных качеств, необходимых в исследовательской деятельности будущих специалистов [1, 2]. Предлагаются методики организации физических практикумов для многоуровневого формирования исследовательских компетенций [3].

В настоящее время специалист технического профиля должен обладать компетенциями в области статистического анализа информации. Это вызвано сложностью и стохастическим характером функционирования многих современных технических систем. Лабораторный практикум по физике дает возможность освоить некоторые наиболее часто используемые методы математической статистики в условиях практической деятельности.

Статистические методы в физических практикумах используются в первую очередь для обработки результатов измерений, но данные методы можно применять и на стадии планирования физического эксперимента. В частности, в лабораторных работах, в которых требуется исследовать зависимости между физическими величинами с большими дисперсиями, доверительные интервалы зависимой переменной при выбранном шаге изменения независимой переменной могут значительно перекрываться. Тогда необходимо выяснять, равны ли измеренные средние значения зависимой переменной при разных значениях независимой переменной, или это равенство является следствием случайных погрешностей измерений. Например, при определении зависимости периода колебаний математического маятника от длины нити требуется определить оптимальный шаг изменения независимой переменной. В результате экспериментов при двух значениях длины нити средние значения времени заданного количества колебаний могут различаться незначительно. Необходимо проверить, является ли это различие статистически значимым, или оно вызвано случайными факторами, влияющими на лабораторную установку во время эксперимента. В этом случае проверяется гипотеза о равенстве средних значений времени заданного числа колебаний при различных шагах изменения длины нити маятника и определяется наименьший шаг, при котором различие становится статистически значимым для заданного числа измерений. Можно также определить оптимальное количество требуемых измерений или оптимальное число колебаний при заданном шаге варьирования длины нити.

При проверке гипотезы о равенстве средних значений рекомендуется использовать критерий Стьюдента. Для обоснования правомерности применения критерия Стьюдента проводится проверка гипотезы о равенстве дисперсий времени колебаний при различных значениях длины нити с помощью критерия Фишера-Снедекора. Если при некотором значении шага независимой переменной гипотезу о равенстве средних значений зависимой переменной не удастся отвергнуть, то делается вывод о необходимости увеличения шага изменения независимой переменной или объема выборки. Таким образом, с помощью проверки статистических гипотез о равенстве средних значений и дисперсий измеряемых физических величин можно определить значение шага варьирования независимой переменной при заданном количестве измерений или оптимальное значение количества измерений при заданном шаге, для того чтобы различие средних значений было статистически значимым.

В физическом практикуме можно использовать регрессионный анализ при исследовании зависимостей между физическими величинами. Рекомендуется использовать линейную регрессию, как наиболее простую процедуру регрессионного анализа, и для вычисления коэффициентов применять метод наименьших квадратов. Задачу построения линейной регрессии можно включать в

лабораторные работы, в которых изучаются зависимости между физическими величинами, имеющими большую дисперсию измеряемых значений. Для примера рассмотрим лабораторную работу, в которой осуществляется экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость определяется по напряжению на термоэлементе, температура источника теплового излучения, в качестве которого используется нить накала галогенной лампы, находится из формулы зависимости сопротивления металлов от температуры. Согласно закону Стефана-Больцмана тангенс угла наклона прямой, изображающей зависимость натурального логарифма напряжения на термоэлементе от натурального логарифма температуры, должен быть равен четырем. Для повышения точности определения этой величины привлекается метод наименьших квадратов.

Для корректного проведения процедур проверки статистических гипотез и регрессионного анализа требуется большой объем данных, поэтому выполнение экспериментов необходимо организовать как работу в малых группах с обменом результатами измерений. Таким образом, включение в лабораторные работы по физике заданий на проверку статистических гипотез и построение регрессионных моделей позволит заложить методологическую основу для дальнейшего формирования компетенций будущих инженеров в сфере статистического анализа информации.

Список литературы

1. Алексеенко А.В., Алексеенко А.Е. Модель формирования профессиональной компетентности будущих инженеров // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – №3. – С. 112-121.
2. Глухова Ж.Л., Щеголева Т.А. Роль физического практикума в формировании общепрофессиональных компетенций будущих инженеров // Современное состояние и пути совершенствования образовательного процесса: Материалы X Республиканской научно-методической конференции, Донецк, 06 февраля 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 54-58.
3. Бирюкова И.П., Панюшкин Н.Н. Формирование исследовательских компетенций в физическом практикуме // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: НИЦ МС, 2023. – №6. – С. 85-87.

Сведения об авторах:

Бирюкова Ирина Петровна – к.п.н., доцент, профессор кафедры физики и химии;

Панюшкин Николай Николаевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры общей и прикладной физики.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

*Пантелеева А.М., Голованов И.Ю., Лагуткин М.Г., Стрельникова В.О.
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

Ключевые слова: инженерное образование, цифровая трансформация, мультимодальный формат, визуализация, QR-код, образовательная технология.

Аннотация. В статье рассматриваются системные трудности, возникающие в современном инженерном образовании на фоне цифровизации и усложнения научно-технической информации. Особое внимание уделено внедрению QR-кодов как средств цифровизации информации. Показано, что переход к мультимодальным образовательным форматам является необходимым условием повышения эффективности подготовки инженерных кадров.

TRANSFORMATION OF ENGINEERING EDUCATION IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION

*Panteleeva A.M., Golovanov I.Yu., Lagutkin M.G., Strelnikova V.O.
MIREA – Russian Technological University, Moscow*

Keywords: engineering education, digital transformation, multimodal format, visualization, QR code, educational technology.

Abstract. The paper presents examines the systemic difficulties that arise in modern engineering education against the background of digitalization and the increasing complexity of scientific and technical information. Special attention is paid to the introduction of QR codes as a means of digitalization of information. It is shown that the transition to multimodal educational formats is a necessary condition for improving the effectiveness of engineering personnel training.

Интенсивная цифровизация затрагивает как производственные процессы, так и образовательную среду. Цифровые технологии становятся важным фактором модернизации системы образования и требуют перестройки традиционных подходов к обучению. Одновременно наблюдается значительное усложнение содержания инженерных дисциплин, что повышает требования к способам передачи и усвоения информации. В этих условиях классические текстовые форматы уже не обеспечивают необходимого уровня понимания, особенно при изучении сложных технических объектов и процессов.

Одной из центральных проблем инженерного образования является перегрузка обучающихся информацией. Это связано не только с объёмом материала, но и с его структурной сложностью. В инженерных дисциплинах требуется интерпретация абстрактных моделей, понимание динамики процессов, формирование пространственного мышления. При этом линейное текстовое изложение часто не позволяет эффективно представить взаимосвязи между элементами системы.

Анализ учебных материалов позволяет выделить ряд устойчивых проблем: ограниченность печатного формата, не позволяющая использовать сложные визуализации; статичность представления, препятствующая демонстрации динамических процессов; снижение наглядности при использовании упрощённых

или монохромных изображений; невозможность охвата большого объёма данных в рамках одного издания. Особенно это проявляется в инженерных дисциплинах, где для понимания принципов работы оборудования желательны трёхмерные модели, анимации и подробные схемы [1, 2].

Современная образовательная практика опирается на сочетание различных способов передачи информации. Помимо текста активно используются графические схемы, таблицы и диаграммы, математические модели, визуальные и символные элементы. Такая интеграция формирует мультимодальные (креолизованные) тексты, в которых разные знаковые системы дополняют друг друга. Это позволяет повысить плотность и доступность информации, а также ускорить её восприятие [1-3].

Одновременно происходит активное развитие технологических областей, которые задают вектор современного инженерного образования. В их числе – аддитивное производство, трёхмерное сканирование, интеллектуальная аналитика данных и цифровые двойники. Внедрение этих практик в учебный процесс ведёт к значительному усложнению как теоретических работ (лекционный материал), так и экспериментальных (практические, семинарские, лабораторные занятия).

В этом контексте важную роль приобретают технологии, позволяющие интегрировать дополнительные информационные ресурсы непосредственно в учебный материал. Одним из таких инструментов являются QR-коды, обеспечивающие связь между текстом и цифровым материалом. Использование кодов открывает возможности для доступа к видеоматериалам и анимациям, включения интерактивных моделей и симуляций, расширения учебного материала без увеличения объёма издания, а также организации самостоятельной работы обучающихся. Таким образом, образовательное пространство становится гибридным, объединяя печатные и цифровые форматы [1, 2, 4].

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение цифровых технологий сопровождается рядом проблем [1-4]:

- 1) недостаточная методическая проработка их применения;
- 2) разрыв между техническими возможностями и педагогическими практиками;
- 3) неоднородный уровень цифровой подготовки преподавателей;
- 4) риск усиления нагрузки при избыточной мультимодальности.

Кроме того, цифровизация требует развития креативности, коммуникационных навыков и способности к междисциплинарному взаимодействию обучающихся. Из представленного анализа можно сделать вывод о необходимости решения следующих задач [2-4]:

- 1) обеспечение перехода к мультимодальным учебным материалам, объединяющим текст, визуализацию и цифровые элементы;
- 2) разработка методик интеграции интерактивных технологий в образовательный процесс;
- 3) формирование цифровой компетентности всех участников образовательного процесса;
- 4) баланс между традиционными и цифровыми формами подачи материала.

Особое значение имеет системное внедрение технологий, обеспечивающих интерактивность и вариативность обучения.

Таким образом, современные проблемы инженерного образования обусловлены несоответствием традиционных методов обучения новым тенденциям цифрового общества [3, 4].

Ограниченность текстовых форм подачи материала, недостаточная визуализация и слабая интерактивность препятствуют эффективному усвоению сложного материала [1-4].

Переход к мультимодальным и цифровым форматам, включая использование QR-кодов и других интерактивных инструментов, позволяет частично устранить ограничения текстового формата [3, 4].

В долгосрочной перспективе именно интеграция различных способов представления информации станет ключевым фактором повышения качества инженерного образования и подготовки специалистов нового поколения.

Список литературы

1. Голованов И.Ю., Даянова Д.Д., Рештаненко А.А., Тишина А.Ю., Чернявская В.В., Щетинина Ю.В. Креолизация рекламного текста в современной промышленности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – №9(159). – DOI: 10.60797/IRJ.2025.159.9.
2. Алисултанова Э.Д., Бисултанова А.А. Об эффективности влияния мультисенсорных цифровых подходов на процесс реализации инклюзивного образования // Вестник ГГНТУ. Гуманитарные и социально-экономические науки. – 2025. – Т. 21, №2(40). – С. 80-86.
3. Дубовицкая Л.В. Функции QR-кодов на примере креолизованных текстов письменной коммуникации // Вестник Московского государственного областного университета. – 2012. – №3. – С. 24-27.
4. Аистов Е.А., Аникин М.А., Антонова В.М., Богомоллова М.М., Маликова Е.Е. Методика использования в презентациях технологии QR-кодов при очной и заочных формах обучения в вузах // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. – 2019. – Т. 8, №3. – С. 16-19.

Сведения об авторах:

Пантелеева Алина Михайловна – студент;

Голованов Иван Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Лагуткин Михаил Георгиевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.;

Стрельникова Виктория Олеговна – старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.

Научное периодическое издание

Машиностроение: инновационные аспекты развития:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№ 9

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 7,67.
Подписано в печать 27.03.2026г. Заказ №26-06.
<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2026-9>

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