

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр  
«МашиноСтроение»**



Таразский инновационно-гуманитарный университет

Севастопольский государственный университет

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Омский государственный университет путей сообщения

**ISSN 2658-6185**

# **МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ПРАКТИКА**

**Материалы международной  
научно-практической конференции**

**№6**

Санкт-Петербург, 2023

УДК 531 : 621.01

ББК 34.4

М55

**М55            Механика и машиностроение. Наука и практика:**  
Материалы международной научно-практической конференции.  
– Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2023. – №6. – 108 с. – DOI:  
10.26160/2658-6185-2023-6.

Представлены материалы VI международной научно-практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика» (8 декабря 2023г.). Направления работы конференции: 1) Проблемы высшей школы в области машиностроения; 2) Механика деформируемого твердого тела; 3) Теория механизмов и машин; 4) Динамика и прочность машин; 5) Мехатроника и робототехника; 6) Технология машиностроения; 7) Машины, агрегаты и процессы; 8) Аддитивные технологии и производство; 9) Экономика и организация машиностроительного производства; 10) Инновационные проекты в машиностроении.

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* – заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, директор НИЦ «МашиноСтроение» (г.Санкт-Петербург), д.т.н., доцент.

**Редакционная коллегия:**

*Баубеков Сабит Джумабаевич* – начальник научного отдела ТИГУ (г.Тараз), д.т.н., профессор;

*Бохонский Александр Иванович* – профессор кафедры «Цифровое проектирование», СевГУ (г.Севастополь), д.т.н., профессор;

*Евграфов Александр Николаевич* – заведующий кафедрой теории механизмов и машин СПбПУ (г.Санкт-Петербург), к.т.н., доцент;

*Стихановский Борис Николаевич* – профессор кафедры информатики, прикладной математики и механики ОмГУПС (г.Омск), д.т.н., профессор.

ISSN 2658-6185

© Авторы, 2023  
© НИЦ МС, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

**Проблемы высшей школы в области машиностроения**

**Бохонский А.И., Рыжков А.И.** Традиции инженерного образования .....6

**Механика деформируемого твердого тела**

**Речицкий С.В., Речицкий А.С.** Теоретические исследования процесса взаимодействия вальца с местной деформацией в зоне уплотнения с уплотняемым материалом .....9

**Андрианов И.К., Чепурнова Е.К.** Оценка усталостного разрушения тонкостенной капсулы в системе обнаружения повреждений лопаток турбин при циклическом нагружении методом конечных элементов ..... 13

**Мыльников В.В.** Определение соотношения между напряжением и амплитудой колебаний для корсетных образцов при испытаниях на усталость ..... 16

**Комаров Ю.Ю., Шаталов Р.Л.** Влияние контактного трения на формирование силы прокатки и ширины по длине полос алюминиевого сплава АМц ..... 22

**Динамика и прочность машин**

**Хахов А.А.** Влияние динамических эффектов, возникающих при передвижении автомобильных кранов по неровной поверхности дороги, на напряженно-деформированное состояние металлических конструкций ..... 26

**Мехатроника и робототехника**

**Кривошеев Н.С., Жарковский А.А., Броднев П.Н.** Выбор типа пневмогидравлического привода станочного оборудования ..... 33

**Виноградов М.В., Самойлова Е.М., Рябов А.В.** Управление технологическим роботом ..... 41

**Технология машиностроения**

**Корниенко Р.Д., Маничев Д.С.** Состояние и перспективы развития высокоэнергетических методов обработки изделий в машиностроении ..... 44

<b>Каргапольцев С.К., Мозалевская А.К.</b> Особенности определения остаточных напряжений .....	47
<b>Сахаров А.В.</b> Технологическая идентификация 3-осевого фрезерного обрабатывающего центра .....	53
<b>Казимиров Д.Ю., Солер Я.И.</b> Предсказание поверхности отклика микротвердости нитинола при шлифовании .....	56

### **Машины, агрегаты и процессы**

<b>Пахомова Л.В., Белякова А.Е., Евсюков А.В., Савченко С.Д., Асташов М.А.</b> Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках .....	61
<b>Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.</b> Исследование работы и техническое освидетельствование насоса на металлургическом заводе.....	64
<b>Андросенко М.В., Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.</b> Методы технического диагностирования нагревательной печи с шагающими балками на металлургическом заводе .....	67
<b>Андросенко М.В., Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.</b> Исследование работы и техническое освидетельствование конвейера в условиях низких температур.....	70
<b>Захарова В.П., Васильев В.В.</b> Компенсация температурной погрешности металлорежущего станка с ЧПУ .....	73
<b>Пахомова Л.В., Земиров Н.А., Карманов М.В.</b> Техническое обслуживание и ремонт грузоподъемных кранов в XXI веке .....	77
<b>Олейник Д.Г., Белан О.А., Базыков А.Р.</b> К вопросу о долговечности технологического инструмента для изготовления высокопрочных болтов с фланцем.....	80
<b>Полушкин О.О., Полушкин О.А.</b> Основы системного подхода к балансировке роторов машин .....	83

### **Аддитивные технологии и производство**

<b>Ивченко Д.Д.</b> Дизайн и технологии 3D-печати в ракетостроении: инновации и перспективы .....	86
<b>Хрусталева А.Н., Акиншин И.Д.</b> Композиционные материалы титанат/полимер для СВЧ-приложений, получаемые методами аддитивного производства.....	90

**Экономика и организация машиностроительного производства**

**Пахомова Л.В., Гусейнова Д.Ф., Белоусова Е.М.** Охрана труда в транспортной отрасли..... 94

**Инновационные проекты в машиностроении**

**Михлик В.М., Курганова Ю.А., Калачев А.О.** Исследование структуры и свойств алюмо-графитной композиции ..... 97

**Болотеин А.Н., Юрков Д.С., Головкин А.С., Фролов С.С., Василенкова Е.М.** Разработка учебного демонстратора цифрового двойника на примере малоразмерного ГТД ..... 103

## ТРАДИЦИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*Бохонский А.И., Рыжков А.И.*

*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

**Ключевые слова:** теоретическая и прикладная механика, традиции инженерного образования, педагогическое мастерство, инварианты в техническом образовании.

**Аннотация.** Обращается внимание на историю и методы преподавания механики. Подчеркнута роль фундаментальных дисциплин в развитии интеллекта студентов. Несомненно важна роль изучения истории механики для понимания современных научных тенденций и поиска новых путей развития эффективного применения принципов и законов механики. Необходимо повысить подготовку по физике и математике для успешного изучения теоретической и прикладной механики! Обращается внимание на должное сохранение объемов фундаментальных дисциплин в техническом образовании и на связь теоретической механики с механикой деформируемого твердого тела. Богатое наследие классиков не исключает возникновения новых идей и методов, весьма полезных в различных областях современной техники. Обсуждаются традиции преподавания механики, развивающие интеллект: умение решать задачи и поиск баланса между традиционными и некоторыми новыми методами преподавания при использовании компьютерных технологий.

## TRADITIONS OF ENGINEERING EDUCATION

*Bokhonsky A.I., Ryzhkov A.I.*

*Sevastopol State University, Sevastopol*

**Keywords:** theoretical and applied mechanics, traditions of engineering education, pedagogical skills, invariants in technical education.

**Abstract.** Works on the history and methods of teaching mechanics are considered. The role of fundamental disciplines in the development of students' intelligence when studying methods for solving mechanics problems is emphasized. The importance of studying the history of mechanics is emphasized for understanding both modern scientific possibilities and for finding new ways of development. This is due to the knowledge of physics and mathematics necessary for the successful study of theoretical and applied mechanics. Attention is drawn to the preservation and development of fundamental disciplines in technical education and the connection between theoretical mechanics and the mechanics of deformable bodies. It is noted that the legacy of the classics in mechanics does not exclude the emergence of new ideas and methods that can be very useful in various fields. The article concludes with a discussion of traditions in teaching mechanics, including the development of intelligence, problem-solving skills, and the search for a balance between traditional and new teaching methods using computer technology.

### Введение

Невозможно не восхищаться содержанием и талантливым изложением материала в книге «Очерки истории механики» А.А. Космодемьянского [1], в которой на примерах научного творчества выдающихся русских ученых излагается история механики вообще и теоретической в частности. *Неужели после внимательного прочтения седьмого очерка о педагогической системе А.П. Минакова и его уникального искусства чтения лекций по теоретической механике у читателя может возникнуть сомнение о пользе этого курса как основы современной техники?* Педагогическому мастерству А.П. Минакова и

глубине проникновения в явления с позиций классической механики посвящена интересная книга В.П. Лишевского [2].

При чтении курсов теоретической и прикладной механики нельзя опускать историю появления новых идей и инженерных методов, которые реализуют практически такие идеи. Роль интуиции в развитии методов расчетов убедительно отражена в работе [3, 4].

Изучение истории становления и развития механики важно не только для глубокого понимания достигнутого уровня знаний, но и для догадки о новых путях совершенствования возможностей познания природы. Роль математики при решении прикладных задач механики убедительным образом отражена в книге [5]. Изучение теоретической механики предполагает развитие интеллекта для познания методов инженерного расчета. И здесь без должных знаний физики и математики за среднюю школу не обойтись!

Всемирно известный ученый-механик XX столетия в 1920 году писал [6] о системе образования в США: «Окончив среднюю школу, американец знает по математике не больше того, что преподается в первых четырех классах русских реальных училищ. В университете не меньше года у студентов уходит на изучение предметов, известных всякому, окончившему среднюю школу в Европе».

В [7] обращено внимание на использование фундаментальных общеобразовательных дисциплин, их интеллектуального хребта при реформировании технического образования. В [8] особо подчеркивается межпредметная связь теоретической механики и механики деформируемого твердого тела.

Огромно теоретическое наследие классиков в механике; существование эффективных методов составления и анализа моделей поведения объектов не исключает появления новых идей и методов, на которые обращено внимание в [5]. Иногда торжество интуиции в механике, результаты качественных рассуждений и догадок находили неожиданное применение даже в весьма отдаленных областях.

### **О традициях в преподавании теоретической и прикладной механики**

Эти традиции можно изложить самым кратким образом.

1. Учить следует тех, в ком удастся пробудить желание учиться. На самый крайний случай указал И. Губерман:

«На свете ни единому уму,  
Имевшему учительскую прыть,  
Глаза не удалось открыть тому,  
Кто сам не собирался их открыть».

2. Цель образования – развитие интеллекта, алгоритмов разума при помощи читаемых дисциплин.

3. Учить должен тот, кто сам непрерывно учится. Если кратко по этому поводу, то вспоминается Никколо Паганини: «Я всегда был бесконечно увлечен тем, чем я занимаюсь. Иначе я бы не смог рождать такую же увлеченность у моих слушателей».

4. В современных условиях преподаватель должен для себя непрерывно искать и находить (с чувством меры) сочетание традиционных методов передачи знаний и бурно развивающихся методов, основанных на компьютерных технологиях.

### **Заключение**

1. Огромное творческое наследие выдающихся ученых в области теоретической и прикладной механики не может существовать без глубокого анализа с использованием цифровых моделей и алгоритмов.

2. Преподавание механики должно основываться не только на практическом применении многовекового опыта, но и стимулировании появления новых идей, стремлении приблизить слушателя к тайнам научного творчества. При любых сокращениях курсов не желательно отказываться от изложения истории появления принципов и теорем механики, от их решающей роли в техническом прогрессе. Необходимо учить студентов решать задачи повышенной трудности.

3. Иногда чрезмерно гуманитарный уклон в техническом образовании не позволяет обеспечить достаточное количество часов для овладения фундаментальными знаниями и освоения на их основе специальных дисциплин. *Один параграф будущей дипломной работы может быть выполнен при изучении курсов теоретической и прикладной механики!*

### **Список литературы**

1. Космодемьянский А.А. Очерки по истории механики. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
2. Лижевский В.П. Андрей Петрович Минаков 1893-1954. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
3. Рабинович И.М. Интуиция в строительной механике // Исследования по теории сооружений. Вып. XVIII. – М., 1970. – С. 201-210.
4. Бернштейн С.А. Очерки по истории строительной механики. – М.: Госстройиздат, 1957. – 236 с.
5. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика. Логика и особенности приложений математики. – М.: Наука, 1983. – 328 с.
6. Тимошенко С.П. Воспоминания. Париж, 1963. – К.: Наук. дум., 1993. – 424 с.
7. Бохонский А.И. Инварианты в системе образования. Методы совершенствования фундаментального образования в школах и ВУЗах // XIII межд. науч.-техническая конференция. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 20-24.
8. Бохонский А.И., Баранова А.В. Идеиное единство лекционных курсов теоретической механики и сопротивления материалов. Методы совершенствования фундаментального образования в школах и ВУЗах. // Материалы XIV международной научно-методической конференции. Севастополь, 23-25 сентября 2009 г. Сборник трудов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 163-166.
9. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Идеи в научном творчестве и учебном процессе // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2022. – № 13. – С. 6-25.

### Сведения об авторах:

*Бохонский Александр Иванович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Цифровое проектирование»;

*Рыжков Александр Игоревич* – к.т.н., доцент кафедры «Цифровое проектирование».



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛЬЦА С МЕСТНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ В ЗОНЕ УПЛОТНЕНИЯ С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

*Речицкий С.В.<sup>1</sup>, Речицкий А.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин), Новосибирск;*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск*

**Ключевые слова:** валец, дорожный каток, деформация, уплотнение, математическая модель.

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы взаимодействия вальца с местной деформацией в зоне уплотнения с уплотняемым материалом. Рассмотренные математические зависимости и разработанная теория расчёта доказывают возможность регулирования силового воздействия на уплотняемый дорожно-строительный материал вальцем с местной деформацией в зоне уплотнения путём изменения в эксплуатационных условиях конструктивных размеров гибкой обечайки вальца.

## THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF INTERACTION OF THE DRUM WITH LOCAL DEFORMATION IN THE COMPACTION ZONE WITH THE MATERIAL TO BE COMPACTED

*Rechitskiy S.V.<sup>1</sup>, Rechitskiy A.S.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk;*

<sup>2</sup>*Siberian State University of Railways, Novosibirsk*

**Keywords:** roller, road roller, deformation, seal, mathematical model.

**Abstract.** The paper discusses the interaction of the drum with local deformation in the compaction zone with the material to be compacted. The considered mathematical dependencies and the developed theory of calculation prove the possibility of regulating the force effect on the compacted road-building material by a drum with local deformation in the compaction zone by changing the structural dimensions of the flexible drum shell in operating conditions.

В научно-технической литературе [1, 2] рассмотрен общий случай плоской контактной деформации, когда касание сжимаемых тел происходит по прямой линии, перпендикулярной плоскости XOY (рис. 1,а), а функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ , определяющие конфигурацию цилиндрических поверхностей, имеют непрерывные первые и вторые производные в окрестности точки  $x = y = 0$ . Направляя ось  $Ox$  по общей касательной к кривым  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ , ограничивающим упругие тела, будем иметь:

$$f_1'(0) = f_2'(0) = 0. \quad (1)$$

Сумму вторых производных  $f_1''(0) + f_2''(0)$  считаем отличной от нуля и, вводя допущение о малости упругих перемещений, приближённо представляем  $f_1 + f_2$  следующим образом [1, 3]:

$$f_1(x) + f_2(x) = [f_1''(0) + f_2''(0)] \cdot \frac{x^2}{2}. \quad (2)$$

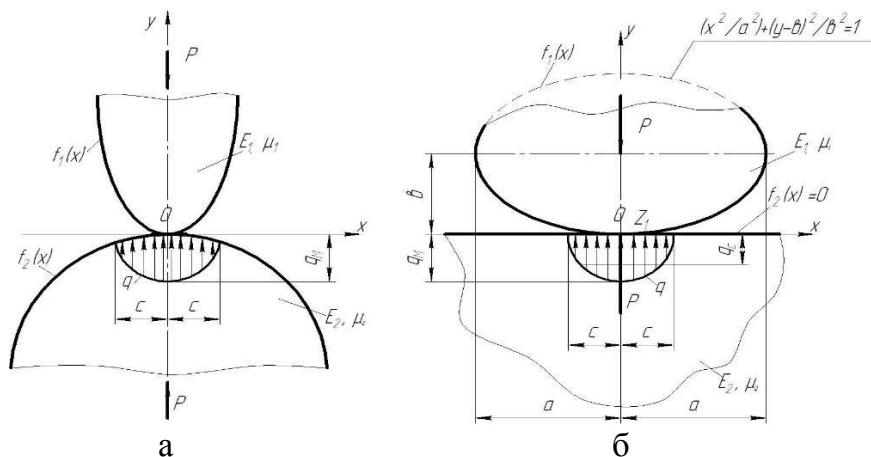


Рис. 1. Общий случай плоской контактной деформации гибкого вальца дорожного катка

Относительно распределённых контактных сил  $q = q(x)$  вводим предположение, что их равнодействующая  $P$  (Н/м), перпендикулярная оси  $Ox$ , направлена к точке  $O$  начала касания взаимодействующих поверхностей, то есть к началу координат. Так как первоначальный просвет между контактирующими телами, согласно (2), является симметричным относительно оси  $Oy$ , то и давление  $q$  на цилиндрических поверхностях будет также осесимметричной эллиптической функцией по аргументу  $x$ , которая в соответствии с [1], имеет вид:

$$q = q(x) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot c^2} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{q_M}{c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{4 \cdot q_c}{\pi \cdot c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2}, \quad (3)$$

$-c \leq x \leq c$

где  $q_M = \max$ ,  $q_c$  – соответственно, максимальное и среднее значения функциональной зависимости  $q(x)$  (рис. 1,а), определяемые по формуле

$$q_M = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot c} = \frac{4 \cdot q_c}{\pi}, \quad (4)$$

где  $c$  – полуширина области контакта [1].

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot (y_1 + y_2)}{f_1''(0) + f_2''(0)}}, \quad (5)$$

где  $y_1, y_2$  – физико-механические постоянные взаимодействующих материалов, зависящие от их модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$  и коэффициентов Пуассона  $\mu_1, \mu_2$ :

$$y_1 = \frac{P}{\pi \cdot E_1} \cdot (1 - \mu_1^2), \quad y_2 = \frac{2}{\pi \cdot E_2} \cdot (1 - \mu_2^2). \quad (6)$$

Сила  $P$  связана с реактивным давлением  $q$  интегральным соотношением:

$$P = \int_{-c}^c q(x) dx = 2 \cdot \int_0^c q(x) dx. \quad (7)$$

Для преобразования и адаптации фундаментальных зависимостей (3)-(6) приводим необходимые аналитические соотношения (рис. 2) [3, 4]:

– функции нижней половины цилиндрической поверхности вальца  $f_1(x)$  и её второй производной  $f_1''(x)$  из уравнения эллипса (см. рис. 1,б):

$$f_1(x) = y(x) = -b \cdot \left( \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - 1 \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad (8)$$

$$f_1''(x) = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{b}{a^2} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{\frac{-3}{2}}, -a \leq x \leq a, \quad (9)$$

– значение  $f_1''(0)$  при  $x = 0$

$$f_1''(0) = \frac{b}{a^2}, \quad (10)$$

– радиусы кривизны  $R = R(x)$  и  $R(0)$  эллиптической направляющей цилиндра (8), принимая во внимание выражения (9)-(10):

$$R = R(x) = \frac{\left[1 + (y')^2\right]^{\frac{3}{2}}}{y''} = \left[1 - \frac{x^2}{a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)\right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{a^2}{b}, \quad (11)$$

$$R(0) = \frac{1}{f_1''(0)} = \frac{a^2}{b}. \quad (12)$$

– формула, связывающая удельную линейную силу  $P$  (Н/м) с шириной вальца  $B$  и вертикальной нагрузкой  $G_B$ , приложенной к его центру:

$$P = \frac{G_B}{B}, \quad (13)$$

– глубина  $h$  погружения катка в уплотняемый слой материала (высота сегмента  $KOK'$ , рис. 2), которую находим из уравнения эллипса (рис. 1,б), когда  $x = \pm c$  и  $y = h$ :

$$\frac{c^2}{a^2} + \frac{(h-b)^2}{b^2} = 1, \quad (14)$$

или, при  $h-b < 0$ ,

$$h = b \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}}\right), \quad (15)$$

где  $c$  – величина полу хорды кривой  $KOK'$  (рис. 2).

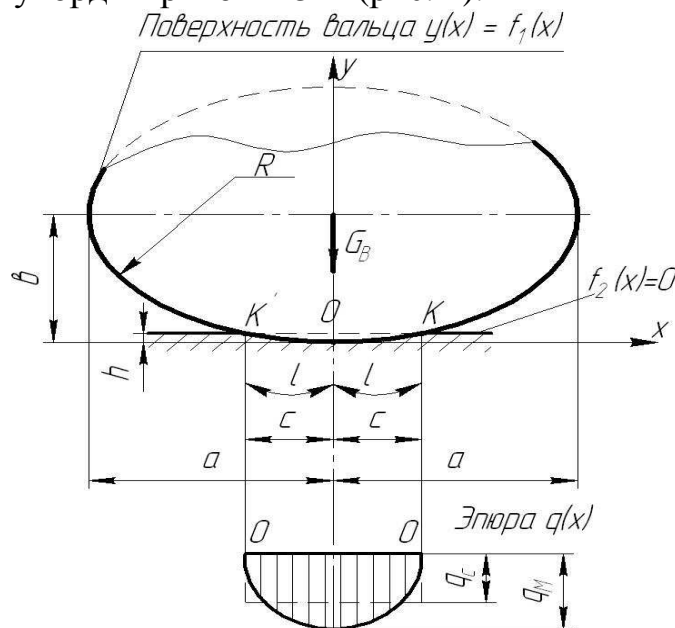


Рис. 2. Схема контакта вальца с местной деформацией в зоне уплотнения с уплотняемым материалом

Используя формулы (8)-(15), конкретизируем выражения (3)-(6) и (15), после вышеуказанных подстановок  $E_2 = E_K$ ,  $f_2(x) = 0$ ,  $f_2''(0) = 0$ ,  $y_1 = 0$ ,  $\mu_2 = 0,25$ :

$$q = q(x) = \frac{2 \cdot G_B}{\pi \cdot B \cdot c^2} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{g_M}{c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{4g_O}{\pi \cdot c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2}, \quad (16)$$

$$q_M = \frac{2 \cdot G_B}{\pi \cdot B \cdot c}; \quad q_C = \frac{G_B}{2 \cdot B \cdot c}, \quad (17)$$

$$q_M = \frac{4}{\pi} \cdot q_C, \quad (18)$$

$$Y_2 = \frac{2}{\pi \cdot E_K} \cdot (1 - \mu_2^2) = \frac{1,875}{\pi \cdot E_K}, \quad (19)$$

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot G_B \cdot Y_2}{B \cdot f_1''(0)}} = a \cdot \sqrt{\frac{3,75 \cdot G_B}{\pi \cdot E_K \cdot b \cdot B}}, \quad (20)$$

$$h = b \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{3,75 \cdot G_B}{\pi \cdot E_K \cdot b \cdot B}} \right). \quad (21)$$

С физико-математической точки зрения корректность формул (16)-(21), базирующихся на классических соотношениях (3)-(6) [1], следует, прежде всего, из осевой симметрии расчётных схем рисунка 1 и первоначального соприкосновения взаимодействующих тел по оси  $z \perp xOy$ , проходящей через точку  $x = y = 0$  (рис. 1,б). При этом модель плоского деформированного состояния, положенная в основу зависимостей (16)-(21), является адекватной применительно к данной конструкционной (неклассической) задаче [1] для областей контакта цилиндрической поверхности вальца с уплотняемым материалом в пределах соблюдения условия (см. (12) и [1]). Практическая реализация аналитических зависимостей (16)-(21) требует введения дополнительной предпосылки о неизменной длине  $S$  эллиптической образующей цилиндра в процессе её трансформации в окружность радиусом  $R = \text{const}$ .

### Список литературы

1. Штаерман И.Ф. Контактная задача теории упругости. – М., Л.: Гостехиздат, 1949. – 270 с.
2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкости. – М.: Наука, 1980. – 340 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 608 с.
4. Выгодский М.Л. Справочник по высшей математике. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 872 с.

### Сведения об авторах:

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

*Речицкий Александр Сергеевич* – студент.

УДК 539.3

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ КАПСУЛЫ В СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Андрианов И.К., Чепурнова Е.К.*

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

**Ключевые слова:** оболочка, усталость, циклическое разрушение, долговечность, трещина.

**Аннотация.** В исследовании проведено конечно-элементное моделирование усталостного разрушения тонкостенной цилиндрической оболочки в системе обнаружения повреждений лопаток газовых турбин. Рассмотрена тестовая задача о напряженном состоянии и долговечности тонкостенной капсулы, помещенной внутрь толстостенной оболочки с прямоугольным вырезом, моделирующим дефект. Представлена оценка внутреннего давления в тонкостенной капсуле в зависимости от количества циклов до разрушения.

## EVALUATION OF FATIGUE FAILURE OF A THIN-WALLED CAPSULE IN THE TURBINE BLADE DAMAGE DETECTION SYSTEM UNDER CYCLIC LOADING BY THE FINITE ELEMENT METHOD

*Andrianov I.K., Chepurnova E.K.*

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

**Keywords:** shell, fatigue, cyclic destruction, durability, crack.

**Abstract.** The study carried out finite element modeling of fatigue failure of a thin-walled cylindrical shell in the damage detection system of gas turbine blades. A test problem on the stress state and durability of a thin-walled capsule placed inside a thick-walled shell with a rectangular cutout modeling a defect is considered. An estimate of the internal pressure in a thin-walled capsule is presented, depending on the number of cycles before destruction.

На сегодняшний день одной из проблем турбомашиностроения является образование и диагностирование трещин в лопатках газовых турбин. Для решения данного вопроса исследователями в работах [1-3] предложена система капсул с ионизирующим веществом под внутренним давлением, помещаемая в тело турбинной лопатки. В процессе развития трещины происходит разрыв капсулы, и ионизирующее вещество, попадая в проточную часть турбины, регистрируется датчиком, сигнализируя о наличии дефекта [1-3]. Существуют различные подходы для оценки предельного давления с целью обеспечения разрыва капсулы, однако возникает проблема, связанная с тем, что величина давления, которое требуется создать внутри оболочки капсулы, может быть ограничено массой ионизирующего вещества. Соответственно, возникает вопрос оценки напряженного состояния капсулы под внутренним давлением меньше разрушающего в условиях циклического нагружения.

В рамках данного исследования на основании критерия усталостного разрушения требовалось построить зависимость внутреннего давления в капсуле от количества циклов до разрушения. В качестве тестовой модели расчета

рассматривалась капсула в виде тонкостенной цилиндрической оболочки, помещенной внутрь толстостенной оболочки с дефектом в виде прямоугольного выреза, моделирующего трещину. Система оболочек закреплялась с правого торца и нагружалась внутренним давлением согласно рисунку 1. Геометрические характеристики толстостенной цилиндрической оболочки: наружный диаметр – 14 мм, внутренний диаметр – 11 мм, толщина стенки – 1,5 мм, длина оболочки – 80 мм. В толстостенной оболочке был сделан вырез длиной 9,3 мм и шириной 1,1 мм. Тонкостенная капсула, помещенная внутрь толстостенной оболочки имела толщину 0,3 мм.

Дискретизации геометрии модели проводилась в программном комплексе Ansys с помощью метода конечных элементов. Конечно-элементная сетка (рис. 2) включала в себя 21091 элемент и 64053 узла. При проведении конечно-элементного расчета в качестве материала капсулы рассматривался алюминий с модулем упругости 71000 МПа, коэффициентом Пуассона 0,33, пределом текучести 280 МПа, пределом прочности 310 МПа. Серия расчетов проводилась при циклическом нагружении (цикл отнулевой) оболочки внутренним давлением  $p$  с разными амплитудными значениями. На рисунках 3, 4 представлено распределение интенсивностей напряжений и долговечности оболочки при  $p = 0,16 \cdot \sigma_B$ , где  $\sigma_B$  – предел прочности материала оболочки.

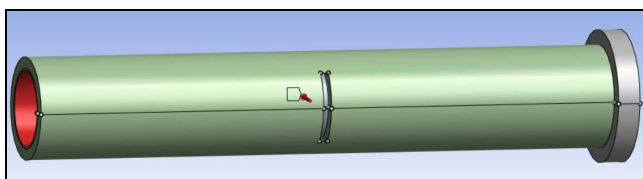


Рис. 1. Постановка задачи исследования

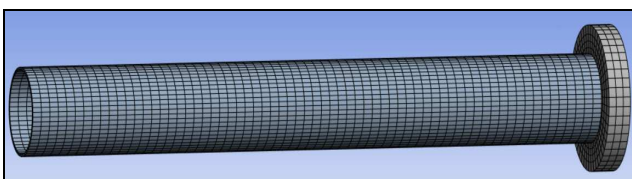


Рис. 2. Конечно-элементная сетка модели тонкостенной капсулы

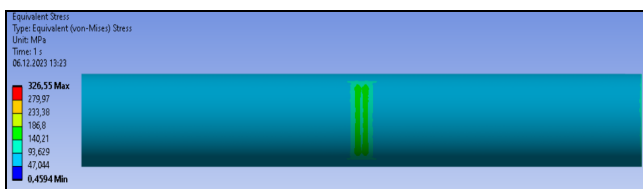


Рис. 3. Эквивалентные напряжения по Мизесу в капсуле, МПа

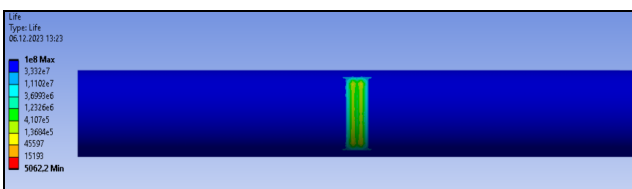


Рис. 4. Количество циклов до разрушения капсулы

По данным расчетов построена зависимость внутреннего давления в тонкостенной капсуле от количества циклов до разрушения (рис. 5). Согласно результатам предельное внутреннее давление, при котором происходит разрушение капсулы за один цикл, составило  $0,26 \cdot \sigma_B$ . При уменьшении внутреннего давления относительно предельного давления на 10%, усталостное разрушение произойдет через 6640 циклов согласно результатам конечно-элементного расчета. Если требуется, чтобы усталостное разрушение произошло в пределах 10 циклов нагружения, согласно расчетам внутреннее давление может быть уменьшено не более чем на 0,13% относительно предельного давления за один цикл нагружения.

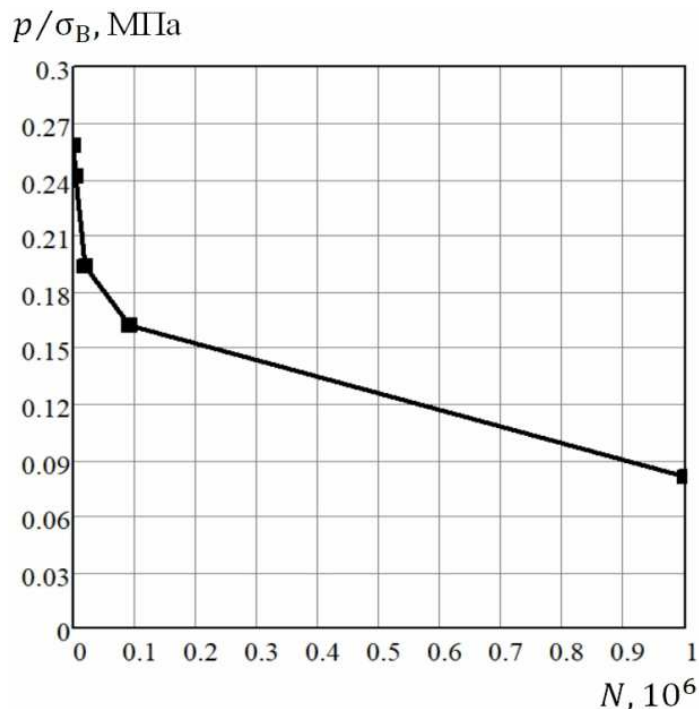


Рис.5. Зависимость давления от количества циклов до разрушения

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

#### Список литературы

1. Мохамад К.Б., Гринкруг М.С. Технологическое исследование характеристик системы раннего обнаружения микротрещин в лопатке турбины двигателя // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 290-293.
2. Кара Б.М., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Способ обнаружения микротрещин в лопатках работающих газотурбинных двигателей // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – Часть 3. – С. 237-240.
3. Grinkrug M.S., Kara Balli M., Tkacheva J.I., Novgorodov N.A. An experimental bench for testing the cracks detecting technology in the blades of working aircraft engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 734, p. 12022.

#### Сведения об авторах:

*Андреанов Иван Константинович* – к.т.н., доцент кафедры «Авиастроение»;

*Чепурнова Елена Константиновна* – студент.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И АМПЛИТУДОЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАЛОСТЬ

*Мыльников В.В.*

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
Нижний Новгород*

**Ключевые слова:** амплитуда деформации, упругость, модуль Юнга, сопротивление усталости, прочность.

**Аннотация.** В работе представлен расчет напряжений образцов переменной по сечению формы для оценки изменения амплитудно-частотных характеристик при испытаниях на усталость. Определение напряжений основано на установлении расчетной зависимости между усилием, прикладываемым к образцу, и его перемещением в точке приложения силы с последующим определением напряжением по известной силе. Представлены результаты тарировочных испытаний для статического режима нагружения образцов и произведена оценка действующих на образец сил (внешней, инерции, упругости) с учетом максимального напряжения и максимальной амплитуды деформации при сопоставлении статического и циклического режимов нагружений.

## DETERMINATION OF THE RATIO BETWEEN VOLTAGE AND AMPLITUDE OF VIBRATIONS FOR CORSET SAMPLES DURING FATIGUE TESTS

*Mylnikov V.V.*

*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,  
Nizhny Novgorod*

**Keywords:** deformation amplitude, elasticity, Young's modulus, fatigue resistance, strength.

**Abstract.** The paper presents a calculation of the stresses of samples of variable shape cross-section to assess changes in amplitude-frequency characteristics during fatigue tests. The determination of stresses is based on the establishment of a calculated relationship between the force applied to the sample and its movement at the point of application of force, followed by the determination of stress by a known force. The results of calibration tests for the static loading mode of samples are presented and an assessment of the forces acting on the sample (external, inertia, elasticity) is performed, taking into account the maximum stress and maximum amplitude of deformation when comparing static and cyclic loading modes.

Испытания на усталость материалов проводят с целью определения заданных механических характеристик, применяя стандартные методики испытаний [1-2]. Используя эти данные, выбирают материал для изготовления требуемых деталей и элементов конструкций, проводят прочностные расчеты [3].

Существует достаточно большое разнообразие циклических испытаний материалов [2]. В случае конструирования деталей особо ответственного назначения необходимо проводить специализированные узконаправленные испытания материалов, используя вновь создаваемые оригинальные машины и установки с соответствующими экспериментальными методиками.



В данной работе представлен расчет соотношения между напряжением и амплитудой колебаний корсетных образцов при испытаниях на оригинальной экспериментальной электромагнитной установке [4] для оценки частотной стабильности материалов с целью изготовления упругих элементов высокоточных излучателей преобразующих электрические колебания в механические, где незначительные изменения частот собственных колебаний, которые, как известно, связаны с модулем упругости, явлением неупругости и колебанием атомов и их решеток, приводят к недопустимым погрешностям при преобразовании видов колебаний и преждевременному усталостному разрушению.

Для изготовления упругих элементов, работающих в сложных условиях циклического нагружения, а также изделий со стабильными размерами требуются материалы с минимальными проявлениями неупругих свойств [5].

Для таких исследований была разработана оригинальная электромагнитная установка для испытаний по «мягкой» схеме консольного изгиба плоского образца работающая в автоколебательном режиме [4]. В установке реализована работа на основе электромеханической системы, где изгиб образца производится электромагнитной силой, а разгиб происходит под действием сил упругости материала, тем самым обеспечивается циклическое нагружение близкое к синусоидальному.

Для испытаний изготавливались образцы, показанные на рисунке 1, а их размеры показаны в таблице 1.

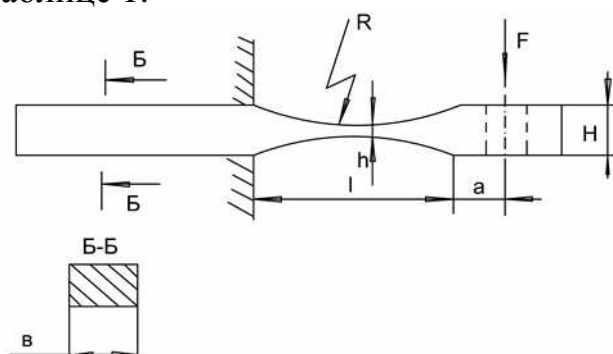


Рис. 1. Эскиз образцов

Табл. 1. Размеры образцов для испытания на усталость

образец	$a$	$b$	$l$	$h$	$H$	$R$
$\partial 1$	9	20	56	5	13	100
$\partial 2$	24	20	56	5	13	100

Напряжение в расчетном сечении образца определяли по амплитуде колебаний. Определение напряжений основано на установлении расчетной зависимости между усилием, прикладываемым к образцу, и его перемещением в точке приложения силы с последующим определением напряжением по известной силе. Установление расчетной зависимости между усилием и перемещением проводится для статического режима. При этом полагается, что в динамическом режиме (в процессе колебаний) действующие на образец силы (внешняя, инерции, упругости) создадут такое же максимальное напряжение и такое же максимальное перемещение (амплитуду колебаний), как и статическая сила, равная по величине результирующей динамической.

При расчете используется приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки переменного сечения

$$E \cdot J(x) \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (1)$$

где –  $J(x)$  – момент инерции сечения;  $E$  – модуль Юнга;  $M(x)$  – изгибающий момент;  $y$  – координата в направлении действия силы;  $x$  – координата в направлении оси балки.

Начало координат располагается в месте заделки образца (рис. 1). Момент на расстоянии  $x$  от места заделки:

$$M = F(l + a - x). \quad (2)$$

Рассмотрим отдельно перемещение закругленной части и перемещение утолщенной части.

Для определения перемещения закругленной части расположим начало координат в центре этой части образца, на расстоянии  $l/2$  от места заделки. В этом случае высота сечения, расположенного на расстоянии  $X$  от начала координат:

$$h(x) = h + (R - \sqrt{R^2 - x^2}). \quad (3)$$

Момент на расстоянии  $x$ :

$$M(x) = F(l/2 + a - x).$$

Уравнение для перемещения рассматриваемой части образца получается из (1.) подстановкой значений  $J_1 = \frac{bh^3(x)}{12}$ . В свою очередь  $h(x)$  берется из (3).

В результате получим:

$$\frac{d^2 y_1}{dx^2} = \frac{1,5F}{b \cdot E} \cdot \frac{0,5l + a - x}{(0,5h + R - \sqrt{R^2 - x^2})^3}. \quad (4)$$

Значение  $x$  лежит в пределах:  $-\frac{l}{2} \leq x \leq l_2$ .

Решение дифференциального уравнения (4) с помощью ЭВМ позволяет найти при  $x = 0,5 \cdot l$  перемещение  $y_{1m}$ , угол  $\theta_{1m} = \frac{dy_1}{dx}$ .

Для определения перемещения утолщенной части расположим начало координат на расстоянии  $l$  от места заделки образца.

Уравнение для перемещения этой части образца:

$$\frac{d^2 y_2}{dx^2} = \frac{F(a - x)}{E \cdot J^2},$$

где  $J_2 = \frac{bH^3}{12}$ .

Решение уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dy_2}{dx} = \frac{F}{E \cdot J_2} \cdot x(a - \frac{x}{2}) + C_1, \\ y_2 = \frac{F}{E \cdot J_2} \cdot \frac{x^2}{2}(a - \frac{x}{3}) + C_1x + C_2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $0 \leq x \leq a$ .

Начальные условия при  $x = 0$ ,  $\frac{dy_2}{dx} = \theta_{1m}$ ,  $y_2 = y_{1m}$ .

Отсюда  $C_1 = \theta_{1m}$ ,  $C_2 = y_{1m}$ .

Подставив значение  $x = a$  в (5), находим значение  $y_2$  в точке приложения силы, которое соответствует амплитуде колебаний

$$A_m = \frac{F}{E \cdot J_2} \cdot \frac{a^3}{2} + \theta_{1m} \cdot a + y_{1m}.$$

Ввиду большой величины  $J_2$  первый член этого выражения в тысячи раз меньше двух других и им можно пренебречь.

Обозначим через  $\theta'_{1m}$  и  $y'_{1m}$  значение соответствующих величин, которые определяются из уравнения (5) при  $1,5 \frac{F}{bE} = 1$ .

Тогда

$$\theta_{1m} = \frac{1,5F}{b \cdot E} \cdot \theta'_{1m}; \quad y_{1m} = y'_{1m} \cdot \frac{1,5F}{b \cdot E}.$$

В результате, для амплитуды колебаний получим:

$$A_m = \frac{1,5F}{b \cdot E} (a \cdot \theta'_{1m} + y'_{1m}). \quad (6)$$

Напряжение в расчетном сечении в середине закругленной части:

$$\sigma = \frac{F(0,5l + a)}{W}.$$

Определив  $F$  из (6) и учтя, что  $W = \frac{bh^2}{6}$ , получим окончательное выражение

$$\sigma = \frac{2(l + 2a)}{h^2(a \cdot \theta'_{1m} + y'_{1m})} \cdot E \cdot A_m. \quad (7)$$

Задача решена численным методом с помощью ЭВМ. В результате расчета для образцов рисунке 1 с размерами, указанными в таблице 1 ( $\partial 1$ ) и ( $\partial 2$ ) определено:

- образец ( $\partial 1$ ):  $\theta'_{1m} = 59,84$ ;  $y'_{1m} = 1853,2$ ,
- образец ( $\partial 2$ ):  $\theta'_{1m} = 84,1$ ;  $y'_{1m} = 2532,4$ ,

Из (7) находим:

- образец ( $\partial 1$ ):  $\sigma = 24,75 \cdot 10^{-3} \cdot E \cdot A_m$ , МПа,
- образец ( $\partial 2$ ):  $\sigma = 18,3 \cdot 10^{-3} \cdot E \cdot A_m$ , МПа.

При среднем значении модуля Юнга  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа:

- $\sigma = 49,5 \cdot A_m$  – для образца ( $\partial 1$ );

–  $\sigma = 36,6 \cdot A_m$  – для образца ( $\partial 2$ ).

В этих выражениях  $\sigma$  в МПа,  $A_m$  в мм.

### Оценка погрешности определения напряжения в расчетном сечении

Зная погрешности прямого измерения амплитуды колебаний модуля Юнга и геометрических размеров образца можно рассчитать погрешность косвенного измерения величины  $\sigma$  воспользовавшись формулами из работ [6-7].

В качестве контрольного метода определения напряжения в образце использовался метод статической тарировки, который основан на статическом нагружении образца силой  $F$ , измеряемой образцовым динамометром. Напряжение в образце рассчитывалось по известной силе с использованием формулы

$$\sigma = \frac{6F(l+a)}{bh^2}. \quad (8)$$

Одновременно с показаниями образцового динамометра снимались данные измерителя линейных перемещений, измеряющего деформацию при нагружении.

Результаты тарировочных испытаний позволили построить графики зависимости величин  $\sigma_F$  и  $\sigma_A$  от амплитуды деформации, представленные на рисунке 2.

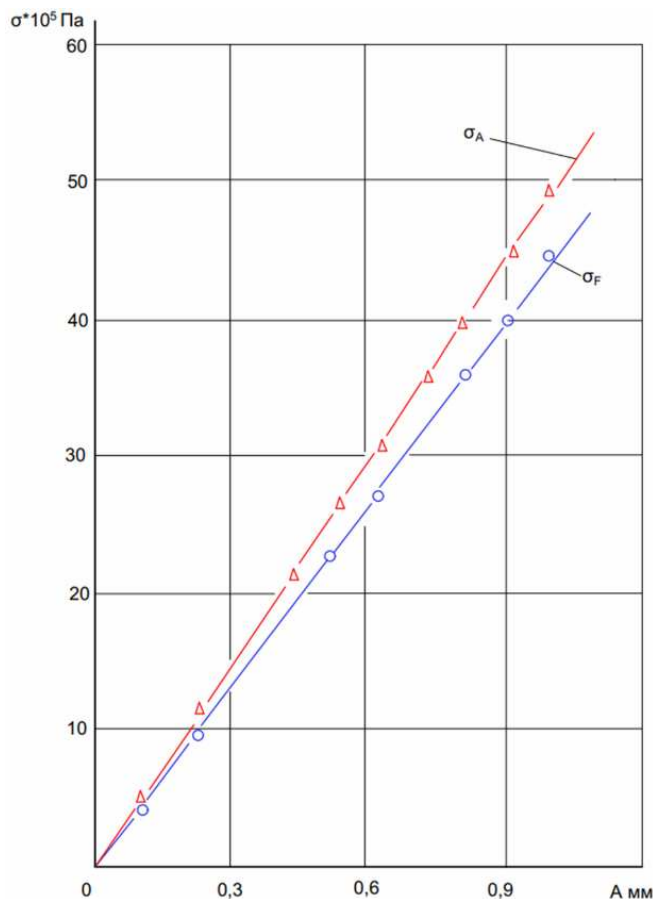


Рис. 2. Напряжение в заданном сечении корсетного образца при статической тарировке

Получены следующие значения:

$$\sigma_A = 485 \cdot A_m \cdot 10^{-6} (\text{Па}), \sigma_F = \frac{6(l/2+a)}{bh^2} F = 0,444 \cdot 10^{-6} F (\text{Па}). \quad (9)$$

Отсюда видно, что напряжение в образцах, определенные по амплитуде деформации и по силе, измеренной образцовым динамометром, отличаются не более, чем на 10%.

Чтобы оценить этот результат рассчитаем погрешность определения напряжения в образце по формуле (10). Она складывается из погрешности

определения силы,  $\delta_F = \frac{\Delta F}{F}$  и погрешности определения линейных размеров

образца:  $\delta_e = \frac{\Delta l + \Delta a}{l + a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{z\Delta h}{h}$ :

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \delta_F + \delta_e. \quad (11)$$

При измерении размеров образца микрометром  $\Delta a = \Delta l = \Delta b = \Delta h = 0,01 \text{ мм}$  и  $\delta_e = 0,00075 = 0,075\%$  величина достаточно малая. Основную погрешность вносит процесс измерения силы образцовым динамометром. Эта величина составляет ~1% и полностью определяет погрешность тарировки.

### Заключение

Из графика, приведенных на рисунке 2, видно, что напряжение на образце, рассчитанное по амплитуде деформации  $\sigma_A$  на 8-10% выше напряжения рассчитанное по силе  $\sigma_F$ . Такое расхождение можно объяснить рядом факторов: погрешностью в определении модуля Юнга, допущениями, сделанными при выводе расчетных формул для  $\sigma_A$  и неучтенными при тарировке систематическими погрешностями.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>.

### Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
2. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
4. Патент 2781466 РФ. Установка для испытаний на усталость / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов. – Заявл. от 14.09.2021; опубл. 12.10.2022., Бюл. № 29.
5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 504 с.
6. Мыльников В.В. Определение соотношения между напряжением и амплитудой колебаний для плоских образцов при испытаниях на усталость // *Фундаментальные основы механики*. – 2023. – № 12. – С. 117-122. – DOI: 10.26160/2542-0127-2023-12-117-122.
7. Мыльников В.В. Оценка предельной деформации металлических сплавов с учетом спектра волн пластической деформации в общем аналитическом уравнении для описания поведения кривых усталости // *Фундаментальные основы механики*. – 2023. – № 12. – С. 123-126. – DOI: 10.26160/2542-0127-2023-12-123-126.

### Сведения об авторе:

*Мыльников Владимир Викторович* – к.т.н., в.н.с. Управления науки, доцент кафедры Технологии строительства, заведующий лабораторией Прочности и пластичности функциональных материалов.

## ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СИЛЫ ПРОКАТКИ И ШИРИНЫ ПО ДЛИНЕ ПОЛОС АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМЦ

*Комаров Ю.Ю., Шаталов Р.Л.*

*Московский политехнический университет, Москва*

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав АМц, контактное трение, нестационарные участки полос, технологическая смазка, тонкие алюминиевые полосы, сила прокатки, ширина полосы, прокатный стан 150x235, микроконтроллерная система измерения силы.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования, которые отражают влияние условий контактного трения на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких полос из алюминиевого сплава АМц. Исследование показало, что периоды нестационарных процессов прокатки зависят от степени деформации и условий контактного трения. Также была обнаружена зависимость протяжённости нестационарного формирования ширины полос при холодной прокатке от величины обжатия и применения технологической смазки. В заключении отмечается, что усилие прокатки распределяется неравномерно при прокатке концевых участков полос по сравнению с основной частью раската.

## THE EFFECT OF CONTACT FRICTION ON THE FORMATION OF THE ROLLING FORCE AND THE WIDTH ALONG THE LENGTH OF THE AMC ALUMINUM ALLOY STRIPS

*Komarov Yu.Yu., Shatalov R.L.*

*Moscow Polytechnic University, Moscow*

**Keywords:** aluminum alloy АМс, contact friction, non-stationary sections of strips, technological lubrication, thin aluminum strips, rolling force, strip width, rolling mill 150x235, microcontroller force measurement system.

**Abstract.** The results of the study are presented, which reflect the influence of contact friction conditions on the formation of rolling force and length width of thin strips made of aluminum alloy АМс. The study showed that the periods of unsteady rolling processes depend on the degree of deformation and conditions of contact friction. The dependence of the length of the non-stationary formation of the width of the strips during cold rolling on the amount of compression and the use of technological lubrication was also found. In conclusion, it is noted that the rolling force is distributed unevenly when rolling the end sections of the strips and their main part.

### Введение

Цель работы – исследование влияния контактных условий деформирования на формирование силы прокатки и ширины по длине алюминиевых полос из сплава АМц.

Задача исследования – определить и уточнить влияние контактных условий деформирования и величины обжатия на формирование силы прокатки и ширины по длине тонких алюминиевых полос.

При прокатке напряжение в металле при переходе из плоского состояния в объемное и наоборот приводит к неравномерному обжатию полос по длине и образованию разнотолщинности и разноширинности проката [1].

Затухание процесса на начальной стадии прокатки и зарождение, и развитие процесса на заключительной стадии позволяют нам по-новому взглянуть на всю прокатку тонких полос в целом [2].

С увеличением обжатия, которое приводит к увеличению жесткости полосы за счет упрочнения металла, возрастает его влияние на изменение деформационных параметров прокатки и продолжительность нестационарных процессов [3]. Проанализированный теоретический материал содержит недостаточное количество исследований неустановившихся процессов при прокатке тонких полос из алюминия, меди и их сплавов [4-6].

Проведённые экспериментальные исследования, представленные в работе [7], демонстрируют, что в настоящее время требуется более детальная разработка методики влияния на неустановившиеся процессы прокатки в сторону их уменьшения.

### Методика исследования

Исследовали влияние обжатия и условий контактного трения на распределение усилия прокатки, ширину полос из сплава АМц и длину нестационарных участков на двухвалковом прокатном стане.

Использовалась лабораторная установка на базе прокатного стана 150x235 с автоматической микроконтроллерной системой измерения усилий прокатки. Установка позволяет производить измерения усилий с точностью  $\pm 0,01$  кН с частотой  $1,25 \cdot 10^{-3}$  с и автоматически выделяет максимальную величину усилий [4].

Эксперименты включали прокатку восьми полос из алюминиевого сплава АМц одной партии длиной около  $L_0 = 199$  мм, толщиной  $h_0 = 1,9$  мм и шириной  $b_0 = 24$  мм с изменением зазора  $S$  между валками (табл. 1). Исследования проводились на сухих и смазанных (керосин) валках, чтобы исследовать влияние технологической смазки на распределение толщины, ширины полос и силы прокатки. Влияние относительного обжатия  $\epsilon$  и условий контактного трения на толщину и силу прокатки  $P$  для алюминиевого сплава АМц приведены в таблице 1.

Табл. 1. Данные прокатки алюминиевого сплава АМц

Образец №	$\epsilon$ , %	$P$ , кН	$S$ , мм	$h_1$ , мм	Смазка валков
1	51,58	53,91	0,65	0,92	сухие
2	17,2	24	1,35	1,86	сухие
3	21,58	21,95	1,35	1,49	керосин
4	22,11	25,13	1,3	1,48	керосин
5	30,53	29,69	1,1	1,32	керосин
6	42,63	40,22	0,8	1,09	керосин
7	48,42	51,26	0,65	0,98	керосин
8	57,89	46,92	0,5	0,8	керосин

### Результаты исследования и их обсуждение

В таблице показано, что при одинаковом зазоре между валками  $S = 1,35$  мм, прокатка полос с технологической смазкой керосин позволяет увеличить обжатие, уменьшить толщину полос с 1,86 до 1,49 мм и силу прокатки на 2 кН.

Переход из неустановившегося процесса в установившийся происходит на начальной стадии прокатки в среднем на  $L_n = 15-20$  мм по длине полосы. На заключительном этапе переходные процессы начинаются за 30-25 мм до завершения прокатки. Очевидно различие в протяженности неустановившихся участков прокатки переднего и заднего концов полос (рис. 1).

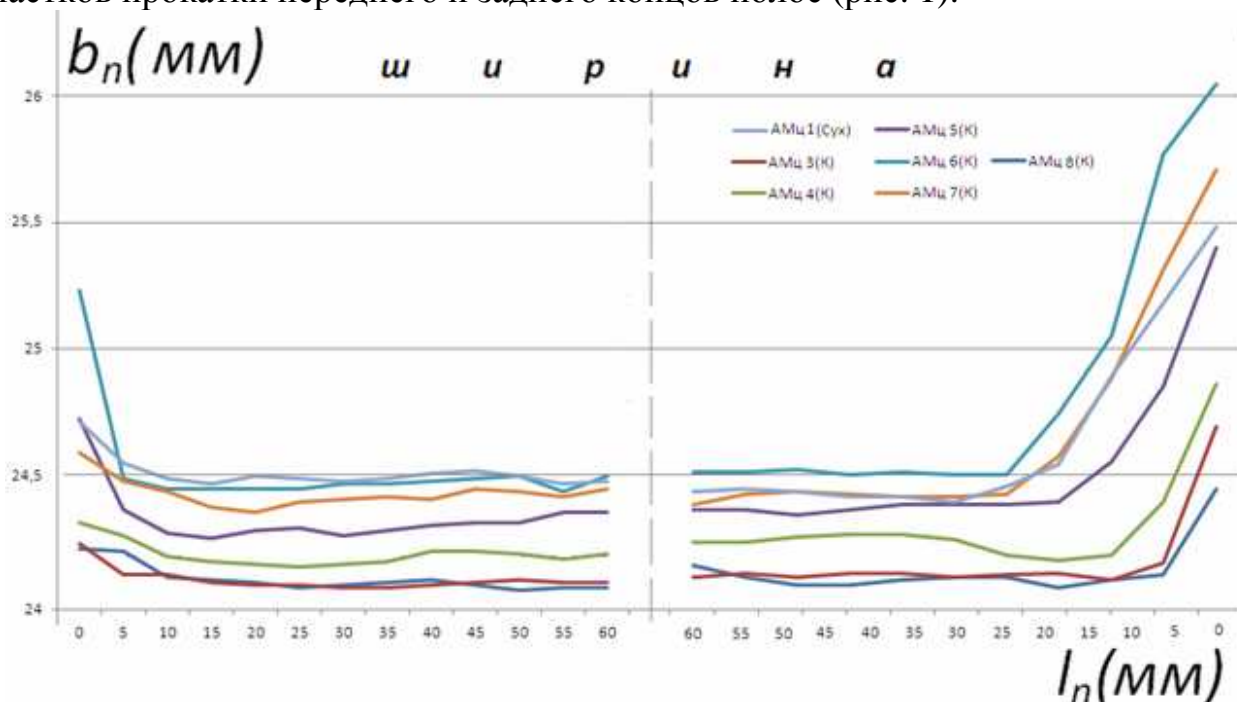


Рис. 1. Изменения ширины полосы алюминиевого сплава АМц на неустановившихся участках по её длине

При холодной прокатке алюминиевых полос (технологическая смазка керосин) с обжатием 50% протяженность нестационарного формирования ширины полос составляет около 10 мм, а при обжатии 22% увеличивается до 15 мм, то есть возрастает более чем на 30%. При холодной прокатке алюминиевых полос в сухих валках с обжатием 50% протяженность нестационарного формирования ширины полос увеличивается до 15 мм, что по сравнению с таким же обжатием при использовании технологической смазки керосин больше на 30%.

Сила прокатки распределяется неравномерно по длине полосы. При прокатке концевых участков сила до установившегося процесса прокатки изменяется от минимального 12-16 кН и возрастает до 22-54 кН с момента захвата полосы валками. В обратной последовательности уменьшается от установившегося процесса прокатки основной части полосы к концевому участку.

При увеличении обжатия сила прокатки увеличивается почти в 2,5 раза, с 22 кН до 51 кН, при этом длина концевых участков уменьшается с 20 мм до 10 мм.

### Заключение

В результате изучения влияния условий контактного трения на формирование силы прокатки и ширины по длине тонкой алюминиевой полосы, изготовленной из сплава АМц, был определен характер процесса прокатки по



длине тонкой полосы и установлена продолжительность процесса нестационарной прокатки по длине тонкой полосы в зависимости от степени деформации и условий контактного трения. Исходя из результатов проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Контактные условия деформирования существенно влияют на формирование силы прокатки и ширины по длине алюминиевых (АМц) полос.

2. С увеличением обжатия протяженность концевых участков, прокатываемых в течение протекания нестационарного периода деформации, уменьшается на 30 %.

3. При использовании технологических смазок протяженность концевых участков, прокатываемых в течение протекания нестационарного периода деформации, уменьшается на 25% по сравнению с холодной прокаткой в сухих валках.

#### **Список литературы**

1. Зайков М.А., Полухин В.П., Зайков А.М., Смирнов Л.Н. Процесс прокатки. – М.: МИСиС, 2004. – 640 с.
2. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Лебедев Н.Н. Напряжения и деформации в процессах обработки металлов давлением. – М.: Изд-во «Академкнига», 2004. – 240 с.
3. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Изд-во «Металлургия», 1980. – 318 с.
4. Shatalov R.L., Lukash A.S., Timin Y.F. Development and Study of a Microprocessor-Equipped System for Monitoring the Rolling Forces on a Sheet Mill // Metallurgist. 2016, no. 59 (9-10), pp. 948-952.
5. Шаталов Р.Л., Куликов М.А. Влияние внешних частей полосы на деформационные и силовые параметры при тонколистовой прокатке // Metallurg. – 2020. – №7. – С. 77-84.
6. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. – М.: Metallurgiya, 1995. – 256 с.
7. Chan V.Q., Shatalov R.L., Pham V.H., Huynh X.H. Investigating the Effectiveness of Roll Lubricants in Cold Rolling of Copper Bands in Industrial Two-High Rolling Mill 175×300 // Metallurgist. 2022, no. 66(5-6), pp. 663-671.

#### Сведения об авторах:

*Шаталов роман Львович* – д.т.н., профессор;

*Комаров Юрий Юрьевич* – аспирант.

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПЕРЕДВИЖЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КРАНОВ ПО НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОГИ, НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

*Хахов А.А.*

*Астраханский государственный технический университет, Астрахань*

**Ключевые слова:** автомобильный кран, продольный профиль дороги, конечный элемент, напряженно-деформированное состояние.

**Аннотация.** В статье изложены принципы построения расчетных моделей автомобильных кранов в транспортном положении. Описан алгоритм динамического анализа автомобильных кранов с телескопическими стрелами методом конечных элементов. Представлено матричное дифференциальное уравнение вынужденных колебаний металлоконструкций кранов. Сформированы матрица жесткости, матрица масс и матрица демпфирования конструкционной системы крана. Рассмотрен один из способов описания возмущающего воздействия продольного профиля дороги на металлоконструкции автомобильных кранов.

## THE INFLUENCE OF DYNAMIC EFFECTS ARISING FROM THE MOVEMENT OF MOBILE CRANES ON AN UNEVEN ROAD SURFACE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL STRUCTURES

*Khakhov A.A.*

*Astrakhan State Technical University, Astrakhan*

**Keywords:** mobile crane, longitudinal profile of the road, finite element, stress-strain state.

**Abstract.** The article describes the principles of constructing computational models of mobile cranes in transport condition. The algorithm of dynamic analysis of mobile cranes with telescopic booms by the finite element method is described. A matrix differential equation of forced vibrations of metal structures of cranes is presented. A stiffness matrix, a mass matrix and a damping matrix of the crane structural system have been formed. One of the ways to describe the disturbing effect of the longitudinal profile of the road on the metal structures of mobile cranes is considered.

Автомобильный кран – стреловой самоходный кран общего назначения, предназначенный для подъема, опускания и горизонтального перемещения грузов при производстве строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ на рассредоточенных объектах. Автомобильные краны собираются на базе шасси серийно выпускаемых грузовых автомобилей. На шасси автомобиля устанавливается опорная рама с передними и задними выносными опорами для обеспечения устойчивости при работе крана с грузом и повышения грузоподъемности. На опорную раму устанавливается поворотная рама со стреловой системой. В настоящее время широкое распространение получили автомобильные краны с жестким подвесом стрелы. В состав стрелового оборудования таких кранов входит система телескопических секций стрелы из тонкостенных стержней замкнутого профиля с гидравлическим приводом механизмов.

Автомобильные краны эксплуатируются в самых разнообразных дорожных условиях. Оценить все многообразие воздействий на металлоконструкции автомобильных кранов от дорожных неровностей чрезвычайно сложно, особенно, если принять во внимание, что в зависимости от сезона и специфики региона однотипные дороги могут иметь различные характеристики. Динамические эффекты, возникающие при передвижении крана по дорожным неровностям, зависят от конфигурации машины, упругих характеристик крана и его подвески, скорости и условий перемещения, а также от физических и геометрических характеристик дороги [1].

Нормативно-технические документы не предусматривают расчет автокранов в нерабочем состоянии при их передвижении. Тем не менее, большая часть усталостных трещин в металлоконструкциях автокранов появляется в результате их передвижения по неровностям дорожной поверхности.

В развитие норм расчета металлических конструкций автомобильных кранов учеными Астраханского государственного технического университета проводятся исследования движения автомобильных кранов по неровным поверхностям дорог. Объектом исследования принят автомобильный кран КС-35715 производства Ивановского машиностроительного завода «АВТОКРАН» (рис. 1).



Рис. 1. Автомобильный кран КС-35715

Автомобильный кран является континуальной системой с непрерывно распределенными параметрами масс и жесткостей и бесконечным числом степеней свободы. Дискретизация конструкции позволяет построить модель исходной системы путем приведения ее к совокупности отдельных элементов с дискретно-континуальными параметрами масс и жесткостей, связанных между собой в точках – узлах. Перемещения узлов принимаются за обобщенные координаты системы и характеризуют перемещения системы в целом. Полученная таким образом модель имеет конечное число степеней свободы.

Основная цель динамического анализа заключается в определении характера изменения во времени перемещений системы под действием заданной

переменной нагрузки и оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций. В расчетной практике задача сводится к анализу временных функций изменения состояния выбранных элементов системы. Математическое моделирование динамических процессов в системе позволяет определить взаимосвязанность колебаний в крановой системе с вертикальными колебаниями подрессоренной массы на упругих элементах подвески и шинах.

Математическая модель учитывает характеристики упругих связей канатов, рессор шасси автомобиля, шин, гидроцилиндра подъема (опускания) стрелы, элементов стреловой системы, поворотной и опорной рам, а также возмущающее воздействие дороги, продольный профиль которой для  $i$ -го колеса описывается случайной функцией  $z = q_{cz}(x, y)$  (рис. 2).

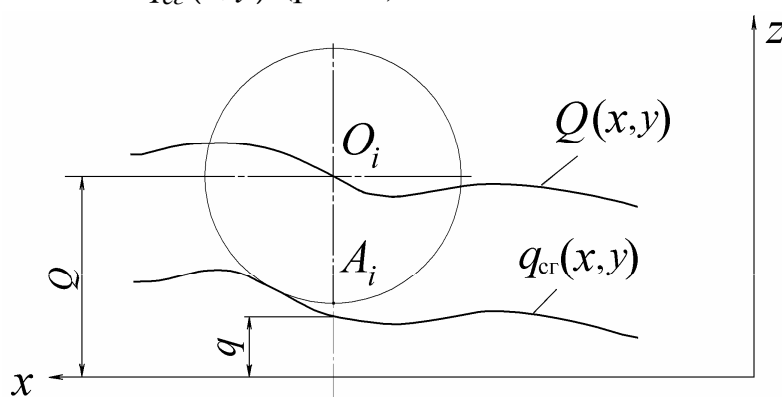


Рис. 2. Продольный профиль дороги и эквидистанта профиля, описываемая центром окружности колеса

Матричное уравнение движения системы с  $n$  степенями свободы имеет вид [3]:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{P_c\} - [M]\{\ddot{A}(t)\},$$

где  $[M]$  – матрица масс системы, характеризующая действие сил инерции;

$[C]$  – матрица демпфирования, характеризующая рассеивание (диссипацию) энергии;

$[K]$  – матрица жесткости системы, характеризующая действие упругих восстанавливающих сил;

$\{V\}$ ,  $\{\dot{V}\}$ ,  $\{\ddot{V}\}$  – векторы обобщенных перемещений, скоростей и ускорений системы соответственно, характеризующие смещения, скорости и ускорения узлов моделируемой системы в общей системе координат;

$\{P_c\}$  – вектор статических нагрузок;

$\{\ddot{A}(t)\}$  – вектор ускорений узлов, определяемый вертикальными ускорениями точек  $A_i$  шин автомобильного крана (рис. 2).

Ввиду многообразия форм трёхмерных элементов металлоконструкций автомобильных кранов для построения адекватных расчётных моделей необходимо иметь выбор конечных элементов разной формы. Наиболее часто на практике используют элементы в форме тетраэдра с плоскими гранями (рис. 3).

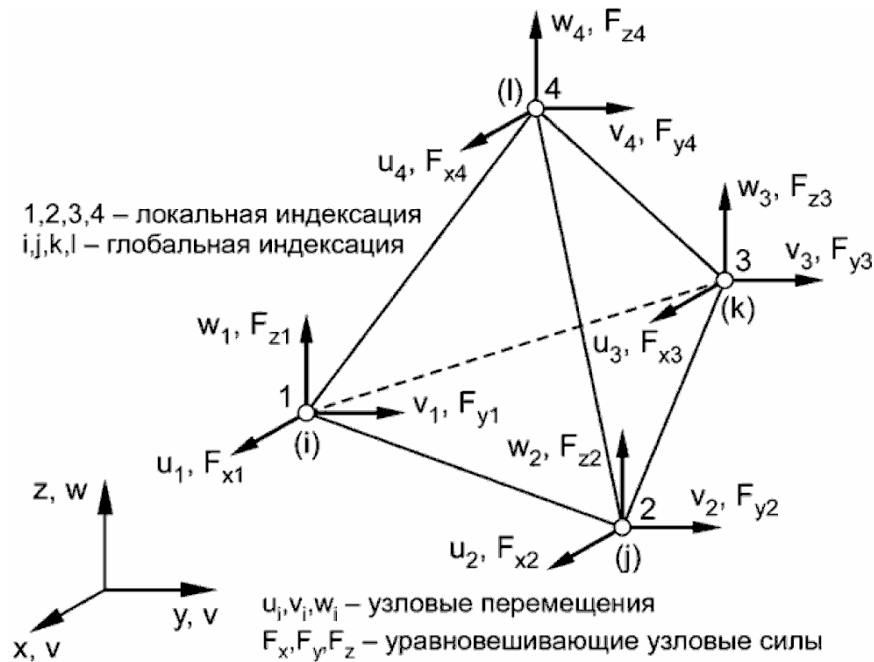


Рис. 3. Четырехузловой тетраэдрический конечный элемент

На любой узел в конструкции в общем случае может быть наложено три жёстких (или упругих) линейных связи. В качестве внешних воздействий принимают сосредоточенные узловые силы и массовые нагрузки.

Матрица жесткости тетраэдрического конечного элемента формируется выражением:

$$[K] = \iiint_V [B]^T [E] [B] dx dy dz,$$

где  $V$  – объем тетраэдра;

$[E]$  – матрица упругих констант материала, связывающая векторы напряжений и относительных деформаций;

$[B]$  – матрица деформаций, представляющая собой массив производных функций формы, дифференцируемых в соответствии с существующими зависимостями относительных деформаций.

Так как все компоненты матриц  $[B]$  и  $[E]$  являются постоянными величинами, то матрица принимает вид

$$[K] = [B]^T [E] [B] V.$$

Матрица деформаций  $[B]$  для четырехузловой тетраэдрического элемента будет иметь вид:

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 & 0 & c_4 & b_4 & 0 \\ 0 & d_1 & c_1 & 0 & d_2 & c_2 & 0 & d_3 & c_3 & 0 & d_4 & c_4 \\ d_1 & 0 & b_1 & d_2 & 0 & b_2 & d_3 & 0 & b_3 & d_4 & 0 & b_4 \end{bmatrix},$$

где параметры  $b_i$ ,  $c_i$  и  $d_i$  определяются формулами:

$$b_i = - \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix}; \quad c_i = \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix}; \quad d_i = - \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{vmatrix},$$

где  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Матрица упругих констант материала

$$[E] = \frac{E}{1+\mu} \begin{bmatrix} \frac{1-\mu}{1-2\mu} & \frac{\mu}{1-2\mu} & \frac{\mu}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-2\mu} & \frac{1-\mu}{1-2\mu} & \frac{\mu}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-2\mu} & \frac{\mu}{1-2\mu} & \frac{1-\mu}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Матрицу масс конечного объемного элемента можно найти по формуле

$$[M] = \iiint_V N^T [m] [N] dx dy dz,$$

где  $[m] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix},$

где  $m$  – масса единицы объема.

Матрица  $[N]$  связывает компоненты перемещения  $\{U\} = \{u \ v \ w\}$  для произвольной точки тетраэдра с вектором узловых перемещений тетраэдра  $\{q\} = \{u_1 u_2 u_3 u_4 v_1 v_2 v_3 v_4 w_1 w_2 w_3 w_4\}$ :

$$\{U\} = [N] \{q\}.$$

Матрица масс элементарного тетраэдра

$$[M] = \begin{bmatrix} [P] & 0 & 0 \\ 0 & [P] & 0 \\ 0 & 0 & [P] \end{bmatrix},$$

где  $[P] = \frac{mV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$

Пространственные перемещения конструкции крана следует рассматривать как последовательность переходных состояний, которые характеризуются случайно распределенными участками возрастания и убывания амплитуд, поэтому их механизм рассеяния энергии не вполне аналогичен явлениям,

изучаемым при циклическом нагружении. В терминах метода конечных элементов учет демпфирующих характеристик конструкции учитывается матрицей демпфирования  $[C]$ , которую формируют пропорционально матрицам масс и жесткостей:

$$[C] = \alpha_{[M]}[M] + \alpha_{[K]}[K].$$

Коэффициенты пропорциональности определяются по формулам:

$$\alpha_{[M]} = \frac{\delta_{3,1}\omega_0}{\pi}; \quad \alpha_{[K]} = \frac{\delta_{3,1}}{\pi\omega_0},$$

где  $\delta_{3,1}$  – логарифмический декремент низшей формы колебаний конструкционной системы крана;  $\omega_0$  – собственная частота низшей формы колебаний конструкционной системы крана.

Вертикальные ускорения точек  $A_i$  шин автомобиля, составляющих вектор  $\{\ddot{A}(t)\}$ , определяют путем двойного дифференцирования функции эквидистанты профиля дороги, учитывая движение автокрана вдоль оси  $x$  с постоянной скоростью  $v$ :

$$a_{A_i}(t) = a_{O_i}(t) = \ddot{Q}(t).$$

На основе принятых условий дискретизации разработана расчетно-динамическая модель крана КС-35715 в нерабочем состоянии, для чего методом суперпозиции построены матрица жесткости и масс полной системы  $n$ -го порядка. На рисунке 4 изображена конечно-элементная модель автомобильного крана КС-35715. Полученная модель имеет 1770496 узлов, 2117327 конечных элементов. Количество степеней свободы конечно-элементной модели  $n = 3511284$ .

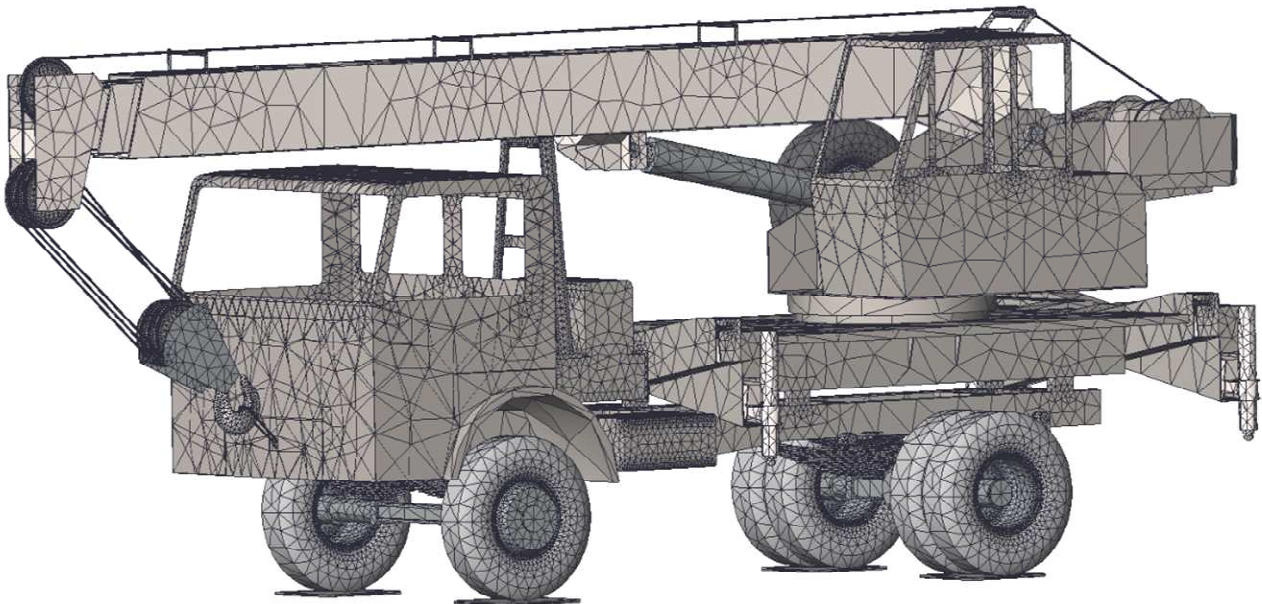


Рис. 4. Конечно-элементная модель автомобильного крана КС-35715

Решение уравнения движения методом Ньюмарка позволяет оценить напряженно-деформированное состояние автомобильного крана в любой момент времени движения по неровностям дороги.

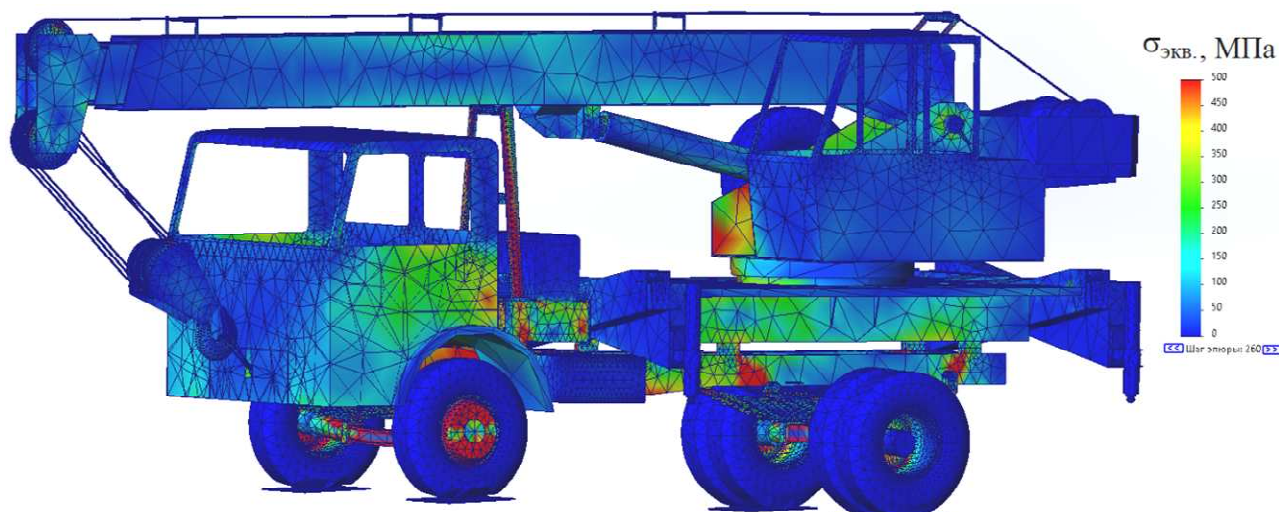


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние автомобильного крана КС-35715 и эпюра эквивалентных напряжений

В соответствии с [2] эквивалентные напряжения в узлах исследуемой модели автомобильного крана (рис. 5) определяют по теории удельной энергии изменения формы.

Таким образом, используя результаты расчетного анализа напряженно-деформированного состояния, на этапе проектирования можно вносить необходимые изменения в металлоконструкции автомобильных кранов, повышая прочность опасных зон. Кроме того, оценка эквивалентных напряжений в узлах конечно-элементной модели дает возможность определить ресурсные характеристики автомобильных кранов, к которым относят нормативный срок службы, частоту отказов, наработку на отказ, интенсивность отказов, что соответствует ТР ТС 018/2011 «Технический регламент Таможенного союза. О безопасности колесных транспортных средств» [4].

#### Список литературы

1. ГОСТ 32579.1-2013 Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. – М.: Стандартиформ, 2015. – 30 с.
2. ГОСТ 33169-2022. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 58 с.
3. Панасенко Н.Н., Дербенев Н.А., Смирнов В.В., Синельщиков А.В., Юзиков В.П. Строительная механика сварных пространственных металлоконструкций. Специальные главы: учебное пособие / под общ. ред. проф., д-ра тех. наук Н.Н. Панасенко. – Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2017. – 492с.
4. ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности колесных транспортных средств. – М.: Утв. решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011г. №877, 2011. – 63 с.

#### Сведения об авторе:

Хахов Алексей Алексеевич – доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт».



## ВЫБОР ТИПА ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Кривошеев Н.С., Жарковский А.А., Броднев П.Н.*

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

**Ключевые слова:** пневмогидравлический привод, пневмогидравлика, автоматизация, гидропривод, пневмопривод.

**Аннотация.** В статье рассмотрены различные типы пневмогидравлических приводов. Проведен анализ конструкций, рассмотрены преимущества и недостатки различных типов пневмогидравлических приводов. Разработаны рекомендации по выбору типа пневмогидравлического привода, в зависимости от поставленной задачи. Проведен сравнительный анализ пневмогидравлического привода с пневматическим и гидравлическим приводами. Рассмотрены особенности рабочих процессов и эксплуатации пневмогидравлических приводов.

## SELECTING THE TYPE OF PNEUMO-HYDRAULIC DRIVE OF MACHINE EQUIPMENT

*Krivosheev N.S., Zharkovskij A.A., Brodnev P.N.*

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

**Keywords:** pneumo-hydraulic drive, pneumo-hydraulics, automation, hydraulic drive, pneumatic drive.

**Abstract.** The article is about various types of pneumo-hydraulic drives. An analysis of the designs was carried out, the advantages and disadvantages of various types of pneumo-hydraulic drives were considered. Recommendations have been developed for choosing the type of pneumo-hydraulic drive, depending on the task. A comparative analysis of the pneumo-hydraulic drive with pneumatic and hydraulic drives was carried out. The features of working processes and operation of pneumo-hydraulic drives are considered.

Одной из задач проектирования гидравлических и пневматических приводов является задача увеличения максимальной энергоёмкости системы, что предполагает уменьшение габаритов и увеличение энергоёмкости отдельных компонентов гидравлических и пневматических приводов. Решение этой задачи на основе типовых элементов пневматических систем требует использования комплектующих, рассчитанных на давление, в несколько раз большее используемого в магистральных пневмосистемах промышленных предприятий. Гидравлический привод на промышленных предприятиях подразумевает использование насосной станции для преобразования механической энергии в гидравлическую. Применение пневмогидравлического мультипликатора давления позволяет отказаться от использования насосной станции для этой цели.

### 1. Пневмогидравлический привод. Общие сведения

Пневмогидравлический привод представляет собой совокупность элементов объёмных гидравлических и объёмных пневматических приводов, и предназначен, как и данные приводы по отдельности, для передачи механической

энергии и преобразования движения. Данный тип привода находит достаточно широкое применение в различных областях техники, таких как робототехника, станкостроение, автомобилестроение, прессовое оборудование, пищевая промышленность. В частности, он нашел широкое применение при оснащении автоматизированных и конвейерных линий.

С точки зрения функциональной схемы гидрофицированного оборудования, пневмогидравлический привод, представляет собой звено между приводным двигателем и исполнительным механизмом. Помимо своего основного назначения – передачи энергии и преобразования движения – пневмогидравлический привод, позволяет осуществлять плавное регулирование скорости исполнительных органов рабочей машины, а также автоматическую защиту всех её элементов от перегрузок) [3].

Обязательными элементами пневмогидравлического привода являются преобразователь энергии сжатого газа в гидравлическую энергию капельной рабочей жидкости и исполнительный гидродвигатель. Источник пневматической энергии может входить в состав привода (компрессор или, реже, баллон со сжатым газом). Однако, чаще используется магистральный вариант данного привода, при котором используется сжатый газ, чаще всего воздух, забираемый из общей для нескольких потребителей сети.

В зависимости от характера движения выходного звена гидродвигателя (вала гидромотора или штока гидроцилиндра), пневмогидравлический привод может быть вращательным или поступательным.

Пневматические приводы имеют ряд несомненных достоинств, среди которых доступность и экологическая безопасность рабочего тела, а также использование в качестве источника энергии промышленных сетей сжатого воздуха. К существенным недостаткам чисто пневматических приводов относят относительно небольшие развиваемые их двигателями усилия и практически полную невозможность точного позиционирования выходного звена [2]. Кроме того, они имеют низкую жёсткость нагрузочных характеристик, так называемую «податливость», возникающую вследствие сжимаемости воздуха и особенно заметно проявляющуюся при быстрых изменениях нагрузок. Эти недостатки накладывают некоторые ограничения на возможность применения пневматических приводов.

Гидравлические приводы способны развивать большие усилия и обеспечивать высокую точность позиционирования своих выходных звеньев, однако также имеют ряд недостатков [1]. В некоторых случаях к их числу относят необходимость использования в составе привода гидравлической насосной станции, имеющей первичный двигатель, бак с запасом рабочей жидкости, а также системы кондиционирования рабочей жидкости.

Идея создания пневмогидравлического привода, как одной системы, включающей элементы обоих этих видов привода, заключается в использовании гидравлического исполнительного механизма со всеми его достоинствами, который обеспечивается рабочей жидкостью от пневмогидравлического преобразователя энергии, использующего для работы сеть сжатого воздуха.

Исходной энергией в пневмогидравлических приводах является потенциальная энергия сжатого воздуха, получаемого из компрессорных установок. Функциональная схема пневмогидравлического привода показана на рисунке 1.

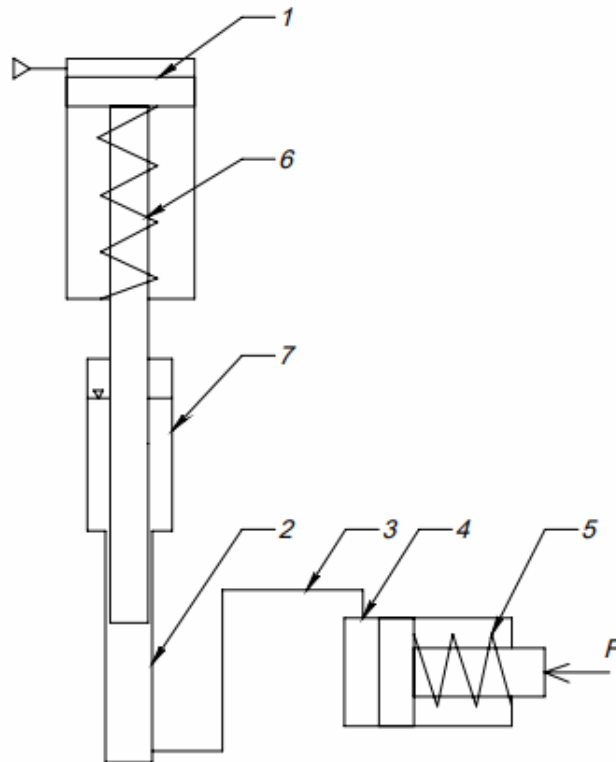


Рис. 1. Функциональная схема пневмогидравлического привода

Сжатый воздух подается в пневматический цилиндр 1, шток которого является поршнем гидроцилиндра 2. Рабочая жидкость из гидроцилиндра 2 поступает по трубопроводу 3 в гидроцилиндр 4, шток которого создает силу  $F$ . Обратный ход поршней цилиндров 1 и 4 происходит за счет усилий пружин 5 и 6. Если рабочий ход поршней велик, то обратный ход может осуществляться сжатым воздухом. Резервуар 7 предназначен для пополнения утечек рабочей жидкости в системе. Конструктивно вся схема может быть реализована либо в виде единого блока, либо с отдельно вынесенным гидроцилиндром 4. Во втором случае компактный цилиндр 4 устанавливают вместе с исполнительным органом, а блок цилиндров 1 и 2 располагают вне рабочей зоны оборудования.

Сжатый воздух в систему поступает через пневматические распределители. Схема гидрораспределителя с пневматическим управлением с первой ступенью усиления приведена на рисунке 2.

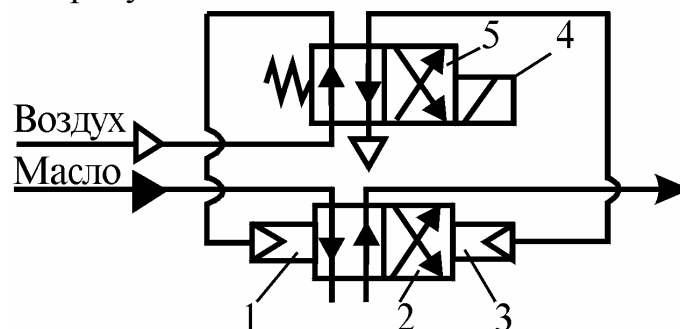


Рис. 2. Схема гидравлического распределителя с пневмоуправлением

Золотник 2 гидравлического привода приводится в движение двумя пневматическими управляющими цилиндрами 1 и 3, управляемыми пневматическим распределителем 5 с электромагнитом 4. В зависимости от положения сердечника электромагнита 4, приводящего в движение вспомогательный пневматический золотник, сжатый воздух подается к пневматическим цилиндрам 1 или 3. Этим осуществляется управление основным гидравлическим золотником 2. Пневмогидравлические приводы широко используются в конструкциях металлообрабатывающих станков и другого технологического оборудования, зажимных приспособлениях и других устройствах.

Пневмогидравлические приводы являются весьма эффективным средством получения больших усилий выходного звена при использовании сжатого воздуха низкого давления цеховых магистралей (0,4..0,6 МПа). Пневмогидравлический привод по сравнению с гидравлическим имеет ряд преимуществ:

- возможность не только обеспечения большого рабочего давления исполнительного гидродвигателя и, как следствие, больших развиваемых двигателем усилий, но и поддержание этого давления в течение длительного времени;

- высокая эффективность использования энергии ввиду того, что сжатый воздух расходуется только при перемещении поршней гидроцилиндров (например, при зажиме заготовок и разжиме готовых деталей). Помимо экономии энергии это позволяет в большинстве случаев отказаться от установки теплообменного оборудования;

- возможность в ряде случаев осуществлять управление гидродвигателем посредством пневматической аппаратуры низкого давления, устанавливаемой в пневматической части привода. Это сокращает использование дорогостоящих гидрораспределителей и других гидроаппаратов с высокими значениями номинального давления;

- лучшие массогабаритные характеристики всего привода, что объясняется отсутствием в его составе гидравлической насосной станции. Такие приводы более компактны и просты, чем идентичные им по мощности гидравлические приводы. Это повышает вариативность размещения элементов привода в конструкции гидрофицированного оборудования;

- повышенный ресурс привода вследствие ограниченного использования в его конструкции быстроизнашиваемых элементов.

## **2. Пневмогидравлический привод с воздушно-масляным резервуаром**

На рисунке 3 изображена схема пневмогидравлического привода с одним воздушно-масляным резервуаром с пневматическим распределителем. Порт гидравлической части резервуара соединен трубопроводом с гидравлическим цилиндром. Дроссель, установленный между гидравлической частью резервуара и гидроцилиндром регулирует скорость выдвигания штока гидроцилиндра. Кроме того, внешние силы, действующие на шток цилиндра, не могут заставить его двигаться быстрее, чем позволяет регулятор расхода. Если усилие на штоке гидроцилиндра постоянно меняется во время движения, скорость выдвигания штока будет изменяться очень незначительно.



Рис. 3. Схема пневмогидравлического привода с воздушно-масляным резервуаром

Недостатком пневмогидравлического привода с воздушно-масляным резервуаром является прямой контакт сжатого воздуха с рабочей жидкостью в резервуаре. Это может привести к неустойчивому движению поршня и снижению точности управления гидроцилиндром. Также утечка рабочей жидкости через пневмоглушители при попадании рабочей жидкости в пневматическую часть негативно влияет на окружающую среду. Такая схема используется для замены пневматического цилиндра, работающего под большой нагрузкой. При изменении нагрузки пневматический цилиндр может остановиться или наоборот, резко увеличить скорость. При наличии гидравлической части, выдвигание штока гидроцилиндра будет оставаться плавным.

В конструкции воздушно-масляных резервуаров используются специальные ограничители. Верхний ограничитель предотвращает попадание поступающего сжатого воздуха в рабочую жидкость. Нижний ограничитель останавливает завихрение, которое может привести к попаданию воздуха в цилиндр при понижении уровня в баке.

Для контроля уровня рабочей жидкости в воздушно-масляном резервуаре используются визуальные индикаторы уровня. В конструкции воздушно-масляных резервуаров как правило уже имеются заливные горловины и визуальные индикаторы уровня. Для нормальной работы воздушно-масляные резервуары должны быть заполнены примерно на 75% от номинального рабочего объема.

### 3. Пневмогидравлический привод с двумя воздушно-масляными резервуарами

На рисунке 4 показана схема пневмогидравлического привода с двумя воздушно-масляными резервуарами. Два резервуара устраняют проблему утечек между пневматическим и гидравлическим контуром в гидроцилиндре, возникающих из-за негерметичности поршневых уплотнений. Также они обеспечивают более точное регулирование скорости и позиционирование штока гидроцилиндра как при прямом, так и при обратном ходе.

При использовании схемы с двумя воздушно-масляными резервуарами необходимо устанавливать уравнивающий клапан между резервуарами. Он устанавливается на трубопроводе, соединяющем нижние полости двух резервуаров для обеспечения выравнивания уровня рабочей жидкости. При заполнении резервуаров рабочей жидкостью, необходимо не допускать полного

заполнения при полностью выдвинутом штоке цилиндра. В противном случае при втягивании штока рабочая жидкость попадёт в пневматическую часть.

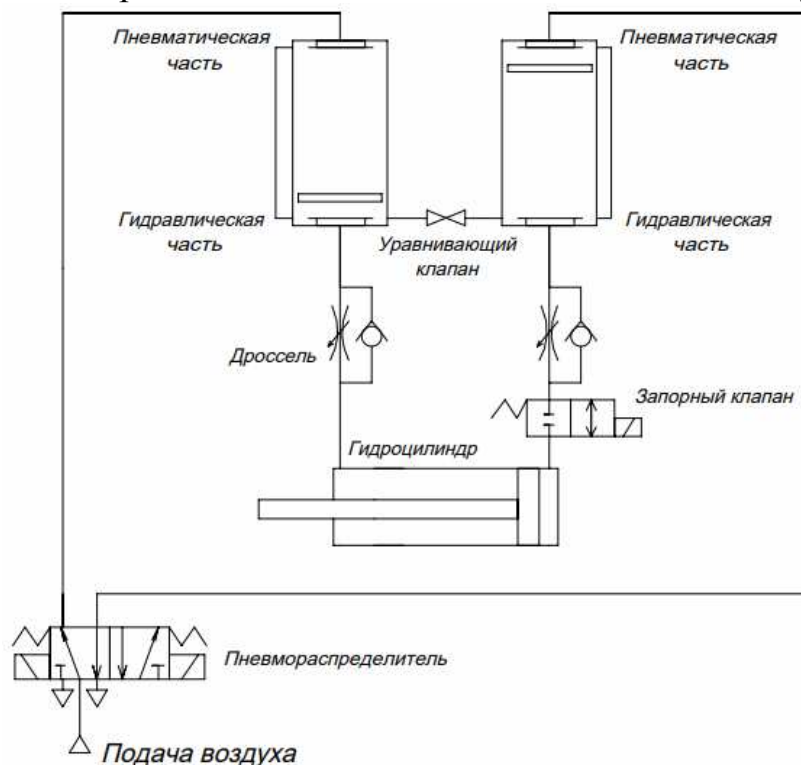


Рис. 4. Схема пневмогидравлического привода с двумя воздушно-масляными резервуарами

Для более точного управления выдвиганием штока гидроцилиндра устанавливается запорный клапан между воздушно-масляным резервуаром и гидроцилиндром. Запорный клапан позволяет точно останавливать и удерживать гидроцилиндр под нагрузкой в течение длительного времени. Для защиты от перегрузок при чрезмерном воздействии внешней силы необходимо устанавливать предохранительный клапан.

#### 4. Пневмогидравлический привод с тандем-цилиндром

На рисунке 5 изображена схема пневмогидравлического привода с тандем-цилиндром с возможностью изменения скорости выдвигания штока тандем-цилиндра и остановки в середине хода. Такой привод обеспечивает функции, аналогичные приводу с воздушно-масляными резервуарами. Пневмораспределитель обеспечивает управление направлением выдвигания штока цилиндра. Дроссель и запорный клапан установлены в линии, соединяющей поршневую и штоковую полости гидравлической части тандем-цилиндра, которая представляет собой гидроцилиндр двустороннего действия с двусторонним штоком. Для компенсации утечек рекомендуется устанавливать подпиточный резервуар.

Такая система обеспечивает плавность хода исполнительного механизма и возможность точного позиционирования в промежуточном положении. Основными недостатками такой системы являются большие габаритные размеры тандем-цилиндра и необходимость компенсации утечек в гидравлическом контуре.

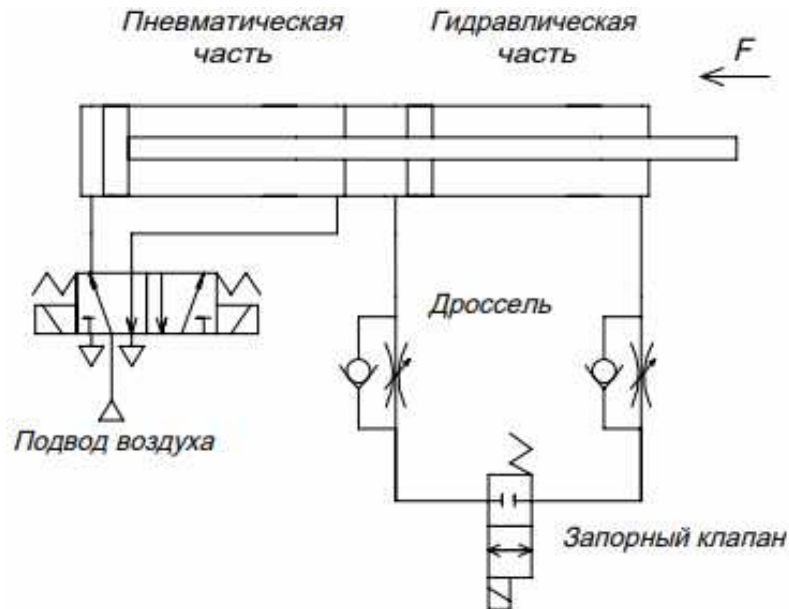


Рис. 5. Схема пневмогидравлического привода с тандем-цилиндром

На рисунке 6 изображена схема пневмогидравлического привода с тандем-цилиндром с различным диаметром поршней. Такая схема является частным случаем схемы с тандем-цилиндром, и обладает несколькими преимуществами: меньшим требуемым объемом рабочей жидкости, компактностью исполнительного механизма, общей экономичностью системы.

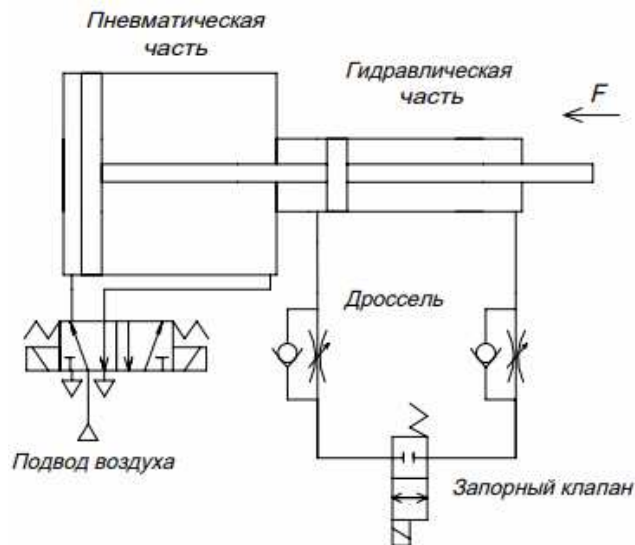


Рис. 6. Схема пневмогидравлического привода с тандем-цилиндром с различным диаметром поршней

Различные типы пневмогидравлических приводов, позволяют использовать их для решения задач автоматизации процессов в станочном оборудовании:

1. *Пневмогидравлический привод с воздушно-масляным резервуаром.*

Применяется для решения задач, в которых требуется обеспечить высокую плавность хода исполнительного двигателя при прямом ходе, при малом усилии.

Преимущество по сравнению с пневматическим приводом – обеспечение высокой плавности хода исполнительного двигателя при прямом ходе.

Преимущество по сравнению с гидравлическим приводом – компактность основных узлов и элементов, отсутствие необходимости в насосной станции.

## *2. Пневмогидравлический привод с двумя воздушно-масляными резервуарами*

Применяется для решения задач, в которых требуется обеспечить высокую плавность хода исполнительного двигателя как при прямом ходе, так и при обратном ходе, при малом усилии.

Преимущество по сравнению с пневматическим приводом – обеспечение высокой плавности хода исполнительного двигателя как при прямом, так и при обратном ходе.

Преимущество по сравнению с гидравлическим приводом – компактность основных узлов и элементов, отсутствие необходимости в насосной станции.

## *3. Пневмогидравлический привод с тандем-цилиндром*

Применяется для решения задач, в которых требуется обеспечить высокую плавность хода исполнительного двигателя как при прямом ходе, так и при обратном ходе. Возможность увеличения рабочего давления в гидравлической секции пневмогидравлического привода.

Преимущество по сравнению с пневматическим приводом – обеспечение высокой плавности хода исполнительного двигателя. Возможность подачи рабочей жидкости в исполнительный двигатель с большим давлением, чем давление в пневматической магистрали.

Преимущество по сравнению с гидравлическим приводом – компактность основных узлов и элементов, отсутствие необходимости в насосной станции.

## **Заключение**

1. Рассмотрен вопрос возможного сочетания пневматического и гидравлического приводов в станочном оборудовании, что позволит использовать одновременно преимущества обоих видов приводов, такие как простота управления и автоматизации, возможность получения больших усилий и мощностей при малых размерах и весе, высокая плавность хода исполнительного двигателя, возможность получения гидравлической энергии жидкости без насосной станции.

2. Рассмотрены различные типы пневмогидравлических приводов и проведен анализ их конструкций, преимуществ и недостатков. Рассмотрены особенности рабочих процессов и эксплуатации пневмогидравлических приводов.

3. Разработаны рекомендации по выбору типа пневмогидравлического привода, в зависимости от поставленной задачи.

## **Список литературы**

1. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
2. Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 414 с.
3. Решетников В.Ф. Гидравлика, гидропривод и гидропневмоавтоматика станочного оборудования. – КГТУ, 1993 – 44 с.

## Сведения об авторах:

*Броднев Павел Николаевич* – к.т.н., доцент;  
*Жарковский Александр Аркадьевич* – д.т.н., профессор;  
*Кривошеев Никита Сергеевич* – аспирант.



## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РОБОТОМ

*Виноградов М.В.<sup>1</sup>, Самойлова Е.М.<sup>1</sup>, Рябов А.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.;*

<sup>2</sup>*Компания НПО RBS, «РейнбовСофт», Саратов*

**Ключевые слова:** технологический робот, манипулятор, автоматизация, мехатроника, программное обеспечение, программный код.

**Аннотация.** На смену человеку на многих этапах современного промышленного производства при выполнении как основных, так и вспомогательных технологических операций все чаще приходят технологические роботы-манипуляторы. Это позволяет решать задачи автоматизации на современных предприятиях с широким разнообразием продукции, как при единичном, так и при массовом производствах.

## CONTROL OF A TECHNOLOGICAL ROBOT

*Vinogradov M.V.<sup>1</sup>, Samoilova E.M.<sup>1</sup>, Ryabov A.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Yuri Gagarin state technical university of Saratov;*

<sup>2</sup>*NPO RBS Company, ReinbovSoft, Saratov*

**Keywords:** technological robot, manipulator, automation, mechatronics, software, program code.

**Abstract.** Technological robotic manipulators are increasingly replacing humans at many stages of modern industrial production when performing both basic and auxiliary technological operations. This makes it possible to solve automation problems in modern enterprises with a wide variety of products, both in single and mass production.

Технологические роботы-манипуляторы все чаще приходят на смену человеку на многих этапах современного промышленного производства при выполнении как основных, так и вспомогательных технологических операций, что позволяет решать задачи автоматизации на предприятиях с широким разнообразием продукции как при единичном, так и массовом производствах. С ростом уровня автоматизации промышленного производства выросла и потребность в программных продуктах, осуществляющих управление технологическими роботами – средствах числового программного управления (ЧПУ) [1].

Рассмотрим управление роботом как моделью полноразмерного технологического манипулятора. В системе управления RM-001 возможен как запуск готовых программ, так и создание собственных с помощью задания параметров перемещения исполнительных органов робота. Технические возможности данного робота позволяют наряду с перемещениями в пределах области достижимости выполнять закручивание и откручивание гайки. Эти действия относятся к сборочным операциям (рис. 1). Такая возможность дает основание отнести робота в группу технологических [2, 3].

Схема подключения сервоприводов манипулятора и светодиодного модуля к шестнадцатиканальной плате драйвера обеспечивает связь с компьютером через преобразователь интерфейса I2C (рис. 2).

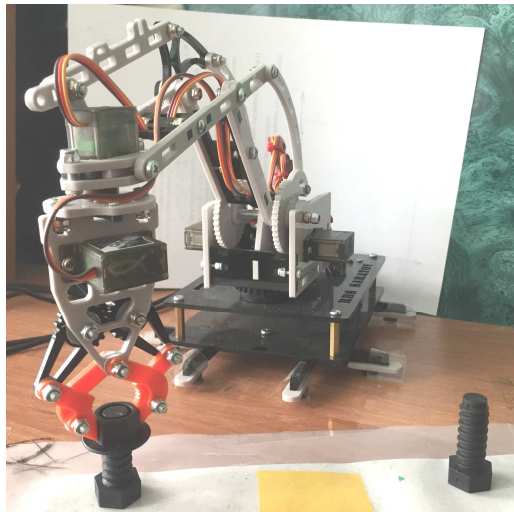


Рис. 1. Выполнение сборочной операции манипулятором RM-001

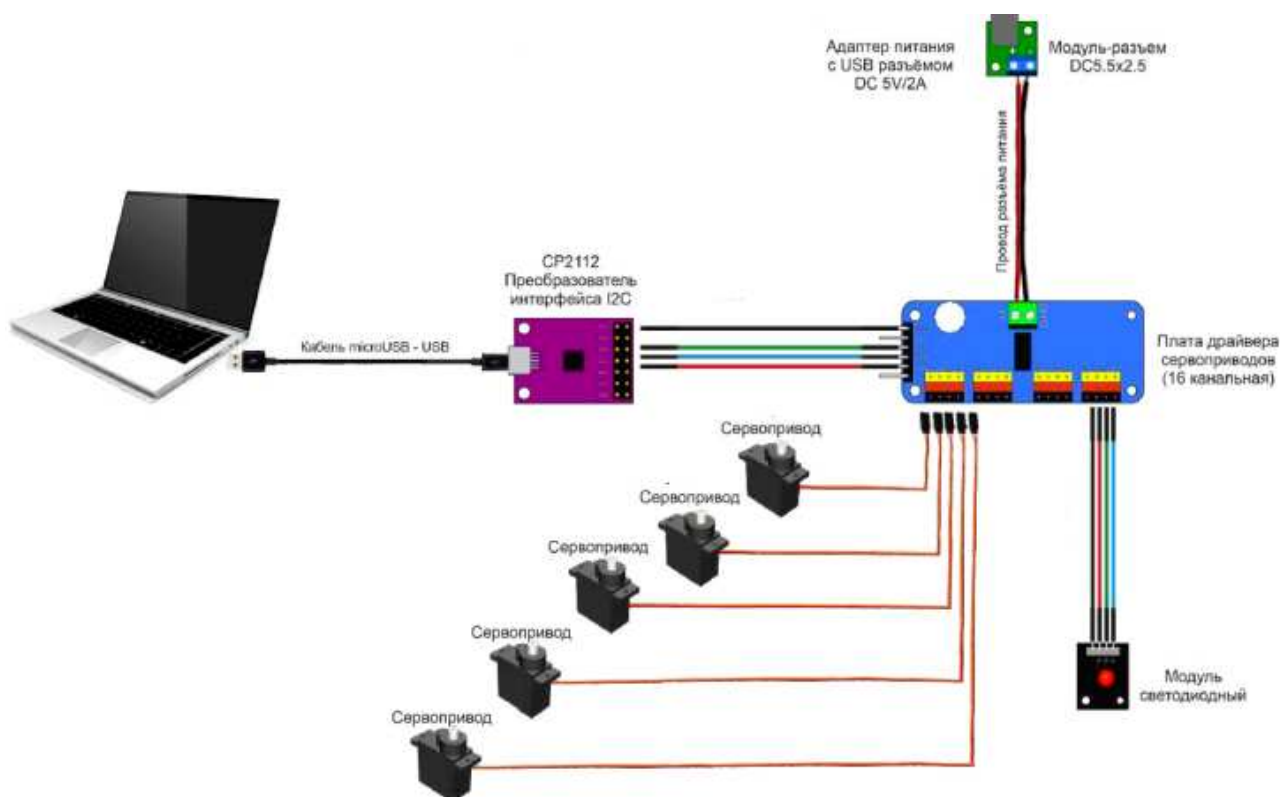


Рис. 2. Схема подключения манипулятора

Робот-манипулятор модели RM-001 может выполнять следующие команды-действия:

- захватывать, удерживать, перемещать груз массой до 30 г;
- поворачивать башню манипулятора с клешней и грузом вправо и влево от стартового положения на 90 градусов;
- перемещать клешню с грузом и без груза с помощью стрелы манипулятора вверх и вниз/вперёд и назад от стартового положения;
- изменять цвет, яркость, режимы световой индикации действий робота с помощью программируемого светодиода.

Команды роботу-манипулятору возможно задавать вручную или с помощью программного кода, созданного с использованием блочно-визуального языка программирования или в интегрированной среде разработки с

использованием языка Python. Например, корректировка движения робота с учетом особенностей поставленной задачи осуществляется в окне редактора кода программы *#Тело программы* вводом конкретных значений (рис. 3).

```
#Тело программы  
  
#1) Обнуляем приводы (Калибровка)  
  
errCode = lib.RI_SDK_exec_ServoDrive_Turn(servo_3, 0, 90, c_bool(False), errTextC)  
if errCode != 0:  
    print(errCode, errTextC.raw.decode())  
    sys.exit(2)
```

Рис. 3. Окно редактора: пример задания поворота сервопривода

Рост уровня автоматизации промышленного производства и развитие научно-технического прогресса требуют все большей точности и гибкости выполнения операций, что приводит к необходимости разработки систем управления технологическими роботами с элементами искусственного интеллекта, способных анализировать внешние условия и осуществлять операции с учетом изменений в окружающем мире. Это позволит выполнять технологические операции более эффективно и без потери качества.

### Список литературы

1. Тарабарин В.Б. Промышленные роботы и манипуляторы // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №5. – С. 17-23.
2. Runtime программирование промышленного робота на RCML [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – 2021.
3. НПО «Интеллект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://blockly.robointellect.ru/>

### Сведения об авторах:

*Виноградов Михаил Владимирович* – д.т.н., доцент, профессор кафедры Техническая механика и Мехатроника;

*Самойлова Елена Михайловна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры Техническая механика и Мехатроника;

*Рябов Анатолий Владимирович* – директор.

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Корниенко Р.Д., Маничев Д.С.*

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

**Ключевые слова:** высокоэнергетическое воздействие, обработка изделий машиностроения, лазерные и плазменные технологии.

**Аннотация.** В представленной работе рассматриваются вопросы состояния высокоэнергетических методов обработки изделий, решаемые задачи и условия применения данных технологий в машиностроении. Особое внимание уделяется технологиям высокоэнергетической резки изделий, физическим принципам работы лазерной и плазменной обработки, оценке перспективности развития данных методов обработки.

## THE STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF HIGH-ENERGY METHODS OF PROCESSING PRODUCTS IN MECHANICAL ENGINEERING

*Kornienko R.D., Manichev D.S.*

*Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** high energy impact, processing of mechanical engineering products, laser and plasma technologies.

**Abstract.** The present study examines the issues of high-energy methods of processing products, the problems to be solved, and the conditions for the application of these technologies in mechanical engineering. Special attention is given to high-energy cutting technologies, the physical principles of laser and plasma processing, and the assessment of the prospects for the development of these processing methods.

На сегодняшний день наиболее перспективными методами, основанными на принципе локального высокоэнергетического воздействия, являются технологии лазерной и плазменной обработки. Использование данных видов обработки в машиностроении позволяет решать широкого класса задач. К ним можно отнести: очистку контактных поверхностей деталей от загрязнений; поверхностную активацию металлов и сплавов; нанесение защитных покрытий; формирование азотированного (упрочнённого) слоя; резку и раскрой материалов [1, 3].

Процесса очистки поверхности от загрязнений, окислов, жиров и других органических веществ, посредством высокоэнергетических методов обработки, эффективно применять в качестве предварительной подготовки изделия перед сваркой или пайкой. Процесс поверхностной активации металлов и сплавов применяется для повышения адгезии между материалами перед нанесением клеевого соединения. В свою очередь, высокотемпературное лазерное и плазменное напыление позволяет формировать различные защитные покрытия, в частности для изделий, изготовленных из металлов, керамики или композитных материалов. Для решения задач по повышению эксплуатационных свойств

изделия применяется технология азотирования, которая позволяет повысить твердость и износостойкость поверхности металла. Как можно заметить решение вышеперечисленных задач позволяет улучшить качество поверхности, химическую стойкость, повысить функциональность и продлить срок службы изделия [1].

Особое внимание в современном машиностроении уделяется лазерной и плазменной резке, поскольку от качества (точности) полученной поверхности раскроя зависит будущая надёжность и долговечность изделия. Физический принцип лазерной (рис. 1,а) и плазменной резки (рис. 1,б) представлен на рисунке 1 [2].

Принцип работы лазерных технологий заключается в следующем. Генерирование лазерного излучения осуществляется посредством лазерного источника. Сгенерированный лазерный луч направляется на оптическую систему, состоящую из фокусирующей линзы. Сфокусированный лазерный луч направляется на поверхность изделия и сосредоточивает большую энергию на локальной площади, в результате чего происходит нагрев и плавление металла. Параллельно с лазерным излучением к поверхности через сопло подается газовая струя, которая необходима для удаления расплава металла и образования реза по заданной траектории.

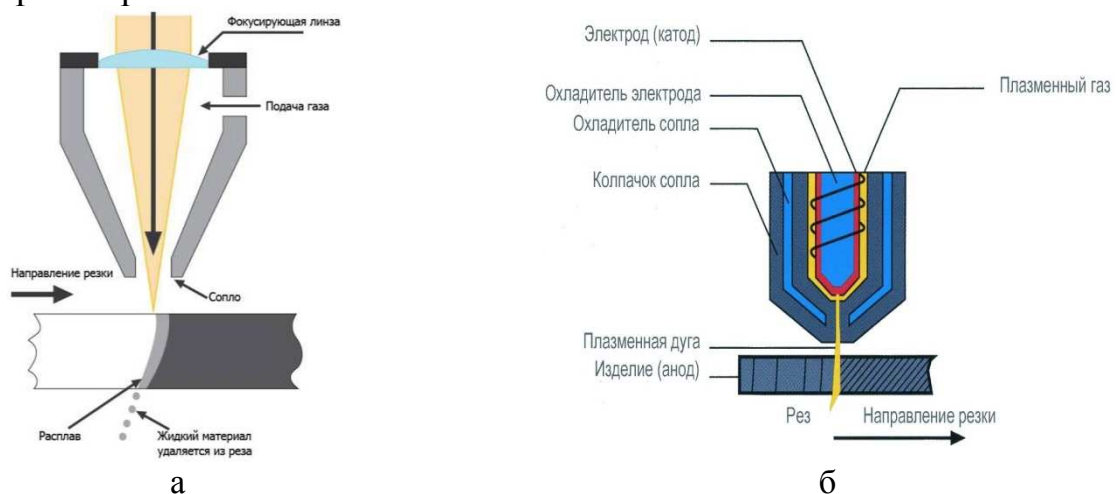


Рис. 1. Принципиальная схема лазерной (а) и плазменной (б) резки изделий

Обработка, основанная на лазерных технологиях, позволяет обеспечить высокую точность и скорость резки тонкостенных изделий, что положительно отражается на эффективности. За счёт высокой концентрации энергии, лазерное излучение может осуществлять операцию разделки различных марок материалов и позволяет изготавливать изделия сложной геометрической формы. Одним из главных преимуществ лазерной обработки является низкая деформация при резке, высокое качество поверхности раскроя, снижение отходов материала.

Вследствие того, что управление лазерной резкой (мощность лазера, скорость движения, подача газовой смеси) происходит посредством программного управления, то данную технологию можно автоматизировать и интегрировать в производственные линии. Это позволяет существенно повысить производительность и сократить время выполнения задач. По этой причине лазерная резка может стать эффективным инструментом для массового

производства и таких часто повторяемых операций, как формирование пазов, выемок и отверстий.

Наряду с лазерной обработкой, широкое распространение в машиностроении получили плазменные технологии, основанной принцип действия которых основан на генерации электрической дуги. Первоначальная генерация электрической дуги осуществляется высоковольтным импульсом или коротким замыканием между электродом (катод) и изделием (анод) в случае косвенной дуги, форсункой и разрезаемым металлом в случае прямой дуги. Затем в сопло под давлением подаётся газ, который превращает электрическую дугу в струю плазмы с температурой от 5000 до 30000°С и скоростью от 500 до 1500 м с<sup>-1</sup>. Параллельно с генерацией струи плазмы осуществляется активное охлаждающее воздействие на форсунку посредством использования воздуха или жидкости. В результате происходит высокоскоростной разогрев поверхности изделия, плавление и образования реза [3].

Как правило, плазменные технологии позволяют быстро и эффективно разделять изделия различных марок материалов толщиной до 200 мм. Высокоэнергетическая обработка струёй плазмы используется для изготовления различных деталей и компонентов, таких как фланцы, заготовки для сварки, элементы конструкций и прочее. Помимо этого плазменная резка используется в качестве технологии создания отверстий различных диаметров и форм в металлических листах и пластинах. Для получения сложных трёхмерных пространственных изделий применяется специализированное оборудование и технологии плазменной резки.

Применение автоматических и роботизированных систем при плазменной обработке позволит повысить эффективность, повторяемость и точность процесса раздела изделий. Это в свою очередь является важным фактором для расширения данной технологии в различных промышленных секторах машиностроения. Особенно актуальна плазменная обработка в крупномасштабной промышленности, включая автоматические линии.

В качестве выводов по работе стоит отметить, что развитие лазерной и плазменной обработки изделий является перспективной задачей, поскольку связано с постоянным технологическим развитием, расширением областей применения и использованием передовых методов автоматизации. Такой подход позволит повысить эффективность процессов, улучшить качество обработки и способствовать разработке новых перспективных инновационных изделий в области машиностроения.

#### **Список литературы**

1. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная техника и технология. Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 127 с.
2. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 406 с.
3. Мазеин П.Г., Ахметов М.Р., Сайфутдинов С.Р. Применение станков лазерной резки: учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 105 с.

#### Сведения об авторах:

*Корниенко Руслан Денисович* – студент;  
*Маничев Данил Сергеевич* – студент.

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*Каргапольцев С.К.<sup>1</sup>, Мозалевская А.К.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет;*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

**Ключевые слова:** термические остаточные напряжения, алюминиевые плиты, неразрушающее определение.

**Аннотация.** Оценка состояния заготовки из алюминиевых сплавов прямоугольного сечения осуществляется посредством определения зависимости, связывающей остаточные напряжения на поверхности с общей внутренней картиной при помощи эпюры распределения остаточных напряжений в продольном сечении. Рассматриваются возможности нахождения остаточных напряжений при помощи совместного использования неразрушающего определения и аналитических расчетов из соотношения условий равновесия сжимающих и растягивающих напряжений.

## FEATURES OF DETERMINING RESIDUAL STRESSES

*Kargapoltsev S.K.<sup>1</sup>, Mozalevskaya A.K.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Irkutsk National Research Technical University;*

<sup>2</sup>*Irkutsk State Transport University, Irkutsk*

**Keywords:** residual stresses, aluminum alloys, equilibrium condition, non-destructive testing.

**Abstract.** Assessment of the condition of a workpiece made of aluminum alloys of rectangular cross-section is carried out by determining the relationship connecting the residual stresses on the surface with the overall internal picture using a diagram of the distribution of residual stresses in the longitudinal section. The possibilities of finding residual stresses through the combined use of non-destructive determination and analytical calculations from the relationship between the equilibrium conditions of compressive and tensile stresses are considered.

### Введение

Современное машиностроение в условиях резкого изменения производственных и экономических связей более подвержено влиянию негативных факторов. К ним можно отнести износ основных производственных фондов, вследствие чего возникают неравномерности в работе машин и оборудования [1-3].

В некоторых случаях создаётся дефицит производственного сырья, в связи с чем машиностроительные производства должны обладать потенциалом для максимально бережного использования создаваемых изделий, что инициирует развитие подходов, основанных на неразрушающем определении дефектов полученных заготовок, в частности, оценки наличия остаточных напряжений [2-5].

Поэтому определение остаточных напряжений при производстве и изготовлении деталей машин и механизмов в настоящее время остается актуальной проблемой. Возникновение дефектов и деформаций, а также снижение качества изделий из металлических сплавов, в процессе технологических операций по их изготовлению, обусловлено проявлением

пластической деформацией металла и возникновением остаточных напряжений [6-8].

Остаточные напряжения в металлах возникают при различных температурных и механических воздействиях, для их определения применяются механические и неразрушающие методы. Методы контроля остаточных напряжений с разрушением образцов не всегда приемлемы. Применение методов без разрушения деталей более предпочтительно с точки зрения финансовых и временных затрат.

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений может быть использован как для исследования, так и для контроля технологического процесса. Однако одним из недостатков этого метода является то, что напряжения определяют только в поверхностном слое.

В предлагаемом докладе оцениваются возможности подхода по определению остаточных напряжений в алюминиевых заготовках прямоугольного сечения, возникающих после проведения закалочных технологических процедур.

### I. Общин положения. Постановка задачи исследования

На рисунке 1, приведена принципиальная схема распределения остаточных напряжений в исследуемом образце, где представлены области с отрицательными остаточными напряжениями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , области с положительным остаточным напряжением  $\sigma_3$ , ось симметрии, толщина образца обозначена через  $H$ .

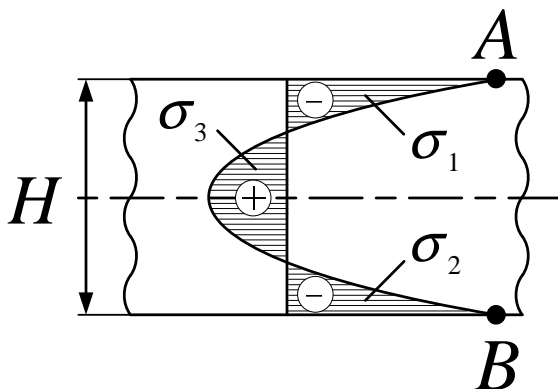


Рис. 1. Схема распределения остаточных напряжений

Ось симметрии с центральной осью исследуемого образца. Положительное напряжение  $\sigma_3$  и отрицательные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  компенсируют друг друга. Уравнение равенства в этом случае можно записать в виде

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3. \quad (1)$$

Наличие условия равновесия позволяет перейти к определению общих остаточных напряжений [3], распределённых по параболическому закону.

Решение задачи достигается тем, что образец исследуют при помощи известных методов неразрушающего определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов, например, при помощи рентгенографического метода.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять наличие остаточных напряжений с эпюрой сложной формы в образцах после прокатки без механических повреждений исследуемого образца.



## II. Определения остаточных напряжений в алюминиевых плитах

После определения двух точек ( $A$ ,  $B$ ), необходимых для построения параболы (рис. 1) и при условии симметричного расположения этих точек, схематичное расположение распределений площадей положительных и отрицательных напряжений с учетом дополнительных параметров можно представить в виде, приведенном на рисунке 2. На схеме представлены следующие обозначения:  $l$  – расстояние от точек до пересечения кривой с осью  $Oy$ ,  $h$  – расстояние от точек  $A$  и  $B$  до оси  $Ox$ ,  $c$  – вершина параболы,  $S_{\sigma_1}$ ,  $S_{\sigma_2}$ ,  $S_{\sigma_{33}}$ ,  $S_{\sigma_{34}}$  – площади распределения отрицательных и положительных напряжений. Площадь распределения положительных напряжений делится на две части для удобства формирования выражения для определения площади.

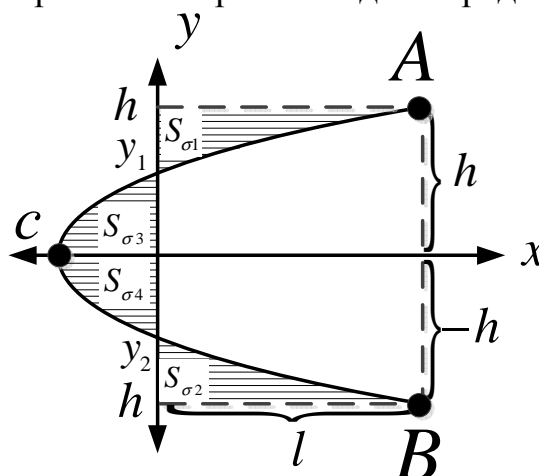


Рис. 2. Распределение сжимающих и растягивающих компонент остаточных напряжений

Сущность используемого подхода заключается в применении равновесия остаточных напряжений при аналитической оценке внутренних напряжений через определения расчетной схемы и построения эпюры напряжений с фактическими значениями остаточных напряжений определенных на поверхности детали рентгеновским методом [8].

Выражение равенства площадей в этом случае трансформируется следующим образом

$$S_{\sigma_1} + S_{\sigma_2} = S_{\sigma_{33}} + S_{\sigma_{34}}. \quad (2)$$

Уравнение параболы можно записать в виде

$$x = ay^2 - c. \quad (3)$$

В этом случае  $a > 0, c > 0$ . При  $y = 0, x = -c, y = h, x = l, c = ay^2 - x, x = 0 \Rightarrow ay^2 - c = 0, y_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{c}{a}}$ .

Из условия симметрии получим следующее выражение

$$S_{\sigma_2} = S_{\sigma_4}. \quad (4)$$

$S_{\sigma_2}$  примет вид

$$S_{\sigma 2} = \int_{y_2}^h (ay^2 - c)dy = a \frac{y^3}{3} \Big|_{y_2}^h - cy \Big|_{y_2}^h = \frac{a}{3} (h^3 - y_2^3) - c(h - y_2) = \frac{a}{3} h^3 - ch -$$

$$-\frac{a}{3} y_2^3 - cy_2 = \frac{a}{3} h^3 - ch - \frac{a}{3} \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{3}{2}} + c \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}} = h \left(\frac{a}{3} h^2 - c\right) + \frac{2}{3} c \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

В окончательном виде (5) преобразуется следующим образом

$$S_{\sigma 2} = h \left(\frac{a}{3} h^2 - c\right) + \frac{2}{3} c \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Для определения  $S_{\sigma 4}$  используем выражение следующего вида

$$S_{\sigma 4} = - \int_0^{y_2} (ay^2 - c)dy. \quad (7)$$

После преобразований получим

$$-S_{\sigma 4} = \left(\frac{a}{3} y^3 - cy\right) \Big|_0^{y_2} = \sqrt{\frac{c}{a}} \left(\frac{c}{3} - c\right) = -\frac{2}{3} \left(\sqrt{\frac{c^3}{a}}\right); \quad (8)$$

Итоговый результат обозначен выражением

$$S_{\sigma 2} = S_{\sigma 4} \Rightarrow h \left(\frac{a}{3} h^2 - c\right) + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c^3}{a}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c^3}{a}}$$

или

$$h \left(\frac{a}{3} h^2 - c\right) = 0. \quad (9)$$

Аналогично определяется  $S_{\sigma 1}$  и  $S_{\sigma 3}$ .

При помощи выражения (9) получим

$$c = \frac{h^2 a}{3}. \quad (10)$$

Исходя из этого, найдём

$$x = ay^2 - \frac{h^2 a}{3}. \quad (11)$$

При  $y = h$

$$x = a \left(h^2 - \frac{h^2}{3}\right) = \frac{2}{3} ah^2. \quad (12)$$

Так как  $y = h$ , то при  $x = l$

$$l = \frac{2}{3} ah^2; a = \frac{3}{2} \frac{l}{h^2}. \quad (13)$$

В случае, когда  $y = 0$ ,  $x = -c$ , после подстановки получим

$$c = \frac{h^2 a}{3} = \frac{l}{2}. \quad (14)$$

Таким образом

$$c = \frac{l}{2}. \quad (15)$$

Для построения кривой параболы при  $y = h$  необходимо наличие двух точек ( $A$  и  $B$ ). Выражение в этом случае будет иметь следующий вид

$$x = y^2, \quad (16)$$

где  $y$  – расстояние от рассматриваемой точки до оси симметрии.

Условие равенства площадей распределений остаточных напряжений и выражение (15) позволяют найти дополнительные соотношения для построения кривой

$$c = \frac{1}{3}y, l = \frac{3}{2}y, a = \frac{c+y}{x^2}. \quad (17)$$

В окончательном виде получим

$$c = \frac{1}{3}y, l = \frac{3}{2}y, a = \frac{c+y}{h^2}. \quad (18)$$

Наличие условия равновесия позволяет перейти к определению общих остаточных напряжений [7], распределённых по параболическому закону

$$\sigma = \sigma_n \left( \frac{6}{H^2} y_n^2 - \frac{6}{H} y_n + 1 \right), \quad (19)$$

где  $\sigma_n$  – остаточное напряжение на поверхности, МПа,  $H$  – толщина образца, мм,  $y_n$  – расстояние от рассматриваемой точки до поверхности пластины, мм.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять наличие остаточных напряжений с эпюрой сложной формы в образцах после прокатки без механических повреждений исследуемого образца.

### Заключение

Формирование методов определения общей картины напряжений при помощи неразрушающих подходов, к примеру, нахождения поверхностного напряжения рентгенографическим методом, с последующим построением эпюры остаточных напряжений, позволяет определять её геометрию по двум точкам. При соблюдении условия равновесия напряжений в заготовке внутренние остаточные напряжения можно оценить с помощью таких совместных подходов, совмещающих аналитический подход с использованием научно-исследовательского оборудования, при этом сохраняя целостность образца. Показана технология определения дополнительных геометрических параметров эпюры остаточных напряжений.

### Список литературы

1. Кашуба В.Б., Большаков Р.С., Мозалевская А.К., Нгуен Д.Х. Определение реакций связей между элементами виброзащитных систем на основе метода структурных преобразований // Механика XXI века. – 2016. – № 15. – С. 295-300.
2. Патент № 2689901 С2 РФ. Устройство управления вибрационным полем технологической машины / С.В. Елисеев, Р.С. Большаков, А.В. Елисеев, А.В. Николаев, А.К. Мозалевская, А.С. Миронов. – Заявка №2017140746 от 22.11.2017; опубл. 29.05.2019, Бюл. №15.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 233 с.

4. Каргапольцев С.К. Остаточные деформации при фрезеровании маложестких деталей с подкреплением / Научный редактор А.И. Промтов. – Иркутск: Иркутский Дом печати, 1999. – 136 с.
5. Патент №2494359 РФ. Способ определения остаточных закалочных напряжений / С.И. Ботвенко С.И. – Заявка №2012104571 от 10.02.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. №27.
6. Патент №2804605 РФ. Способ определения остаточных напряжений в прокате из алюминиевых сплавов / С.К. Каргапольцев, В.Е. Гобзенко, Р.С. Большаков. – Заявка №2023111553 от 04.05.2023; опубл. 02.10.2023, Бюл. №28.
7. А.с. №1643928 СССР. Способ определения остаточных закалочных остаточных напряжений / А.И. Промтов, Ю.И. Змащиков, С.И. Ботвенко, С.К. Каргапольцев. – Заявка №4634809 от 09.01.89; опубл. 23.04.91, Бюл. №15.
8. Каргапольцев С.К., Гобзенко В.Е., Большаков Р.С. Метод оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: Материалы XVI международной научно-практической конференции. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 86-91.

Сведения об авторах:

*Каргапольцев Сергей Константинович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств»;

*Мозалевская Анна Константиновна* – старший преподаватель.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ 3-ОСЕВОГО ФРЕЗЕРНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

*Сахаров А.В.*

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

**Ключевые слова:** технологическая идентификация, технологические возможности, обрабатывающий центр, формообразующие движения, модуль поверхностей, точность станка.

**Аннотация.** В статье показано, что в формулировках назначения и технических характеристиках 3-осевых фрезерных обрабатывающих центров имеется недостаток информации о технологических возможностях станков, под которыми понимается перечень изготавливаемых предметов производства с диапазонами размеров, точности и шероховатости поверхностей. Проблема неоднозначного понимания предмета производства на станке была решена путём выбора в качестве последнего модуля поверхностей детали.

## TECHNOLOGICAL IDENTIFICATION OF A 3-AXIS MILLING MACHINING CENTER

*Sakharov A.V.*

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

**Keywords:** technological identification, technological capabilities, machining center, shaping movements, module of surfaces, machine accuracy.

**Abstract.** The article shows that in the formulations of the purpose and technical characteristics of 3-axis milling machining centers there is a lack of information about the technological capabilities of machine tools, which means a list of manufactured items with ranges of sizes, accuracy and surface roughness. The problem of an ambiguous understanding of the subject of production on the machine was solved by choosing the surfaces of the part as the last module.

Под технологической идентификацией станка понимается определение его технологических возможностей – перечня изготавливаемых предметов производства с диапазонами размеров, точности и шероховатости поверхностей. Технологические возможности станка необходимо знать при проектировании технологических процессов изготовления деталей для выбора станков на технологические операции и для формирования производственной программы предприятия на определенный календарный период.

Изучение формулировок назначения и технических характеристик большого количества станков разных типов показало, что технологические возможности станков в них либо не отражены, либо представлены недостаточно полно. Проблема связана с тем, что понимать под предметом производства на станке. Поверхность, сочетание поверхностей или деталь из-за неограниченного разнообразия не могут выступать в качестве предмета производства на станке.

Для решения этой проблемы было предложено принять модуль поверхностей детали за предмет производства на станке. Модулем поверхностей (МП) называется сочетание поверхностей, объединенных совместным

выполнением определенной служебной функции детали [1]. В соответствии с классификацией МП имеет ограниченную номенклатуру, насчитывающую двадцать шесть видов МП, разделенных на три класса: базирующие, рабочие и связующие. При этом каждый МП имеет свой ряд типовых конструкций, а каждая конструкция – свою классификацию по размерам, точности и шероховатости.

Определение технологических возможностей станка по изготовлению МП ведется по методике, состоящей из шести этапов [2]. Исходными данными являются: реализуемые методы обработки, применяемый режущий инструмент и технические характеристики станка. С помощью этой информации последовательно выполняются следующие этапы:

- определение поверхностей, изготавливаемых на станке;
- определение видов МП по составу поверхностей, изготавливаемых на станке;
- определение соответствия положений поверхностей в конструкциях МП с их положениями в рабочем пространстве станка при изготовлении;
- определение допустимых положений конструкций МП в рабочем пространстве станка;
- определение диапазонов размеров МП, получаемых на станке;
- определение достижимой точности изготовления МП на станке.

С помощью представленной методики ранее были определены технологические возможности станков токарной и шлифовальной группы [3, 4].

В данной работе представлены результаты по технологической идентификации 3-осевого фрезерного обрабатывающего центра модели ФС130МФ3. Выбор этого станка обусловлен тем, что технологические возможности данных станков не описаны должным образом.

В соответствии с представленной методикой были проанализированы все изготавливаемые на станке ФС130МФ3 поверхности и установлен перечень из двадцати двух видов МП, в составе которых присутствуют эти поверхности: Б11, Б12, Б211, Б212, Б311, Б312, Б321, Б322, Б51, Б52, Р111, Р112, Р121, Р122, Р21, Р22, С111, С112, С121, С122, С21, С22.

После определения видов МП проверили соответствие положений поверхностей в конструкциях МП с положениями этих поверхностей в рабочем пространстве станка при изготовлении. Было установлено, что не все конструкции МП из приведенного перечня видов МП могут быть изготовлены на станке. Например, рассмотрим конструкцию МП Б311, состоящую из трёх поверхностей: плоской наружной и двух взаимно перпендикулярных цилиндрических внутренних (рис. 1).

При размещении этой конструкции МП в рабочем пространстве станка ФС130МФ3 плоской наружной поверхностью перпендикулярно оси вращения шпинделя станка ось первой цилиндрической внутренней поверхности МП Б311 совпадает с осью вращения шпинделя, а ось второй цилиндрической внутренней поверхности оказывается расположена перпендикулярно оси вращения шпинделя, что не позволяет изготовить её на станке. Поэтому в целом конструкция МП Б311 с таким расположением поверхностей не может быть изготовлена на рассматриваемом станке.

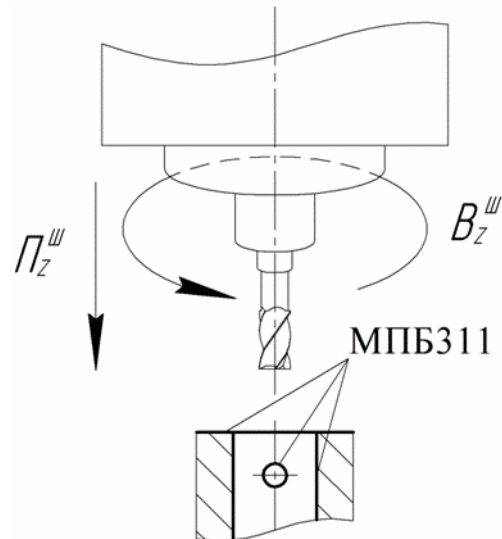


Рис. 1. Положение поверхностей МП Б311 в рабочем пространстве станка ФС130МФ3

Далее с помощью схемы рабочего пространства станка определялись диапазоны размеров МП. В качестве примера были определены диапазоны размеров МП Б321, состоящего из плоской наружной поверхности и двух соосных цилиндрических внутренних поверхностей, расположенных перпендикулярно плоской наружной поверхности.

На заключительном этапе была устанавливается достижимая точность изготовления МП на станке ФС130МФ3, которая зависит от геометрической точности станка, так как на чистовых режимах обработки действие других факторов незначительно.

#### Список литературы

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
2. Базров Б.М., Сахаров А.В. Определение технологических возможностей станочного парка предприятия // Станкоинструмент. – 2016. – № 2(3). – С. 29-34.
3. Базров Б.М., Сахаров А.В. Определение технологических возможностей станков токарной группы на модульном уровне // Станкоинструмент. – 2017. – № 1(6). – С. 44-48.
4. Сахаров А.В. Определение технологических возможностей универсальных станков шлифовальной группы // Станкоинструмент. – 2021. – № 4(25). – С. 32-37.

#### Сведения об авторе:

Сахаров Александр Владимирович – к.т.н., научный сотрудник.

## ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА МИКРОТВЕРДОСТИ НИТИНОЛА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

*Казимиров Д.Ю., Солер Я.И.*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск*

**Ключевые слова:** абразивный круг, фазовые превращения, обрабатываемость, качество поверхности.

**Аннотация.** В результате исследования повышена обрабатываемость нитинола за счет изменения микротвердости плоских поверхностей деталей благодаря фазовым превращениям при шлифовании абразивными кругами. С использованием дисперсионного и регрессионного анализов и компьютерной программы Stat-Ease Design-Expert получены модели и изучены поверхности отклика - микротвердости нитинола, учитывающие влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента.

## PREDICTION OF NITINOL MICROHARDNESS RESPONSE SURFACE IN GRINDING

*Kazimirov D.Y., Soler Y.I.*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk*

**Keywords:** abrasive wheel, phase transformations, machinability, surface quality.

**Abstract.** As a result of the study, the machinability of nitinol was increased. This is done by changing the microhardness of the flat surfaces of the parts. This is due to phase transformations during grinding with abrasive wheels. Models were obtained using variance and regression analysis and the Stat-Ease Design-Expert computer program. Response surfaces were studied that take into account the influence of grinding conditions and abrasive tool characteristics.

Сплавы на основе никель-титана (NiTi) обладают эффектом памяти формы, а также достаточным пределом прочности, высокой термической и коррозионной стойкостью и широко применяются во многих отраслях машиностроения (аэрокосмической, робототехнической, автомобильной и биомедицине) в качестве актуаторов.

Обрабатываемость таких сплавов затруднена из-за их высокой пластичности и химической активности, низких теплопроводности и модуля упругости. Высокая температура при шлифовании в сочетании с напряжениями в зоне резания могут повлиять на микротвердость и фазовый состав NiTi [1,2,3], что свойственно ему в мартенситной фазе. Так же при шлифовании без эффективного охлаждения снижается точность формы поверхности [4]. В то же время при шлифовании NiTi в аустенитном состоянии отсутствуют указанные проблемы и повышается эффективность процесса. Целесообразно для улучшения обрабатываемости при шлифовании увеличивать поверхностную микротвердость никелида титана, в частности за счет роста доли аустенита.

Обработку вели на шлифовальном станке мод. 3Г71М кругами формы 1: 63CF60 K6 V – I = 1, Norton 37C60 K12 VP – i = 2, Molemab 08C046 I12 V01P2 – i = 3. Условия обработки следующие: скорость круга 35 м/с, глубина резания



$t=0,01$  мм, припуск  $z=0,18$  мм, количество выхаживаний – 1, СОЖ – 5% раствор "Аквол-6" с расходом 8-10 л/мин. Образцы  $D \times H = 40 \times 35$  мм из сплава ТН-1 с исходной микротвердостью 290 HV. Обработка велась по торцу заготовок многопроходным шлифованием. Микротвердость поверхности определялась по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 на ПМТ-3 при нагрузке 200 г.

Был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^2$  с центральной точкой для каждого инструмента. Факторы и их уровни приведены в таблице 1.

Табл. 1. Условия проведения ПФЭ типа  $2^2$

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		-1,00	0,00	+1,00
$A$ – продольная подача $V$ , м/мин	2	4	6	8
$B$ – поперечная подача $S_{п}$ , мм/дв.ход	2	2	4	6

Для поиска моделей дисперсионного анализа (ДА) использовалась программа *Stat-Ease Design-Expert 11 Demo*. Для ПФЭ  $2^2$  модели представлены полиномами первого порядка. С целью повышения точности прогноза проведен Парето-анализ, представленный на рисунке 1, для кругов  $i = 1$  и 3 на котором указано критическое значение критерия Стьюдента.

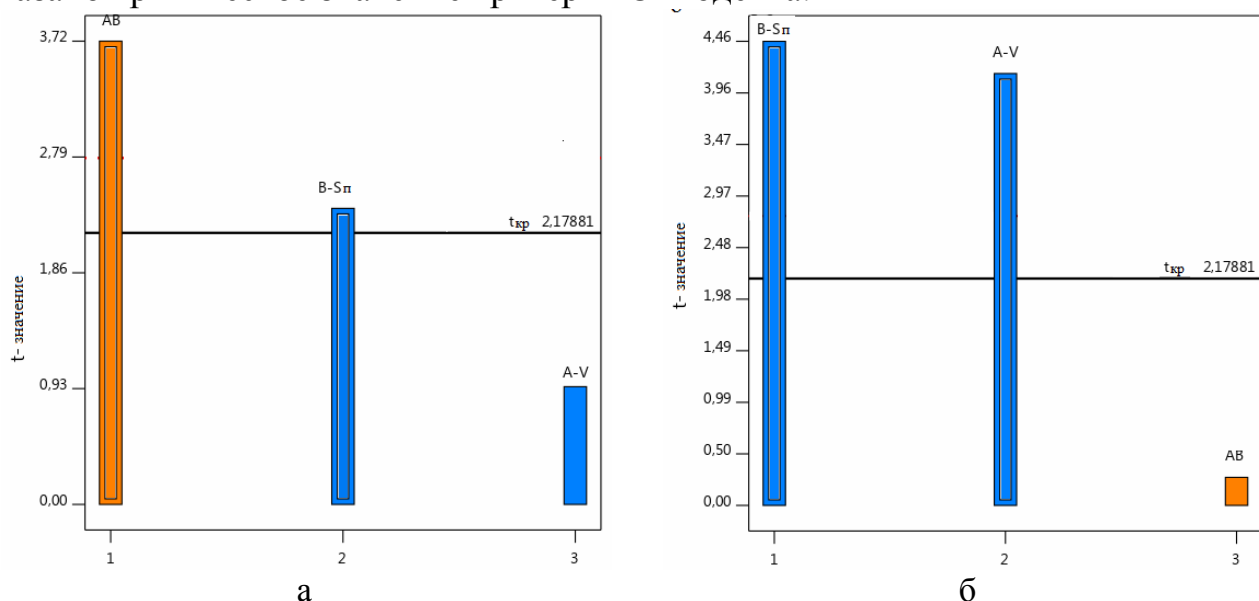


Рис. 1. Парето-анализ эффектов микротвердости при шлифовании кругами:  
а – 63CF60 K6V, б – 08C046 I12 V01P2

Основные эффекты проверены на 5%-ном уровне значимости по  $F$  – критерию на включение в регрессионную модель. Эти эффекты, результаты дисперсионного и регрессионного анализов представлены в таблице 1.

Затем использовалась регрессионная процедура с традиционным методом наименьших квадратов. На 5%-ном уровне значимости рассчитаны модели, коэффициенты уравнения регрессии и детерминации. Представленные модели микротвердости поверхности при шлифовании никелида титана соответствуют точности и адекватности.

Табл. 1. Результаты ДА и регрессии для микротвердости  $HV$  нитинола при шлифовании абразивными кругами

Параметры	Характеристика абразивного инструмента		
	63CF60 K6 V	37C60K12VP	08C046I12V01P2
	Расчетный уровень $p$ (значимый при $p < 0,05$ ) для ДА		
$A: V$	0,3882	0,001	0,0012
$B: S_{\text{п}}$	0,0418	0,1724	0,0007
$AB$	0,0039	0,061	0,7983
	Регрессионный анализ		
$R^2$	0,5318	0,5979	0,7206
Предсказанный $R^2$	0,3482	0,4580	0,61
Регрессионное уравнение	$HV=337,08-8,908 \cdot B+13,942 \cdot AB$	$HV=335,44-14,58 \cdot A-7,00 \cdot AB$	$HV=341,79-15,27 \cdot A-16,41 \cdot B$

Приведенные результаты по планам ПФЭ  $2^2$  для исследуемых характеристик абразивного инструмента при варьировании режимов шлифования позволили сформулировать выводы. Благодаря сравнительно сильному влиянию высокой пористости при увеличенной зернистости на микротвердость только для характеристики круга  $i = 3$  в модель вошли оба непосредственно воздействующих факторов  $A$  и  $B$  (табл. 1). Как следствие, значимость основных факторов оказалась наибольшей по сравнению с другими моделями ДА. Для характеристик кругов  $i - 1$  и  $2$  их влияние смешано с взаимодействием  $AB$ . При этом для круга  $i = 2$  взаимодействие предсказано на грани допустимого  $p = 0,06 > 0,05$ . В результате для круга 08C046I12V01P2 получено более точное уравнение, о чем свидетельствует  $R^2 = 0,72$ , тогда как для остальных характеристик инструментов  $i = 1, 2$  они составили 0,53 и 0,6 соответственно. Для всех полученных регрессионных моделей разница при сопоставлении коэффициентов детерминации меньше 0,2 подтверждает преобладание адекватного отклика над случайным шумом. Регрессионные модели приведены в нормированном виде, позволяя оценить вклад каждого члена уравнения в контролируемую изменчивость поверхностной микротвердости. Отметим во всех моделях наличие отрицательного знака при коэффициентах основных эффектов. Сказанное подтверждается теплофизикой процесса шлифования: при увеличении подачи время воздействия теплового источника в зоне контакта абразивный круг - деталь на поверхность уменьшается. Так как именно повышение микротвердости способствует улучшению абразивной обработки нитинола, то в первую очередь необходимо снизить подачи при шлифовании, а также использовать повышенную зернистость F46, о чем свидетельствует наибольший свободный коэффициент для  $i = 3$ , равный 341,79 HV.

Для анализа полученных закономерностей построены поверхности откликов (рис. 2 а,б). Наличие информации о поверхностях откликов позволяет среди возможных комбинаций технологических параметров отыскать такие, которые соответствуют целевым показателям процесса шлифования.

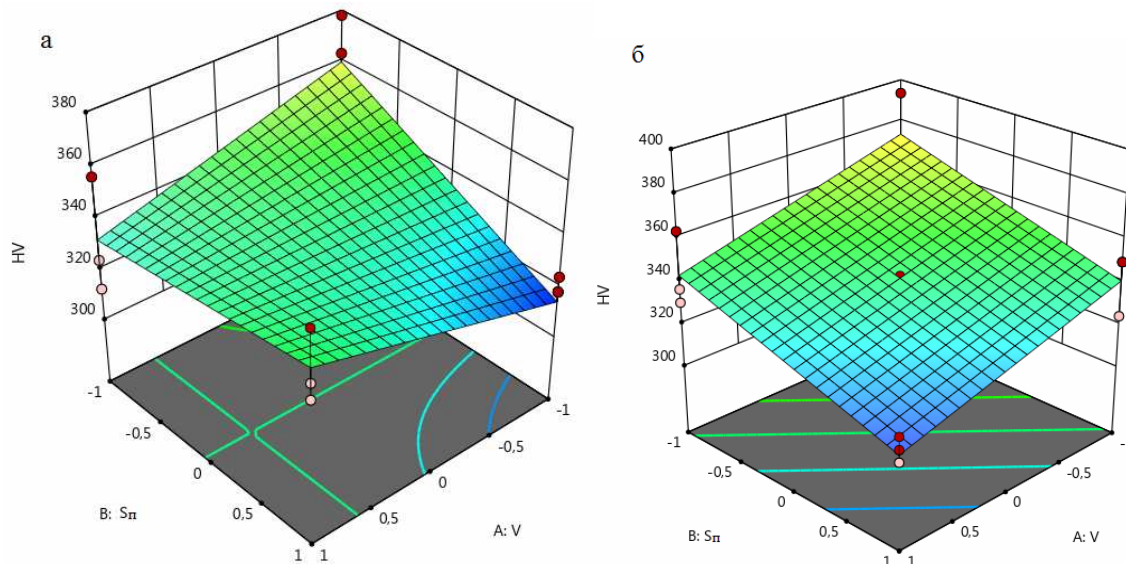


Рис. 2. Влияние продольной и поперечной подач на поверхностную микротвердость  $HV$  нитинола при шлифовании кругами: а – 63CF60 K6V, б – 08C046 I12 V01P2

Рисунок 2 иллюстрирует поверхности откликов для  $HV$ , предсказанные регрессионными моделями. Отметим, что на рисунке 2,а поверхность отклика недостаточно точна. Все экспериментальные наблюдения в центре плана расположены ниже прогнозируемой поверхности, что косвенно свидетельствует о возможно более сложной степенной закономерности. Для рисунка 2,б предсказанная поверхность отклика оказалась более адекватной, что связано с отсутствием парного взаимодействия  $AB$ . Как видно из рисунка 2,а, наибольшее значение микротвердости, равное 360  $HV$ , отмечается на самом непроизводительном режиме шлифования:  $A = B = -1,00$ , при котором гарантируется фазовое превращение и переход мартенсита в аустенит с большей микротвердостью. Для указанной точки плана при шлифовании кругом  $i = 3$  микротвердость поверхности возросла до 370  $HV$  (рис. 2,б). В то же время для повышения производительности процесса можно незначительно увеличить продольную подачу  $V$  до  $A = -0,5$ , т.к. при этом отмечается снижение прогнозируемой  $HV$  на 5...8  $H/mm^2$ . Скомпенсировать такое снижение можно увеличением размеров зерен круга, что подтверждает рисунок 2,б. Уменьшать  $S_{\pi}$  не рекомендуется, т.к. снижение микротвердости становится недопустимым. Различие точек глобального минимума обусловлено дополнительным значимым парным эффектом в регрессионной модели (рис. 2, а).

Таким образом, подтверждена возможность улучшения обрабатываемости шлифованием никелида титана в мартенситном состоянии за счет благоприятного воздействия теплоты в зоне резания при абразивной обработке и повышения микротвердости.

### Список литературы

1. Oliveira T.S., Procópio L.S., Martins P.H.A., et al. Characterization of mechanical properties of an alloy with shape memory – nitinol // COBEM 2015 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. – Rio de Janeiro, 2015.
2. Soler Y.I., Kazimirov D.Yu. Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1218-1233.

3. Kaya E., Kaya I. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 100, pp. 2045-2087.
4. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Метляев И.А. Повышение эффективности шлифования деталей из материалов с эффектом памяти формы // Вестник современных технологий. – 2019. – №1(13). – С.12-18.

Сведения об авторах:

*Казимиров Денис Юрьевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ТОМП;

*Солер Яков Иосифович* – к.т.н., доцент, профессор кафедры ТОМП.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРТОВЫХ КРАНОВ ПРИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

*Пахомова Л.В., Белякова А.Е., Евсюков А.В., Савченко С.Д., Асташов М.А.  
Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск*

**Ключевые слова:** ветровые нагрузки, анемометр, ветровые зоны, повышение эффективности работы кранов.

**Аннотация.** Портальные краны весьма широко применяются для перегрузки различных грузов на водном транспорте, в промышленности. При работе портового крана возникают разные проблемы, одна из них ветровые нагрузки. В данной статье описаны методы повышения эффективности использования портовых кранов при воздействии ветровых нагрузок. В статье рассматриваются направленные на улучшение устойчивости портовых кранов и снижение риска аварийных ситуаций в условиях сильных ветров.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE USE OF PORT CRANES UNDER WIND LOADS

*Pahomova L.V., Belyakova A.E., Evsyukov A.V., Savchenko S.D., Astashov M.A.  
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk*

**Keywords:** wind loads, anemometer, wind zones, improving the efficiency of cranes.

**Abstract.** Gantry cranes are very widely used for transshipment of various cargoes on water transport, in industry. When a port crane is operating, various problems arise, one of them is wind loads. This article describes methods to improve the efficiency of using port cranes under the influence of wind loads. The article discusses the efforts aimed at improving the stability of port cranes and reducing the risk of accidents in strong winds.

### Введение

Ветер значительно влияет на работу и безопасность, как самого крана, так и оператора. Поэтому, повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках является одним из главных задач для порта. Многие десятилетия запрещалось использовать портовые краны для перегрузочных работ при скоростях ветра 15 м/с и более. Длительный простой кранов приводил к огромным убыткам предприятий. Проблема успешно решается путем внедрения системы методов повышения эффективности использования портовых кранов при различных ветровых нагрузках.

### Общие сведения

Портовые краны – это специальные подъемные машины, используемые для перемещения грузов в портах. Они обычно устанавливаются на причалах и используются для погрузки и разгрузки контейнеров, сырья, грузов и других товаров с судов на сушу и наоборот. Портовые краны могут иметь различные конструкции и могут быть автоматизированными или управляемыми операторами. Они играют важную роль в обеспечении эффективной работы портовых комплексов и обеспечивают быструю и безопасную обработку грузов.

Портовые краны могут испытывать различные ветровые нагрузки из-за следующих причин: ветер большой силы, направление ветра, ветровые вихри, ветровые удары, габаритные размеры груза.

Все эти факторы могут вызывать проблемы для портовых кранов при ветровых нагрузках, поэтому необходимо принимать соответствующие меры предосторожности и использовать специальные технические решения для минимизации воздействия ветра на краны для повышения эффективности работы.

### **Методы повышения эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках**

Предлагаются следующие методы использования портовых кранов для повышения эффективности их использования [1]:

– использование порталных кранов при скорости ветра свыше 15 м/с, но в пределах паспортных значений ветровых нагрузок с ограничениями, накладываемыми на технологические схемы перегрузочных работ и парусность грузов;

– использование порталных кранов при ветровых нагрузках свыше паспортных значений с ограничениями, накладываемыми на технологические схемы перегрузочных работ, геометрические параметры циклов работы кранов и парусность грузов.

### **Эксплуатация крановых анемометров**

Использование порталных кранов в пределах паспортных данных требуемых по ГОСТу 12.3.009 допускается при скорости ветра, не превышающей значения, указанного в паспорте машины.

Использование кранов типа Альбрехт, Альбатрос, Сокол, Кондор, Ганц и Форель может производиться при скорости ветра до 18 м/с, а кранов типа Кировец, Сумитомо и Коне – при скорости ветра до 20 м/с. Однако, предельная скорость ветра для рабочего крана при их эксплуатации на максимальном вылете  $r = 30$  м и углах поворота  $\varphi = 90^\circ$  не превышает 12-15 м/с. При этом запрещается перегружать длинномерные, крупногабаритные, тяжеловесные и опасные грузы, а также легкоповреждаемые, пылевидные и все виды насыпных химических грузов (без тары) и другие грузы, определяемые приказом начальника морского порта [2].

Эксплуатационные зоны ограничиваются вылетами стрелы и углами поворота кранов при направлении ветра. Схема эксплуатационных зон кранов ориентируется так, чтобы ось  $x$  совпадала с направлением ветра. В этом случае она даст информацию о допустимых параметрах работы кранов при соответствующей ветровой нагрузке.

Для повышения эффективности методов эксплуатации портовых кранов при ветровых нагрузках необходимо оснащать диспетчерские и краны надежно работающими ветроизмерительными приборами – анемометрами [3].

Анемометры могут помочь определить оптимальную скорость ветра, при которой портовой кран может работать наиболее эффективно и безопасно. Если скорость ветра превышает допустимый предел, кран может остановиться или работать с низкой производительностью, что приведет к задержкам в работе порта.

Анемометры также могут измерять направление ветра, что позволяет крану оптимизировать свою позицию и уменьшить сопротивление ветра. Это может улучшить скорость и точность перемещения груза.

Некоторые анемометры могут предупреждать о сильных порывах ветра, что помогает крану подготовиться и предотвратить возможные аварии или повреждения груза.

Анемометры также могут использоваться для мониторинга других погодных условий, таких как температура и влажность, которые могут повлиять на работу портового крана.

### **Заключение**

Одна из важных задач для портовых предприятий – повышение эффективности использования грузоподъемной техники. Существенно выделяются два метода повышения эффективности:

– осуществление перегрузки при скорости ветра свыше 15 м/с, но в пределах значений ветровых нагрузок, указанных в паспорте, с учетом технологической схемы перегрузки и парусности перегружаемых грузов;

– либо осуществление перегрузки при ветровых нагрузках выше паспортных значений с учетом тех же ограничений.

Все это может помочь улучшить безопасность и эффективность работы портовых кранов в условиях ветра.

### **Список литературы**

1. Подобед В.А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках: Эксплуатация водного транспорта, судовождение. – Москва: [б. и.], 2007. – 357 с.
2. Подобед В.А., Подобед Н.Е. Предупреждение риска при эксплуатации кранов при ветровых нагрузках в морских портах // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9, №3. – С. 531-533.
3. Подобед В.А. Работа подъемных кранов при сильном ветре // Безопасность труда в промышленности. – 1977. – № 3. – С. 37-39.

### Сведения об авторах:

*Пахомова Людмила Владимировна* – к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «СМ и ПТМ»;

*Белякова Анастасия Евгеньевна* – студентка;

*Евсюков Андрей Васильевич* – студент;

*Савченко Семен Дмитриевич* – магистрант;

*Асташов Матвей Александрович* – магистрант.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ НАСОСА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ

*Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск*

**Ключевые слова:** насос, срок службы, масло, бак, надежность, режим работы.

**Аннотация.** Инженерам было проведено обследование насоса поглотительного масла с цистерн для определения его фактического состояния и оценки дальнейшей эксплуатации. Насос расположен на металлургическом заводе ПАО «ММК». Назначение объекта – предназначен для перекачивания поглотительного масла с цистерн в резервный бак.

## OPERATION STUDY AND TECHNICAL INSPECTION OF A PUMP AT A STEEL PLANT

*Kulikov S.S., Kharlov D.A., Yudin D.V.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk*

**Keywords:** pump, service life, oil, tank, reliability, operating mode.

**Abstract.** Engineers conducted an inspection of the absorption oil pump from the tanks to determine its actual condition and evaluate its further operation. The pump is located at the metallurgical plant of PJSC MMK. Purpose of the object – designed for pumping absorption oil from tanks to a reserve tank.

Насос предназначен для перекачивания химически активных и нейтральных жидкостей плотностью не более  $1850 \text{ кг/м}^3$ , кинематической вязкостью  $36 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , имеющих твердые включения диаметром не более 0,5 мм.

Привод насоса осуществляется через соединительную упругую муфту. Направление вращения ротора по часовой стрелке, если смотреть со стороны электродвигателя. Для обеспечения разборки насоса без отсоединения всасывающего и напорного трубопроводов и без нарушения центровки насоса с двигателем соединительная муфта выполнена с монтажным проставком [1].

Насос – центробежный, горизонтальный, консольный, одноступенчатый с открытым рабочим колесом. Корпус насоса имеет лапы, которыми крепится к фундаментной плите. Корпус подшипников консольно крепится к корпусу насоса и имеет, кроме этого, вспомогательную опору со стороны муфты. Ротор насоса вращается в подшипниковых опорах. Осевая нагрузка на ротор воспринимается подшипниками. Упругая муфта выполнена с монтажным проставком, что позволяет производить демонтаж опорного кронштейна с рабочим колесом и узлом уплотнения вала без отсоединения всасывающего и напорного трубопроводов.

Уплотнение вала насоса имеет следующие исполнения: мягкий сальник или торцовое уплотнение типа 133/133. Торцовое уплотнение рекомендуется применять в случаях, когда мягкий сальник не обеспечивает необходимую герметизацию перекачиваемой жидкости или обслуживание насоса ограничено.



Рекомендуемый расход затворной жидкости при эксплуатации должен быть таким, чтобы ее температура на выходе не превышала 60°C. Работа уплотнения без затворной жидкости не допускается. Уплотнения устанавливаются на защитные втулки, предохраняющие вал от истирания [2].

Схема насоса представлена на схеме 1.

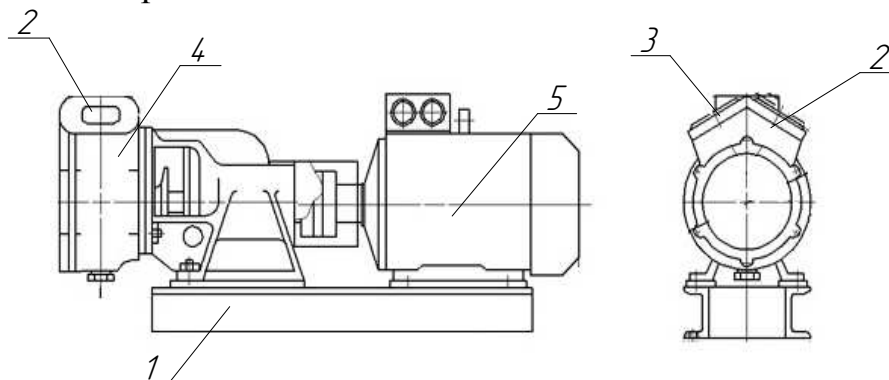


Рис. 1. Общий вид насоса: 1 – основание насоса; 2 – фланец соединения к всасывающей линии трубопровода; 3 – фланец соединения к напорной линии трубопровода; 4 – корпус насоса; 5 – электродвигатель

Для оценки фактического состояния был проведен неразрушающий контроль, а именно следующее.

#### **Визуальный и измерительный контроль**

Визуальный и измерительный контроль наружной поверхности (объем контроля – 100% контролируемой поверхности в доступных местах) проводится с целью выявления дефектов и повреждений, образовавшихся в процессе изготовления, транспортировки, ремонтов и эксплуатации.

При визуальном осмотре проверке подлежит:

- насос;
- муфта;
- защитные кожухи;
- механическое оборудование;
- опорная рама;
- электрическая часть.

Визуальный и измерительный контроль проводится согласно РД 03.606-03, ГОСТ Р 58399-2019, ПТЭЭП, ПУЭ.

#### **Вибродиагностический контроль**

Вибродиагностический контроль состояния механического оборудования технического устройства проводится на подшипниках электродвигателя, опорного кронштейна и насоса. Вибродиагностический контроль проводится согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97.

#### **Испытания и проверка электродвигателя**

Согласно требованиям РД 34.45-51.300-97 необходимо провести:

- измерение сопротивления изоляции;
- проверку наличия цепи между заземлителями и заземляемыми элементами, между заземленными установками и элементами заземленной установки.

Так же проведена работа по определению действующих повреждающих факторов, механизмов повреждения и восприимчивости материала технического устройства к механизмам повреждения [3].

Технологическое оборудование в большинстве случаев, подвержено одному или нескольким механизмам повреждения:

- общей поверхностной коррозии;
- циклическому режиму силового нагружения;
- циклическому растрескиванию;
- механическому воздействию на элементы технического устройства, эрозионного износа, кавитационного износа.

Проведены расчетные и аналитические процедуры оценки и прогнозирования технического состояния технического устройства

Расчет производился на основе: Методики диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса центробежных компрессоров и насосов М2-96 [4].

По результатам диагностирования технического состояния насоса рассчитаны ресурсы его узлов и деталей, ч:

Корпус насоса – 27 000 (трещин не обнаружено, выявлено уменьшение толщины стенок до 10%).

Вал (шпиндель) насоса – 40 000 (трещин не обнаружено, выработки посадочных мест под подшипники и муфту не обнаружены).

Рабочие колеса – трещин, отслоений, оплавлений, язв не обнаружено.

Подшипники качения и подшипники скольжения – сколов, отслоений, оплавлений, трещин, язв на деталях не обнаружено.

Возможный безопасный срок службы насоса определен по минимальному ресурсу его базовых составных частей. В данном случае это корпус насоса (27 000 ч).

**Вывод.** В соответствии с нормативными значениями пробега насоса между плановыми ремонтами возможный остаточный ресурс принимается сроком на 5,0 лет, но не более 27 000 часов.

#### **Список литературы**

1. Андросенко М.В., Филатова О.А. Проектирование технологического оборудования с применением САПР. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – 98 с.
2. Куликова Е.В., Андросенко М.В. Техническая механика и детали машин. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 46 с.
3. Андросенко М.В., Филатова О.А. Основы управления металлургическими машинами и оборудованием: Учебное пособие. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016. – 112 с.

#### Сведения об авторах:

*Куликов Семен Сергеевич* – студент;

*Харлов Дмитрий Анатольевич* – магистрант;

*Юдин Данил Владиславович* – студент.

## МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ

*Андросенко М.В., Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск*

**Ключевые слова:** печь, металлургия, балки, надежность, режим работы.

**Аннотация.** Инженерам было проведено обследование нагревательной печи с шагающими балками для определения его фактического состояния и оценки дальнейшей эксплуатации. Печь расположена на металлургическом заводе. Нагревательные печи с шагающими балками предназначены для нагрева слабов из углеродистых и низколегированных марок сталей перед их дальнейшей прокаткой, так как они работают при высоких температурах, необходимо регулярно проводить техническое диагностирование их элементов.

## METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSIS OF A HEATING FURNACE WITH WALKING BEAMS AT A METALLURGICAL PLANT

*Androsenko M.V., Kulikov S.S., Kharlov D.A., Yudin D.V.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk*

**Keywords:** furnace, metallurgy, beams, reliability, operating mode.

**Abstract.** Engineers inspected the walking beam heating furnace to determine its actual condition and evaluate its future operation. The furnace is located in a metallurgical plant. Heating furnaces with walking beams are designed for heating slabs made of carbon and low-alloy steels before further rolling. Since they operate at high temperatures, it is necessary to regularly carry out technical diagnostics of their elements.

Для перемещения нагреваемого металла по зонам печи предусмотрены половые шагающие балки. Стойки стационарных балок закреплены на каркасе печи, стойки подвижных балок – на верхней подвижной раме. Привод механизмов подъема и перемещения балок – гидравлический.

Для предотвращения непосредственного опирания слабов на охлаждаемые трубки балок, предусмотрены рейтеры [1].

На торцах печи на сторонах посада и выдачи установлены механизмы подъема заслонок. Заслонки подвешиваются, на цепях через блоки. Вес заслонок уравнивается контргрузами. На каждом торце печи установлено по две заслонки с индивидуальными приводами. Для периодической уборки бункеров гидравлических затворов шагающих балок установлено три контейнера с погружными скребками типа КПС-500Т. Затворы оборудованы крышками.

На печи применены три типа горелок [2]:

– радиационные – ГР-750-П и ГР-350-П (верхние зоны) – с принудительной подачей газа и воздуха без предварительного смешивания, с закручено-разомкнутыми характером и средней скоростью истечения, с регулируемой длиной факела;

– «труба в трубе» – ДВБ РФ (нижние зоны) – с принудительной подачей газа и воздуха без предварительного смешивания, с прямоточным характером и

средней скоростью истечения, с регулируемой длиной факела;

– «труба в трубе» – короткофакельные ДВБ КФ-200/22 (торец выдачи) – аналогичны ДВБ РФ.

Для подачи воздуха предусмотрена общая для печей вентиляция с системой воздухопроводов. В вентиляции установлено 7 вентиляторов ВВН-20 электрическими приводами (6 в работе, 1 в резерве). Всас каждого вентилятора – индивидуальный. От вентиляции к печи подведено 4 воздухопровода диаметром 1420 мм, по 2 на каждую сторону печи.

Для нагрева воздуха до температуры плюс 430-450°С используются два секционных петлевых рекуператора с поверхностью нагрева 3000 м<sup>2</sup>, с проходным сечением по дыму 49 м<sup>2</sup> и воздуху 5,33 м<sup>2</sup>. В каждом рекуператоре установлено по 6 петлевых секций из 130 трубок. Для защиты от перегрева сборных коллекторов рекуператоров (диаметром 4020 мм) предусмотрена система сброса части нагретого воздуха в дымоходы [3].

На печи установлено два вида охлаждения:

- испарительное (охлаждение стационарных и подвижных балок пода);
- водяное (элементы печи).

Общий расход технической воды на водоохлаждаемые элементы печи составляет 246 м<sup>3</sup>/ч. Периодический расход воды для удаления окалины – 250 м<sup>3</sup>/ч, для заполнения одной ванны водяного затвора – 0,25 м<sup>3</sup>/ч. Расход при ежемесячной промывки ванны затвора – 150 м<sup>3</sup>/ч.

Фундамент печи выполнен в виде монолитной железобетонной плиты из бетона марки М150. Отметка верха плиты минус 9,4 м. Диаметр применяемой арматуры 8, 10, 24, 40 мм.

Для управления технологическим процессом участка нагревательных печей предусмотрена двухуровневая система контроля и управления тепловым режимом. Первый уровень включает управление одной нагревательной печью, второй уровень связывает управление всех печей нагревательного участка с АСУ ТП.

Год изготовления – 1995. В состав печи входят:

- печь с футеровкой и каркасом на фундаментах;
- система транспортирования металла;
- механическое оборудование печи;
- система газопроводов с горелками;
- система воздухопроводов с вентиляторами;
- система удаления продуктов сгорания;
- система автоматического регулирования теплового режима печи.

Для оценки фактического состояния был проведен неразрушающий контроль, а именно следующее.

#### **Визуальный и измерительный контроль**

При визуальном контроле обязательной проверке подлежат:

- несущие металлоконструкции и кожух печи;
- система воздухопроводов с вентиляторами;
- механизм передвижения балок;
- футеровка печи;
- средства сигнализации и автоматики.

### **Измерение механических характеристик стали**

Определение механических характеристик стали элементов печи выполняется методом замера твёрдости металла [4].

### **Нивелирования металлоконструкций каркаса печи**

Для получения информации о состоянии металлоконструкций каркаса печи с целью выявления отклонений формы от проектных требований и норм, проведена нивелировка металлоконструкций каркаса печи. Нивелировка металлоконструкций каркаса печи выполнена при помощи тахеометра.

### **Тепловой контроль**

Тепловой контроль печи проводится для определения состояния футеровки печи.

Тепловой контроль печи не проводится в случае, если при натурном обследовании имеется возможность определить состояние футеровки печи.

Так же проведена работа по определению действующих повреждающих факторов, механизмов повреждения и восприимчивости материала технического устройства к механизмам повреждения

Технологическое оборудование, работающее на металлургическом предприятии под большими температурами, в большинстве случаев, подвержено одному или нескольким механизмам повреждения:

- общей поверхностной коррозии;
- коррозионному растрескиванию;
- термосиловому воздействию;
- изменению механических свойств металла.

Благодаря выбору данных методов неразрушающего контроля удалось выявить дефекты, влияющие на безопасную эксплуатацию печи.

Для дальнейшей безопасной эксплуатации данные дефекты необходимо устранить.

### **Список литературы**

1. Синицкий В.М., Пасечник Н.В., Дрозд В.Г. и др. Машины и агрегаты металлургического производства Т. IV-5. – М.: Машиностроение-1, 2000 – 912 с.
2. Андросенко М.В., Филатова О.А. Проектирование технологического оборудования с применением САПР. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020 – 98 с.
3. Куликова Е.В., Андросенко М.В. Техническая механика и детали машин. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 46 с.
4. Андросенко М.В., Филатова О.А. Основы управления металлургическими машинами и оборудованием: Учебное пособие – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016 – 112 с.

### Сведения об авторах:

*Андросенко Мария Владимировна* – к.т.н., доцент кафедры Проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования;

*Куликов Семен Сергеевич* – студент;

*Харлов Дмитрий Анатольевич* – магистрант;

*Юдин Данил Владиславович* – студент.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ КОНВЕЙЕРА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

*Андросенко М.В., Куликов С.С., Харлов Д.А., Юдин Д.В.*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск*

**Ключевые слова:** конвейер, срок службы, аглошихта, ленточный, надежность, режим работы.

**Аннотация.** Конвейер предназначен для транспортировки аглошихты с вагоноопрокидывателей для дальнейшей переработки. Было проведено обследование конвейера ленточного катучего для определения его фактического состояния и оценки дальнейшей эксплуатации. Конвейер расположен на металлургическом заводе ПАО «ГМК Норильский Никель».

## OPERATION STUDY AND TECHNICAL INSPECTION OF CONVEYOR IN LOW TEMPERATURE CONDITIONS

*Androsenko M.V., Kulikov S.S., Kharlov D.A., Yudin D.V.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk*

**Keywords:** conveyor, service life, sinter charge, belt, reliability, operating mode.

**Abstract.** The conveyor is designed to transport sinter charge from car dumpers for further processing. An inspection of the reel belt conveyor was carried out to determine its actual condition and evaluate its further operation. The conveyor is located at the metallurgical plant of PJSC MMC Norilsk Nickel.

Конвейер состоит из основных узлов [1]: став конвейера; приводной и натяжной барабаны; натяжное устройство; роlikоопоры; электрооборудование; лента конвейера; приводной механизм; защитные кожухи; передвижная система (колеса, рельсы, тормоза). Схема конвейера представлена на рисунке 1.

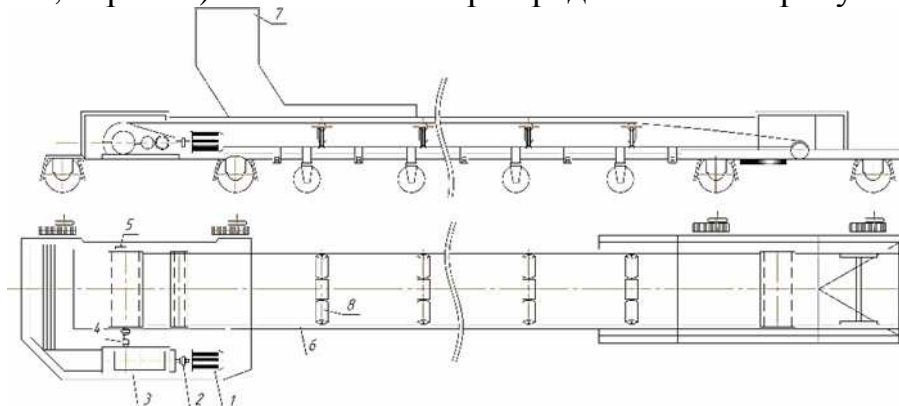


Рис. 1. Общий вид конвейера: 1 – электродвигатель; 2 – муфта лепестковая; 3 – редуктор; 4 – муфта зубчатая; 5 – подшипник роlikовый сферический; 6 – лента конвейерная; 7 – погрузочное устройство; 8 – роlikоопора рабочей ветви

Для оценки фактического состояния был проведен неразрушающий контроль, а именно следующее.

### **Визуальный и измерительный контроль**

Визуальный осмотр наружной и внутренней поверхностей (объем контроля – 100% доступных поверхностей элементов объекта экспертизы) проводится с целью выявления дефектов и повреждений, образовавшихся в процессе изготовления, транспортировки, ремонтов и эксплуатации.

При визуальном осмотре проверке подлежат следующие узлы конвейера: став конвейера; приводной и натяжной барабаны; натяжное устройство; роликоопоры; электрооборудование; лента конвейера; приводной механизм; защитные кожухи; передвижная система (колеса, рельсы, тормоза) [2].

### **Вибродиагностический контроль**

Вибродиагностический контроль предназначен для оценки технического состояния механических узлов конвейера по общему уровню вибрации. Вибродиагностическому контролю подвергаются корпус электродвигателя; корпус редуктора; корпус подшипников приводного барабана.

Так же проведена работа по определению действующих повреждающих факторов, механизмов повреждения и восприимчивости материала технического устройства к механизмам повреждения.

Конвейеры ленточные в большинстве случаев, подвержены одному или нескольким механизмам повреждения [3]:

- общей поверхностной коррозии;
- механическому износу деталей узлов;
- циклическому режиму силового нагружения.

Проведены расчетные и аналитические процедуры оценки и прогнозирования технического состояния технического устройства

Расчет производился на основе методики расчета остаточного ресурса технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах [4].

Возможный безопасный срок службы определен по критерию физического износа конструкций.

Общая оценка поврежденности конструкций объекта производится по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$  – максимальные повреждения отдельных узлов конвейера;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$  – коэффициенты значимости отдельных узлов конвейера.

Относительная оценка повреждаемости конвейера производится по формуле:

$$\gamma = 1 - \varepsilon.$$

Постоянная износа определяется по данным обследования:

$$\lambda = \frac{-\ln \gamma}{t_\phi},$$

где  $t_\phi$  – срок службы в годах на момент проведения обследования.

Срок службы объекта определяется по формуле, в годах:

$$T = \frac{0,16}{\lambda}.$$

Для конвейера общая оценка поврежденности:

$$\varepsilon = \frac{2 \times 0,05 + 4 \times 0,15 + 8 \times 0,15 + 3 \times 0,15 + 2 \times 0,05}{2 + 4 + 8 + 3 + 2} = 0,1289.$$

Относительная оценка поврежденности конвейера:

$$\gamma = 1 - 0,1289 = 0,8711.$$

Постоянная износа, определяемая по данным обследования:

$$\lambda = \frac{\ln 0,8711}{34} = 0,00406.$$

Срок службы конвейера, в годах:

$$T = \frac{0,16}{0,00406} = 39 \text{ лет.}$$

Остаточный ресурс конвейера равен разности срока службы конвейера и количества эксплуатируемых лет:

$$39 - 34 = 5 \text{ лет.}$$

**Вывод:** согласно проведенным расчетам, возможный срок безопасной эксплуатации конвейера составляет 5,0 (пять) лет.

#### Список литературы

1. Синецкий В.М., Пасечник Н.В., Дрозд В.Г. и др. Машины и агрегаты металлургического производства Т. IV-5. – М.: Машиностроение-1, 2000 – 912 с.
2. Андросенко М.В., Филатова О.А. Проектирование технологического оборудования с применением САПР. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020 – 98 с.
3. Куликова Е.В., Андросенко М.В. Техническая механика и детали машин. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 46 с.
4. Андросенко М.В., Филатова О.А. Основы управления металлургическими машинами и оборудованием: Учебное пособие. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016 – 112 с.

#### Сведения об авторах:

*Андросенко Мария Владимировна* – к.т.н., доцент кафедры Проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования;

*Куликов Семен Сергеевич* – студент;

*Харлов Дмитрий Анатольевич* – магистрант;

*Юдин Данил Владиславович* – студент.



## КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА С ЧПУ

*Захарова В.П., Васильев В.В.*

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

**Ключевые слова:** температурная погрешность станка, нейронная сеть, тепловые характеристики, ОММ-технологии, системы автоматизированного проектирования.

**Аннотация.** Статья посвящена способам повышения точности обработки на станках с числовым программным оборудованием. Рассмотрены методики создания системы коррекции температурной погрешности станка. Определены условия, необходимые для осуществления представленных методик. Дан сравнительный анализ эффективности применяемых методов.

## COMPENSATION FOR METAL-CUTTING CNC MACHINE TOOL TEMPERATURE ERROR

*Zakharova V.P., Vasilev V.V.*

*Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** temperature error of the machine, neural network, thermal characteristics, OMM technology, computer aided design.

**Abstract.** The article is devoted to the technique of improving the accuracy of processing on machine tools with numerical control. Methods of creating a system for correction of machine temperature error are considered. Conditions for implementing presented methodologies are defined. Comparative analysis of efficiency of mentioned methods is conducted.

### **Введение**

Температурная погрешность является одним из важнейших факторов при обеспечении точности станков с ЧПУ. Вопросы термостабилизации станков уделяется большое внимание, но, несмотря на большое количество исследований за последние годы, он остается нерешенным [3]. Ниже рассмотрены несколько методик, позволяющих использовать алгоритмы коррекции температурной погрешности станка.

### **Метод с применением автоматического измерения детали**

Для применения методики станок с ЧПУ должен быть оснащен измерительным щупом. Для большинства станков, у которых щуп не включен в стандартную комплектацию, он является дополнительным оснащением. Методика состоит из нескольких этапов [1].

Первый этап – анализ процесса обработки детали и подготовка исполнительной программы.

Второй этап – прогнозирование смещений органов станка в результате температурных воздействий. Этот этап осуществляется путем создания аппроксимирующих функций, значения которых получают в автоматизированных системах расчета корректирующих воздействий [2].

Третий этап – подготовка управляющей программы (УП). УП модифицируется для исправления температурных погрешностей путем добавления блока текущей координатной коррекции вдоль оси и блока, учитывающего промежуточное измерение рабочей плоскости в системе координат детали. Это изменение можно осуществить с помощью САМ-систем.

Четвертый этап – измерение базовой поверхности заготовки. Полученные замеры принимаются как отсчетная «нулевая» точка, относительно которой будут проводиться будущие измерения, расчеты и корректировки движения рабочих органов станка.

Пятый этап – этап отработки УП. Во время проведения обработки заготовки важным условием получения высокой точности является соблюдение температурного режима. В помещении, где установлен станок, во время работы УП должен поддерживаться тот же температурный режим, при котором были получены исходные данные для расчета корректировочных воздействий.

Шестой этап – контрольный. С помощью координатно-измерительной машины сравниваются полученные размеры детали с заданными. На этом этапе определяется возможность дальнейшего изготовления детали или её обработка прерывается из-за неисправимых погрешностей.

Седьмой этап – изменение УП для внесения корректирующих смещений.

Проведенные испытания показали, что представленная методика позволяет снизить погрешность обработки на 0,04 мм в рамках эксперимента. Стоит отметить, что эффективность обработки зависит от полноты экспериментальных данных и точности используемых корректирующих алгоритмов.

### **Метод с использованием анализа конечных элементов**

Этот способ предлагает использование САД модуля для построения модели детали, с помощью которой оценивается температурное расширение заготовки с помощью метода анализа конечных элементов (МКЭ), и включает в себя 5 этапов [2].

Первый этап – подготовка модели расчета детали для МКЭ. Создается 3D модель изготавливаемой детали в САД модуле, на основе которой строится сетчатая модель и облако узловых точек для расчета смещений. Построение и расчет узлов выполняется в системах ANSYS.

Второй этап – черновая обработка детали и измерение температуры. После предварительной обработки детали с помощью инфракрасного термометра снимаются значения температуры заготовки и инструмента. Полученные данные используются для расчета скорректированной модели.

Третий этап – расчет геометрии обрабатываемой заготовки с помощью МКЭ.

Четвертый этап – изменение управляющей программы. Из измененного массива узлов получаем новую модель детали и, применяя САД/САМ модули, вносим в УП станка необходимые корректировки.

Пятый этап – чистовая обработка детали.

В результате серии экспериментов было установлено, что количество погрешности и степень её коррекции зависит установившейся температуры во

время обработки. Среднее значение погрешности после применения методики при температуре 42°C снизилось с 88 мкм до 14 мкм.

### **Метод с применением машинного обучения**

Технологии нейронных сетей и машинного обучения возможно применить для снижения погрешностей обработки в машиностроении [4]. Для этого в рабочее пространство станка устанавливается набор датчиков и сенсоров, отслеживающих температуру различных рабочих органов станка и обрабатываемых заготовок, а также износ и деформацию, в нескольких точках. Полученные данные обрабатываются в соответствии с выбранным алгоритмом, который определяет коррелирующие параметры и корректирует управляющую программу. Стоит отметить, что эффективность такого метода сильно зависит от количества и расположения используемых датчиков, модели обработки данных и типа нейронной сети [5]. Во время сбора данных производительность станка значительно снижается, поскольку необходимо получить достаточно большой массив. Однако такой подход поддерживает высокую точность в долгосрочной перспективе, например, в течение года. Применяя разные модели и способы расчета и создания нейронной сети, этот метод снижает погрешность с эффективностью от 70% до 98,4%.

### **Заключение**

В статье рассмотрены три методики компенсации температурной погрешности станка с ЧПУ.

Первый метод полагается на прогнозирование температурных смещений рабочих органов станка. Эффективность метода зависит от циклограммы работы станка и полноты экспериментальной базы для аппроксимирующих функций, необходимые для корректирующих воздействий. Важным условием применимости метода является наличие у станка измерительного щупа.

Второй метод использует анализ конечных элементов для моделирования температурной деформации обрабатываемой заготовки детали. Используется прибор для измерения температуры и специальное программное обеспечение для более быстрых расчетов корректирующих воздействий. Температура обрабатываемой заготовки оказывает влияние на возможность исправления погрешности.

Третий метод использует технологии нейронных сетей и машинного обучения для компенсации погрешностей. Для этого используются значительные вычислительные мощности, набор температурных датчиков, а также датчиков, отслеживающих деформацию рабочих органов станка и заготовки. Производительность станка существенно снижена в период сбора данных для обучения, но этот фактор возможно компенсировать благодаря наличию баз с экспериментальными данными на Интернет ресурсах, например, GitHub. Требуется аккуратная настройка нейронной сети, так как от этого напрямую зависит её эффективность.

Наличие разнообразных методов позволяет компенсировать температурную погрешность металлорежущих станков. Выбор конкретного способа зависит от оснащённости предприятия и от типа производства в зависимости от номенклатуры выпускаемой продукции и размера производственной программы.

### **Список литературы**

1. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфёнов И.В. Методика коррекции температурной погрешности станка с ЧПУ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. –2019. – № 3. – С. 117-127.
2. Saban Murat UNLU , Eyup Sabri TOPAL Correction and Compensation of Thermally-Induced Errors in CNC Milling via Integrated CAD / CAM and Finite Element Analysis for AL 7075(T6) // Erciyes University Journal of Institute Of Science and Technology. 2022, vol. 38, iss. 3, pp. 628-641.
3. Putz M., Richter C., Regel J., Braunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018, vol.12, pp. 723-736.
4. Czwartosz R. and Jedrzejewski J. application of machine learning in the precise and cost-effective self-compensation of the thermal errors of cnc machine tools // Journal of Machine Engineering. 2022, vol. 22, no. 3, pp. 59-77.
5. Li Y., Yu M., Bai Y., Hou Z., Wu W., A Review of Thermal Error Modeling Methods for Machine Tools // Appl. Sci. 2021, vol. 11, p. 5216.

### Сведения об авторах:

*Захарова Вера Петровна* – к.т.н., доцент;

*Васильев Владислав Владимирович* – студент.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ В XXI ВЕКЕ

*Пахомова Л.В., Земиров Н.А., Карманов М.В.*

*Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск*

**Ключевые слова:** техническое обслуживание грузоподъемных кранов, внешний осмотр и ремонтные работы, рекомендации по оптимизации.

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные методы и подходы к техническому обслуживанию и ремонту грузоподъемных кранов в соответствии с современными требованиями и технологиями. Особое внимание уделяется использованию современных электронных систем мониторинга и диагностики. Исследование охватывает вопросы качества запасных частей и их влияние на качество обслуживания и надежность крана. В заключение представлены рекомендации и практические советы для оптимизации процесса технического обслуживания и ремонта грузоподъемных кранов.

## MAINTENANCE AND REPAIR OF LIFTING CRANES IN THE XXI CENTURY

*Pahomova L.V., Zemirov N.A., Karmanov M.V.*

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk*

**Keywords:** maintenance of lifting cranes, external inspection and repair work, recommendations for optimization.

**Abstract.** The article discusses the main methods and approaches to the maintenance and repair of lifting cranes in accordance with modern requirements and technologies. Special attention is paid to the use of modern electronic monitoring and diagnostic systems. The study covers the quality of spare parts and their impact on the quality of service and reliability of the crane. In conclusion, recommendations and practical tips for optimizing the process of maintenance and repair of lifting cranes are presented.

### Введение

В современном мире грузоподъемные краны широко используются в различных отраслях промышленности, строительстве и логистике. От состояния и надежности этих кранов зависит эффективность и безопасность работы [1].

Общий характер требований, предъявляемый к кранам, можно представить на примере Руководства по эксплуатации мостовых электрических кранов общего назначения (3151100 РЭ).

Согласно этому Руководству техническое обслуживание кранов при их эксплуатации производится в межремонтные периоды без детальной разборки механизмов и включает в себя смазку, чистку, регулировку, подтяжку крепежа, осмотр и контроль.

### Ежесменное техническое обслуживание – ЕО

При ежесменном техническом обслуживании следует выполнить следующие работы [2].

Первое, что необходимо сделать – это осмотреть состояние подкрановых путей; после необходимо снять кожухи приводов механизмов передвижения и

проверить затяжку болтов крепления двигателей, редукторов и тормозов; затем следует удостовериться в исправности тормозов; дальше нужно осмотреть нижние части стоек опор; осмотреть токоподводящий кабель, проверить сохранность изоляции и исправность концевых креплений кабеля; включить и проверить внешнее освещение; проверить наличие в кабине изоляционного коврика, аптечки, огнетушителя, емкости с питьевой водой, состояние остекления; очистить проходы и площадки от грязи и посторонних предметов; в механизмах подъема груза проверить исправность редуктора, тормоза, муфты и двигателя; в механизмах подъема груза проверить состояние канатов, правильность их укладки в ручьях блоков и барабанов, надежность крепления на барабане; произвести внешний осмотр электрических аппаратов; опробовать вхолостую работу всех механизмов крана, проверить действие тормозов; сделать запись в вахтенном журнале о приеме смены.

### **Техническое обслуживание ТО-1**

При проведении технического обслуживания ТО-1, выполняют все те же пункты работы, как и в ежемесячном техническом обслуживании ЕО, а также следующие пункты работ: Проверяются механическое оборудование и металлоконструкции, тормоза, редукторы; Осмотр и проверка муфт и валов, барабанов, канатных блоков, колес, подтележечных путей; Проверка и осмотр электродвигателей, магнитных контроллеров; Очистка контактных узлов от копоти и нагара; Осмотр, проверка и регулировка кулачковых контроллеров и командоконтроллеров, путевых выключателей; Проверка пусковых сопротивлений, при необходимости, продуваются сжатым воздухом.

### **Техническое обслуживание ТО-2**

При проведении технического обслуживания ТО-2, выполняют все те же пункты работы, как и в ежемесячном техническом обслуживании ЕО, а также следующие пункты работ: Проверяют отсутствие нарушения соосности валов электродвигателей и редукторов, при необходимости восстановить соосность, износ зубьев в зубчатых муфтах, смазку зубчатых муфт, при необходимости смазку заменить или добавить, крепление ходовых колес, при необходимости подтянуть гайки болтов крепления букс, состояние подшипников барабана, блоков, подвесок и букс, при необходимости добавить или заменить смазку; Осмотреть шарнирные соединения тормозов; Проверить состояние подшипников электродвигателей, при необходимости заменить смазку.

### **Сезонное техническое обслуживание – СО**

Сезонное обслуживание в первую очередь подвергаются краны, работающие на открытом воздухе. Необходимость данного обслуживания обусловлена переходом от осенне-зимнего периода эксплуатации крана к весенне-летнему и наоборот.

Перед проведением СО необходимо для начала выполнить работы, предусмотренные техническим обслуживанием ТО-2. Затем произвести следующие работы: очистить кран и механизмы от пыли и грязи; промыть внутренние полости корпусов редукторов чистым дизельным топливом и залить свежее масло до нормального уровня; заменить жидкость в гидротолкателях тормозов; произвести нивелировку и рихтовку подкрановых путей.

## **Заключение**

Оптимизация процесса технического обслуживания и ремонта грузоподъемных кранов имеет существенное значение для обеспечения безопасной и эффективной работы кранов, а именно:

- развитие цифровизации, внедрение цифровых технологий [3];
- профилактическое обслуживание: проведение регулярных проверок и технического обслуживания;
- обучение персонала: регулярное обучение и сертификация персонала, ответственного за обслуживание и ремонт грузоподъемных кранов;
- запасные части и материалы: составление списка основных запасных частей и материалов, необходимых для быстрого и эффективного ремонта кранов;
- аудит и анализ: Проведение систематического аудита процесса обслуживания и ремонта кранов;
- партнерство с поставщиками оборудования: налаживание партнерских отношений с надежными поставщиками оборудования;
- стандартизация процедур: создание стандартизированных процедур на основе лучших практик для обслуживания и ремонта кранов;
- автоматизация и роботизация процесса: Использование автоматизированных систем и роботов для выполнения некоторых задач.

## **Список литературы**

1. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов Н.А., Никольская Т.А., Полковников В.С. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование». – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
2. Веденеев А.Г. Техническое обслуживание и ремонт грузоподъемных кранов и съемных грузозахватных приспособлений. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 240 с.
3. Бернгардт К.В., Воробьев А.В., Машкин О.В. Краны для строительно-монтажных работ: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. – 195 с.

## Сведения об авторах:

*Пахомова Людмила Владимировна* – к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «СМ и ПТМ»;  
*Земиров Никита Александрович* – студент;  
*Карманов Матвей Викторович* – студент.

## К ВОПРОСУ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ С ФЛАНЦЕМ

*Олейник Д.Г., Белан О.А., Базыков А.Р.*

*Открытое акционерное общество «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск*

**Ключевые слова:** болты с фланцем, холодная объемная штамповка, технологический инструмент, долговечность.

**Аннотация.** В работе рассматривается вопрос о необходимости проведения научных исследований долговечности технологического холодновысадочного инструмента (пуансонов и матриц), используемого в промышленном производстве холодной объемной штамповкой высокопрочных болтов с фланцем (класс прочности 10.9), предназначенного для монтажа различных элементов и узлов легковых и грузовых автомобилей.

## ON THE ISSUE OF DURABILITY OF TECHNOLOGICAL TOOLS FOR THE MANUFACTURE OF HIGH-STRENGTH FLANGE BOLTS

*Oleinik D.G., Belan O.A., Bazykov A.R.*

*Open Joint-Stock Company «Magnitogorsk hardware and sizing plant «MМК-METIZ», Magnitogorsk*

**Keywords:** bolts with flange, cold die forging, technological tool, durability.

**Abstract.** The paper examines the need to conduct scientific research into the durability of technological cold heading tools (punches and dies), used in industrial production by cold die forging of high-strength bolts with a flange (strength class 10.9), intended for the installation of various elements and assemblies of cars and trucks.

С развитием мирового автомобилестроения ужесточаются требования к показателям обуславливающих высокую надежность скрепления отдельных узлов и деталей. Крепежные изделия, используемые для таких целей, должны быть экономичными, обладать высокими эксплуатационными свойствами и иметь высокую прочность.

В настоящее время в автомобилестроении всё больше распространяется применение высокопрочных фланцевых болтов, классов прочности 8.8, 10.9, 12.9. Фланцевые болты предназначены для создания устойчивых к вибрациям и прочим внешним нагрузкам соединений, а также являются эффективными в применении не только за счет своей высокой надежности, но и за счет значительного снижения металлоёмкости скреплений, позволяя исключать использование болта в комплекте с пружинной или плоской шайбой [1].

В основной массе фланцевые болты используются при установке ремней безопасности, сборке кузовных деталей, скреплению частей двигателя, карданного вала, а также при монтаже рамы и элементов рамы на грузовых автомобилях.



Фланцевые болты имеют различные исполнения головок, среди которых наиболее распространенной является исполнение болта с шестигранной головкой. Болты с шестигранной головкой изготавливаются методами холодной объемной штамповки (ХОШ) на холодновысадочных автоматах. Шестигранную головку с фланцем можно формировать различными способами: высадкой, обрезкой граней головки и фланца, редуцированием головки [2, 3].

На предприятии ОАО «ММК-МЕТИЗ» имеется опыт освоения фланцевых болтов классом прочности 10.9 методом холодной объемной штамповки (ХОШ) с применением операции редуцирования головки (схема штамповки является ноу-хау предприятия и не приводится). Данный вид крепежа изготавливается из легированных марок стали (32CrV4, 42CrMo4, 40XH2MA, 40X и др.) с целью дальнейшего обеспечения требуемых механических свойств продукции после термической обработки. В свою очередь применение марок стали повышенной прочности для дальнейшей штамповки повышает требования к долговечности пуансонов и матриц. На рисунке 1 представлен общий вид конструкции высокопрочного болта с фланцем M12.



Рис. 1. Общий вид конструкции высокопрочного болта с фланцем M12

Из практики предприятия известно, что при изготовлении фланцевых болтов M12 классом прочности 10.9, холодновысадочный инструмент, испытывая на себе интенсивные нагрузки, демонстрировал отказы, не достигая выработки назначенного ресурса.

Отказы технологического инструмента классифицируются по степени влияния на технологический процесс (полные и параметрические отказы) и по физике явлений, которые вызваны разрушением (усталостным механическим или термомеханическим) или абразивным износом [4].

Критерием отказа пуансонов и матриц в основном является наработка до разрушения рабочей поверхности инструмента.

Для определения причины отказа технологического инструмента необходимо проводить оценку взаимодействия инструмента и деформируемой заготовки в момент ХОШ. На практике оценка возможна лишь при рассмотрении заготовки и холодновысадочного инструмента отдельно друг от друга (например, наличие и характер дефектов на рабочей поверхности инструмента, геометрические параметры заготовки до операции на которой случился отказ инструмента и др.). Для установления факторов, которые увеличивают риск

отказа холодновысадочного инструмента, необходимы научные исследования для разработки математических моделей и современных методик, позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние (НДС), возникающее в технологическом инструменте при изготовлении болтов, что в свою очередь позволит обеспечить разработку более совершенных конструкций инструмента и наиболее рациональную технологию его изготовления для повышения долговечности.

В настоящее время на предприятии ОАО «ММК-МЕТИЗ» ведутся активные работы по исследованию НДС, моделированию процесса ХОШ высокопрочных фланцевых болтов с целью дальнейшего повышения долговечности инструмента.

#### **Список литературы**

1. Чукин В.В., Артюхин В.И. Рубин Г.Ш. и др. Проблема повышения качества крепежных изделий // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – №4. – С. 99-104.
2. Кадошников В.И., Решетникова Е.С., Решетников Л.В., Кочуков С.В. Совершенствование инструмента и математическое моделирование процесса формирования головок фланцевых болтов // Вестник МГТУ им. Носова. 2008. – №2. – С. 52-56.
3. Новиков С.В., Ефремова Е.А. Анализ вариантов изготовления шестигранных головок болтов с фланцем и выбор рационального метода // Разработка и внедрение ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий и устройств: сб. статей VII междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2016. – С. 50-53.
4. Степанский Л.Г. Прогнозирование надежности технологических процессов, инструмента и машин в обработке металлов давлением. – М.: Модерат, 2015. – 288 с.

#### Сведения об авторах:

*Олейник Дмитрий Геннадьевич* – лаборант химического анализа;

*Белан Ольга Анатольевна* – к.т.н., ведущий специалист;

*Базыков Артур Рафикович* – ведущий инженер.

## ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К БАЛАНСИРОВКЕ РОТОРОВ МАШИН

*Полушкин О.О., Полушкин О.А.*

*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Ключевые слова:** машина, ротационный агрегат, балансировка, системный подход.

**Аннотация.** Существующая теория и практика балансировки роторов не реализуют системный подход. Представлены признаки объекта (процесса), интерпретируемого как сложная система. Раскрыты концепции системного подхода, обеспечивающие качественное решение вопросов балансировки при проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте роторов с использованием высокоадекватных моделей их неуравновешенности и динамики.

## FUNDAMENTALS OF THE SYSTEM APPROACH TO THE MACHINE ROTOR BALANCING

*Polushkin O.O., Polushkin O.A.*

*Don State Technical University, Rostov-on-Don*

**Keywords:** machine, rotary unit, balancing, system approach.

**Abstract.** The existing theory and practice of rotor balancing do not implement a system approach. The characteristics of an object (process) interpreted as a complex system are presented. The concepts of system approach are disclosed, providing a high-quality solution to balancing issues during the design, manufacture, operation and repair of rotors using highly adequate models of their unbalance and dynamics.

Балансировка является основным средством борьбы с колебанием, генерируемым неуравновешенностью ротационного агрегата (ротора) с частотой его вращения [1, 2]. Обзор справочных, нормативных, научных и практических разработок по вопросам балансировки роторов при их проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте в различных отраслях машиностроения установил приемлемость этих разработок для жёстких роторов и выявил следующие проблемы их использования для нежёстких роторов [3]:

- общая теоретическая основа балансировки жёстких и нежёстких роторов отсутствует;
- балансировка нежёстких и специальной конструкции жёстких роторов не располагает адекватными технологиями и оборудованием;
- низкая адекватность моделей неуравновешенности и обусловленных ею колебаний ротора;
- отсутствуют обоснования точности и технологии низкочастотной балансировки нежёстких роторов по собственным формам изгиба оси.

Эти и другие, связанные с ними, проблемы балансировки свидетельствуют об отсутствии системности в теории и практике её реализации.

Современное состояние теории сложных систем определяет их обязательным наличием следующих основных признаков:

- целей функционирования – комплекса независимых количественных показателей целевого назначения создаваемого и используемого объекта (процесса), совместно определяющих его качество и эффективность;
- иерархической структуры – совокупности взаимосвязанных и взаимозависимых элементов, подсистем различного уровня иерархии и «Среды» [2], функционированием которых достигаются поставленные цели;
- управления – целенаправленного воздействия на компоненты иерархической структуры сложной системы, приводящего к обеспечению требуемого качества решения стоящих перед ними задач;
- плана потребления средств – всех видов ресурсов (кадровых, материальных, информационных, комплектующих и пр.), адресно поставляемых как компонентами иерархической структуры, так и «Средой»;
- совместное рассмотрение процессов создания и функционирования системы, позволяющее перераспределять затраты реализации этих процессов для обеспечения наибольшего эффекта его использования.

Другие признаки сложной системы, представленные в литературе, – производные от приведенных выше.

Интерпретация процесса балансировки любого ротора сложной системой требует воссоздания в нём всех её признаков. Так, на максимальной эксплуатационной частоте вращения (а не только на низкой частоте балансировки) обеспечить качество балансировки ротора, регламентированное действующими стандартами. Специфика конструкции ротора, условия его создания и функционирования могут диктовать множество других целевых показателей балансировки. Их формулировка и количественная оценка выполняются специалистами по созданию аналогичных машин.

Вопросы балансировки ставятся и решаются на всех этапах создания (проектирование, исполнение, испытания и пр.) и функционирования (хранение, использование, ремонт и пр.) объекта (процесса) с ротационными агрегатами. Это требует построения в сложной системе двух систем («Системы создания» и «Системы функционирования») высшего уровня иерархии. Каждая из них должна включать подсистемы более низкого уровня иерархии, включающие компонентами функциональные элементы и «Среду». Каждая из последних решает свою задачу при заданных ресурсообеспечении и качестве решения. Такая совокупность компонентов образует иерархическую структуру сложной системы.

Остальные признаки сложной системы представляют собой процессы, реализуемые только после воссоздания у объекта (процесса) двух раскрытых выше признаков. Эта реализация основывается на следующих концепциях системного подхода (системотехники):

- возможность интеграции (включение в рассматриваемую систему) и дифференциации (выделения из этой системы) отдельных подсистем и элементов, реализующих концепцию: «Каждая система имеет внешнюю среду и является подсистемой более сложной системы»;
- совместное решение задач макро- и микропроектирования в рамках одной сложной системы, позволяющее эффективно управлять этой системой в достижении любой поставленной цели её функционирования;

– выбор элементов иерархической структуры сложной системы обосновывать соображениями достоверности и точности результатов её исследования, сложности и эффективности в достижении поставленных целей функционирования. Для этого необходимо следовать таким принципам как:

- структура системы, построенная для достижения конкретной цели, не должна содержать элементов, не способствующих этому;
- каждый элемент сложной системы должен иметь функции, согласованные с целями её функционирования;
- не допускать дублирования функций различными элементами;
- степень реализации функции элемента оценивать количественно;
- все элементы сложной системы должны быть связаны и иерархически зависимы;
- математическое моделирование функционирования сложной системы как средство управления её качеством и эффективностью;
- поиск, прогнозирование и анализ изменений «Среды» для постановки новых целей, задач, которые могут встать перед системой в будущем;
- рассмотрение всех альтернативных вариантов решений с обоснованием наиболее эффективного по взвешенной системной оценке;
- корректировку сложной системы, непрерывную на всех этапах создания и функционирования объекта (процесса), в связи с изменениями свойств «Среды», постановкой новых целей, изменением ресурсообеспечения и пр.;
- формализацию решения задач управления сложной системой на компьютере посредством разработки необходимых алгоритмов.

Практическая реализация изложенных основ системного подхода к балансировке роторов даёт эффект в ликвидации приведенных выше её недостатков лишь при использовании высокоадекватных моделей:

- неуравновешенности ротора с конечной изгибной жесткостью его оси;
- колебаний опор ротора, генерируемых его неуравновешенностью.

Исследования в этих направлениях проводились и проводятся в ДГТУ.

### **Список литературы**

1. Справочник по балансировке / Под общ. ред. М.Е. Левита – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.
2. ГОСТ 19534-74. Балансировка вращающихся тел. Термины. – 46 с.
3. Полушкин О.О. Системные закономерности механики и балансировки роторов // Вестник ДГТУ. – 2011. – № 6(57). – С. 842-849.

### Сведения об авторах:

*Полушкин Олег Олегович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры;

*Полушкин Олег Алексеевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры.

## ДИЗАЙН И ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В РАКЕТОСТРОЕНИИ: ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Ивченко Д.Д.*

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

**Ключевые слова:** дизайн проектирование, фазы дизайнерского процесса, 3D-печать, ракетостроение.

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос о перспективах и возможностях 3D-печати в ракетостроении, а также связи дизайнера с этой технологией. Также рассматриваются основные аспекты технологии 3D-печати в ракетостроении, такие как принципы работы, используемые материалы, возможности и ограничения, а также перспективы развития и инноваций в этой области.

## 3D PRINTING DESIGN AND TECHNOLOGY IN ROCKET SCIENCE: INNOVATIONS AND PROSPECTS

*Ivchenko D.D.*

*Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow*

**Keywords:** design engineering, phases of the design process, 3D printing, rocket science.

**Abstract.** The article discusses the prospects and possibilities of 3D printing in rocket science, as well as the designer's connection with this technology. The main aspects of 3D printing technology in rocket engineering are also considered, such as the principles of operation, materials used, opportunities and limitations, as well as prospects for development and innovation in this area.

Ракетостроение – это область, где даже малейшие улучшения могут иметь огромное значение [1]. Технология трехмерной печати (3D-печати) представляет собой процесс создания физических объектов по цифровой модели с помощью последовательного нанесения слоев материала. Эта технология имеет широкий спектр применения в различных отраслях, в том числе в ракетостроении, где она может обеспечить ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами изготовления.

Технологии 3D-печати неразрывно связаны с деятельностью дизайнеров, а дизайнеры играют важную роль в развитии ракетостроения, так как они создают концепции и прототипы будущих космических аппаратов.

Дизайнерская составляющая есть на каждом этапе создания ракеты. Это подтверждают общепринятые основные фазы дизайнерского процесса [2]:

- проблематизация – этап исследования, определение проблем;
- идея – поиск концепций и путей решения этих проблем;
- воплощение – путь от концепции до реально осуществимого продукта;
- доказательства – оценка результата проделанной работы, предоставление доказательств возможность воплощения;
- реализация – доведение проекта до стадии выпуска продукта.

Технология 3D-печати позволяет быстро и экономно решать выявленные проблемы во время первого этапа дизайн-исследования и изготавливать сложные детали и конструкции из различных материалов. 3D-печать также позволяет создавать новые формы и решения, которые могут повысить эффективность и безопасность ракет.

Таким образом, дизайнеры, используя технологию 3D-печати, способствуют инновациям в области ракетостроения. Такой подход является наиболее верным и продуктивным по определенным причинам, которые будут описаны ниже. Они могут создавать сложные и оптимизированные детали для ракетных двигателей, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Технология 3D-печати позволяет сократить затраты и время на производство, а также уменьшить количество отходов и выбросов.

В последние десятилетия 3D-печать стала ключевой технологией в различных отраслях, включая медицину, авиацию, автомобилестроение и ракетостроение. Чтобы изучить область влияния и применения этой технологии необходимо рассмотреть перспективные или же уже реализованные направления в ракетостроении.

1. Одной из наиболее важных областей применения 3D-печати в ракетостроении является создание компонентов ракетных двигателей. С помощью этой технологии можно изготавливать сложные геометрические формы, оптимизировать внутренние каналы для охлаждения и уменьшать вес. Например, РКК “Энергия” успешно применила 3D-печать для создания камеры сгорания ракетного двигателя.

2. 3D-печать позволяет создавать легкие и прочные оболочки для ракет. Это снижает массу и увеличивает эффективность. Кроме того, можно изготавливать интегрированные структуры, объединяя несколько компонентов в один.

3. 3D-печать позволяет быстро создавать прототипы и тестировать новые дизайнерские решения. Это сокращает время разработки и позволяет быстрее внедрять инновации.

Известно, что активно применять технологию 3D-печати начали только с начала 2010-х годов, этот факт говорит о значительных перспективах развития этого направления. Однако, несмотря на все преимущества, есть определённые ограничения.

Не все материалы подходят для 3D-печати в ракетостроении. Необходимо разрабатывать специализированные материалы с высокой термостойкостью и прочностью, ниже представлены некоторые из этих материалов, применяемых в 3D-печати для ракетной техники:

1. АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирол): это ударопрочный и крепкий материал. Для печати он требует нагрева платформы. АБС применяется для изготовления функциональных прототипов и элементов ракетных двигателей.

2. ПЛА (полимолочная кислота): ПЛА — самый простой материал для печати по технологии FDM. Он жесткий и крепкий, но ломкий. ПЛА биоразлагаемый, но менее стойкий к высоким температурам и химическим агентам.

3. ПЭТГ (полиэтилентерефталатгликоль): ПЭТГ стойкий к влаге и химическим средам. Он также имеет высокую прозрачность. ПЭТГ применяется для создания водонепроницаемых компонентов и деталей с защелками.

4. Титан: Титан – легкий металл с отличными механическими свойствами. Он твердый, прочный и устойчив к нагреву, окислению и кислотам. Титан применяется в технологиях SLM (селективное лазерное плавление) и DMLS (прямое лазерное спекание металлов).

5. Нержавеющая сталь: Нержавеющая сталь имеет высокую прочность и пластичность. Она коррозионностойкая и используется для изготовления надежных компонентов [4].

6. Термореактивные пластмассы (или термореактивные материалы) после полимеризации остаются твердыми. Они не поддаются переработке или восстановлению. Примеры таких материалов: эпоксидные смолы, фотополимеры для SLA и SLS. Термореактивные материалы имеют высокую прочность и термостойкость.

Выбор материала зависит от специфических требований к ракетным деталям. Контроль качества важен для обеспечения точности и надежности 3D-печати в ракетостроении.

Точность и надежность 3D-печати требуют строгого контроля качества.

Точность 3D-печати означает способность технологии воспроизводить цифровую модель с минимальными отклонениями от заданных параметров, таких как размеры, форма, текстура и цвет. Надежность 3D-печати означает способность технологии обеспечивать одинаковое качество и характеристики продукта при повторном использовании или масштабировании. Точность и надежность 3D-печати зависят от многих факторов, таких как выбор материала, настройка оборудования, калибровка датчиков, контроль температуры, скорости и направления печати, а также постобработка и проверка продукта.

В ракетостроении точность и надежность 3D-печати имеют особое значение, так как ракеты подвергаются экстремальным условиям, таким как высокое давление, температура, вибрация, удар и излучение [3]. Любые дефекты или несоответствия в 3D-печатных компонентах могут привести к снижению производительности, повреждению или даже взрыву ракеты, что может иметь катастрофические последствия для людей и окружающей среды. Поэтому 3D-печать в ракетостроении требует строгого контроля качества на всех этапах процесса от дизайна до запуска. Контроль качества может включать в себя использование стандартов, сертификаций, протоколов, аудитов, испытаний, мониторинга и обратной связи.

Тем не менее, перспективы 3D-печати в ракетостроении огромны. Эта технология продолжает развиваться, и мы можем ожидать еще более инновационных решений в будущем.

Дизайнеры и сопутствующие им технологии 3D-печати меняют облик ракетостроения, делая его более эффективным, быстрым и доступным. Это позволяет смотреть в будущее с оптимизмом и уверенностью в том, что космические исследования продолжат развиваться благодаря инновациям в дизайне и производстве.



**Список литературы**

1. Астрахов А.В., Генералов Н.Н., Панин С.Д., Сычев М.П. Проектирование управляемой баллистической ракеты: учеб. пособие по курсу «Основы ракетно-космической техники» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 54 с.
2. Михеева М.М. Введение в дизайн-проектирование: по курсу «Введение в профессию». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 49 с.
3. Смирнов Д.В. Особенности применения 3D печати в аэрокосмической отрасли. – СПб.: РХТУ, 2016. – 107с.
4. Быстрорежущая сталь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://bigenc.ru/c/bystorezhushchaia-stal-4a6b96>.

Сведения об авторе:

*Ивченко Даниил Денисович* – студент.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТИТАНАТ/ПОЛИМЕР ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Хрусталеv А.Н., Акиншин И.Д.*

*МИРЭА – Российский технологический институт, Москва*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, СВЧ-диапазон, полимерные композиционные материалы, диэлектрические свойства.

**Аннотация.** Полимерные композиционные материалы на текущий момент являются неотъемлемой частью современного материаловедения из-за своих уникальных свойств. За счет подбора параметров материала возможно получение изделий для совершенно разных сфер. В частности, использование в качестве наполнителей титанатов различных металлов и их подбор позволяют получать материалы с различными диэлектрическими свойствами для изделий, эксплуатирующихся в условиях сверхвысоких частот.

## TITANATE/POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR MICROWAVE APPLICATIONS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS

*Khrustalev A.N., Akinshin I.D.*

*MIREA – Russian Technology Institute, Moscow*

**Keywords:** additive technologies, microwave range, polymer composite materials, dielectric properties.

**Abstract.** Additive technologies are an integral part of modern production processes, allowing to obtain products of complex configuration without significant costs in the manufacture of molds for injection molding. This approach also makes it possible to significantly lighten the product without changing the physical and mechanical characteristics of the product due to internal filling. The selection of ceramic fillers and their content in the polymer material allows you to adjust the dielectric properties of the resulting products.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) привлекают большое внимание исследователей, несмотря на то, что интерес человечества к ним стал проявляться еще в древние времена [1]. Новому витку роста интереса к ПКМ поспособствовало появление и широкое распространение аддитивных технологий – технологий, во всех вариантах которых изготовление изделия осуществляется посредством послойного наращивания материала, за счет чего становятся возможными существенное облегчение изделий и сокращение затрат материала [2]. Применение аддитивных технологий не ограничено какой-либо одной сферой за счет своей чрезвычайной гибкости. В частности, аддитивные технологии применяются в получении материалов и изделий, предназначенных для работы на сверхвысоких частотах (СВЧ). Одними из наиболее распространенных материалов для СВЧ-электроники являются материалы семейства титанатов, а именно титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ , титанат бария-стронция  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  и титанат кальция  $\text{CaTiO}_3$ , композиционные материалы с применением которых и будут рассматриваться далее.

Стоит отметить, что применение керамических наполнителей позволяет регулировать свойства ПКМ материала за счет изменение размера и формы полученных частиц. А также существенное влияние на диэлектрические свойства ПКМ оказывают размеры зерен частиц полученных керамических наполнителей, так микрометровые частицы с степенью наполнению 40 об. % BST демонстрируют характеристики значительно выше, чем при применении нанометровых частиц:  $\epsilon_r = 55$  и  $27$  соответственно. [3] Увеличение содержания первых позволяет получать  $\epsilon_r = 20$  и  $55$ , при содержании BST 10 и 40% об. в системе BST/ПВДФ соответственно [4].

Получение ПКМ с наполнителем из  $\text{BaTiO}_3$  возможно с применением целого ряда методов: SLA [5], FDM [6], струйное нанесение связующего [7], струйное нанесение материала [7, 8]. Так, авторами работы [5] был получен ряд образцов композиционного материала, в которых в качестве матрицы выступала фотополимерная акриловая смола, а в качестве наполнителя – тетрагональная фаза  $\text{BaTiO}_3$ , средние размеры частиц которой составляли 3.55 мкм для одних образцов (BT-S) и 38.51 мкм для других (BT-M). Было выяснено, что из-за уменьшения рассеяния ультрафиолетового излучения за счет присутствия относительно больших частиц наполнителя в несколько раз увеличивается и глубина фотополимеризации. Более того, было обнаружено, что с увеличением объемной концентрации  $\text{BaTiO}_3$  в акриловой смоле относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  материала стабильно возрастает: на частоте 1 МГц, при объемной доле в 40% частиц BT-S,  $\epsilon$  было равно 11 при тангенсе угла диэлектрических потерь  $\tan\delta \sim 0,016$ , в то время как для чистой акриловой смолы  $\epsilon_r \sim 3,7$  при  $\tan\delta \sim 0,017$ . В целом диэлектрические характеристики полученного материала можно охарактеризовать как достаточно стабильные в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц:  $\epsilon_r$  медленно, но стабильно уменьшается, в то время как  $\tan\delta$  постепенно увеличивается.

В работе [6] материал был получен в рамках метода FDM путем экструзии  $\text{BaTiO}_3$  в составе комбинированной полипропилен-полиуретановой матрицы. Максимальный размер частиц  $\text{BaTiO}_3$  равнялся 2 мкм, а объемное соотношение полипропилен-полиуретан составляло 2:1. В данном случае относительная диэлектрическая проницаемость при объемной доле  $\text{BaTiO}_3$ , равной 35%, составила 23.5 при  $\tan\delta \sim 0.102$  на частоте 1 МГц. Также был отмечен эффект поляризации на границах раздела фаз, негативно влияющий на диэлектрические характеристики полученного композиционного материала именно на низких частотах. Отдельно авторами замечено, что по физическим свойствам полученный материал оказался близок резине, а отклонение сечения экструдированной нити было невелико.

В работе [7] образцы изготавливались двумя методами: струйным нанесением связующего и струйным нанесением материала. В первом случае в качестве матрицы для  $\text{BaTiO}_3$  выступил полиамид, во втором – диэтиленгликольдиакрилат. Для композитного материала  $\text{BaTiO}_3$ /полиамид диэлектрическая проницаемость на частоте 1 ГГц оказалась приблизительно равной 90, в то время как для материала  $\text{BaTiO}_3$ /диэтиленгликольдиакрилат она составила 7 при максимальной объемной доле наполнителя в 45,3% и 50,5% соответственно.

В работе [8] был изготовлен так называемый МИМ-конденсатор (англ. МИМ – Metal-Insulator-Metal), для чего также был применен метод струйного нанесения материала.  $\text{BaTiO}_3$ , средний размер частиц которого составлял 500 мкм, с объемной долей 4%, смешивали с диспергатором в *N,N*-диметилформамиде. Для приготовления смолы также использовали *N,N*-диметилформамид: в него внести цианатовый эфир в объемной доле, составляющей 3%. При частоте 1 МГц относительная диэлектрическая проницаемость оказалась приблизительно равной 70 с  $\tan\delta \sim 0,011$ .

Уменьшение радиуса иона с  $\text{Ba}^{2+}$  до  $\text{Ca}^{2+}$  в системе  $\text{CaTiO}_3/\text{ПП}$  позволяет получать композит с  $\epsilon_r = 2$   $\text{tg}\delta = 0,001$  при степени наполнения 10 мас. %,  $\epsilon_r = 12$   $\text{tg}\delta = 0,008$  и 80 мас. % соответственно, при частоте измерения 12 ГГц [9].

Использование в качестве наполнителя  $\text{SrTiO}_3$  позволяет повысить помимо коэффициента диэлектрической константы и коэффициент теплопроводности для ПКМ, при применении термостойких материалов [10], однако обладает несколько худшими свойствами по сравнению с  $\text{BaTiO}_3$ , показывая  $\epsilon_r = 3,5$  и  $\tan\delta = 0,0015$ , при степени наполнения  $\text{SrTiO}_3$  10 мас. % и  $\epsilon_r = 9,5$  и  $\tan\delta = 0,005$  с степенью наполнения 60 мас.% в системе  $\text{STO}/\text{ПТФЭ}$ .

При замещении ионами  $\text{Sr}^{2+}$  в положении  $\text{Ba}^{2+}$ , при создании ПКМ с различной степенью допирования в системе  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  ( $x = 0,3, 0,5, 0,6, 0,8$ ) смещается максимум диэлектрической константы из области  $-70^\circ\text{C}$  до  $280^\circ\text{C}$ . Такое изменение происходит за счет замещения ионов разного ионного радиуса в системе перовскитов. Применение твердых растворов системы  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  позволяет получать ПКМ с  $\epsilon_r = 12,67$  и  $\text{tg}\delta = 0,0029$  на основе полиэтилена высокой плотности [11]. При переходе от системы  $\text{BST}/\text{ПЭ}$  на систему  $\text{BST}/\text{СОС}$ , где СОС – полиолефиновый циклический сополимер позволяет повысить диэлектрическую константу до 40, а  $\text{tg}\delta$  до 0,0022 при измерении при частоте 2,5 ГГц. Однако наилучшими характеристиками обладает сочетание  $\text{BST}/\text{Силиконовый каучук}$ , в таком случае  $\epsilon_r = 150$  и  $\tan\delta = 0,002$  [12]. При рассмотрении стериолитографии состава  $\text{BST}$  характеристики  $\epsilon_r = 129$  и  $\tan\delta = 0,043$  [13].

Таким образом, применение титанатных керамических наполнителей является эффективным методом регулирования диэлектрических свойств в СВЧ-диапазоне. Показано, что использование частиц разного размера позволяет изменять диэлектрические свойства ПКМ. Увеличение степени наполнения позволяет увеличить диэлектрическую константу при незначительном увеличении тангенса диэлектрических потерь. В случае применения твердых растворов в качестве наполнителя для ПКМ степень допирования позволяет сместить максимум диэлектрической проницаемости из области отрицательных температур до комнатной температуры. Применение аддитивных технологий позволяет получать из ПКМ изделия сложной конфигурации без дополнительных затрат. Такой подход позволяет получать гибкую электронику для различных сфер ее применения.

#### Список литературы

1. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы. – М.: ТПУ, 2013. – 118 с.

2. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: СПбГПУ, 2013. – 222 с.
3. Cao M., Li L., Wu S.Y., Chen X.M. Dominant role of ceramic connectivity in microwave dielectric properties of porous ceramics // *Acta Materialia*. 2023, vol. 258, p. 119207. doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119207.
4. Gao F., Zhang K., Guo Y., Xu J., Szafran M. (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/polymer dielectric composites–progress and perspective // *Progress in Materials Science*. 2021, vol. 121, p. 100813. doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100813.
5. Li W.D., Wang C., Jiang Z.H., Chen L.J., Wei Y.H., Zhang L.Y., Chen M.Y., Yang X., Zhang G.J. Stereolithography based additive manufacturing of high-k polymer matrix composites facilitated by thermal plasma processed barium titanate microspheres // *Materials & Design*. 2020, vol. 192, p. 108733. doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108733.
6. Aradoaei M., Ciobanu R.C., Schreiner C., Paulet M., Caramitu A.R., Pintea J., Baibarac M. Three-Dimensional Printable Flexible Piezoelectric Composites with Energy Harvesting Features // *Polymers*. 2023, vol. 15, no. 11, p. 2548. doi.org/10.3390/polym15112548.
7. Masood K., Zaikova T., Plummer K., Allen T., Stasiak J., Harmon P., Hutchison J., Jander A., Dhagat P. Design and Digital Fabrication of Magneto-dielectric Composites for Additive Manufacturing of Gradient Index RF Lenses // *NIP & Digital Fabrication Conference*. – Society for Imaging Science and Technology, 2019, vol. 35, pp. 94-99. doi.org/10.2352/ISSN.2169-4451.2019.35.94.
8. Lim J., Kim J., Yoon Y.J., Kim H., Yoon H.G., Lee S.N., Kim J. All-inkjet-printed metal-insulator-metal (MIM) capacitor // *Current Applied Physics*. 2012, vol. 12, pp. e14-e17. doi.org/10.1016/j.cap.2011.04.035.
9. Reinheimer T., Azmi R., Binder J.R. Polymerizable ceramic ink system for thin inkjet-printed dielectric layers // *ACS applied materials & interfaces*. 2019, vol. 12, no. 2, pp. 2974-2982. doi.org/10.1021/acsami.9b18610.
10. Rajesh S., Murali K.P., Rajani K.V., Ratheesh R. SrTiO<sub>3</sub> - filled PTFE composite laminates for microwave substrate applications // *International journal of applied ceramic technology*. 2009, vol. 6, no. 5, pp. 553-561. doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02389.x.
11. Drishya V., Unnimaya A.N., Naveenraj R., Suresh E.K., Ratheesh R. Preparation, characterization, and dielectric properties of PP/CaTiO<sub>3</sub> composites for microwave substrate applications // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2016, vol. 13, no. 5, pp. 810-815. doi.org/10.1111/ijac.12554.
12. Zhang L., Qiao Q., Yue Z., Yang F., Li L. A new HDPE/BST polymer–ceramic composite for wireless temperature sensing // *Ceramics International*. 2015, vol. 41, pp. S471-S475. doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.300.
13. Friederich A., Kohler C., Nikfalazar M., Wiens A., Jakoby R., Bauer W., Binder J.B. Inkjet - printed metal - insulator - metal capacitors for tunable microwave applications // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2015, vol. 12, pp. E164-E173. doi.org/10.1111/ijac.12362.

Сведения об авторах:

*Хрусталеv Арсений Николаевич* – инженер Лаборатории керамических материалов и технологий;

*Акиншин Иван Дмитриевич* – инженер Лаборатории керамических материалов и технологий.

## ОХРАНА ТРУДА В ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

*Пахомова Л.В., Гусейнова Д.Ф., Белоусова Е.М.*

*Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск*

**Ключевые слова:** охрана труда на транспорте, безопасность труда на транспорте, виды транспорта, охрана труда как аспект обеспечения безопасности, вредные производственные факторы.

**Аннотация.** В статье рассмотрены правила охраны труда на автомобильном, железнодорожном, воздушном и водном транспорте. Приведены примеры мероприятий по обеспечению безопасности на различных видах транспорта. Рассмотрены вредные производственные факторы, возникающие на рабочем месте. Также внимание уделено аспектам обеспечения безопасности как работников, так и пассажиров.

## LABOR PROTECTION IN THE TRANSPORT INDUSTRY

*Pahomova L.V., Guseynova D.F., Belousova E.M.*

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk*

**Keywords:** labor protection in transport, labor safety in transport, types of transport, labor protection as an aspect of safety, harmful production factors.

**Abstract.** The article discusses the rules of labor protection in automobile, railway, air and water transport. Examples of safety measures for various types of transport are given. Harmful production factors arising in the workplace are considered. Attention is also paid to the aspects of ensuring the safety of both employees and passenger.

### Введение

Охрана труда на транспорте является важным аспектом обеспечения безопасности работников в данной отрасли. Транспортная деятельность связана с определенными рисками и опасностями, которые могут привести к травмам, заболеваниям или даже смерти работников. Поэтому важно принимать меры по предотвращению и минимизации возможных рисков.

Одной из основных задач охраны труда на транспорте является предотвращение аварий и дорожно-транспортных происшествий. Работники транспортных предприятий должны строго соблюдать правила дорожного движения, быть внимательными и осторожными за рулем. Важно также проводить регулярные проверки технического состояния транспортных средств, чтобы исключить возможность возникновения аварийных ситуаций из-за неисправностей.

### Охрана труда на различных видах транспорта

Охрана труда на автомобильном транспорте требует особого внимания, так как автомобильные дороги являются одним из наиболее опасных мест для работников. Для улучшения охраны труда на автомобильном транспорте необходимо строго соблюдать правила дорожного движения, поддерживать транспортные средства в исправном состоянии, а также обучать водителей правилам безопасной езды и использованию средств индивидуальной защиты [2].

Охрана труда на железнодорожном транспорте также имеет свои особенности. Важно обеспечить безопасность работников на железнодорожных путях, предотвращая возможные аварии и производственные травмы. Для этого необходимо регулярно проводить проверку железнодорожного пути, обеспечивать его правильную эксплуатацию и своевременное техническое обслуживание. Также важно обучать работников правилам безопасности при работе на железной дороге и предоставлять им необходимые средства защиты [1].

Охрана труда на воздушном транспорте также имеет свои особенности. Важно обеспечить безопасность работников на борту самолета, предотвращая возможные аварии и производственные травмы. Для этого необходимо регулярно проводить проверку самолетов, обеспечивать их правильную эксплуатацию и своевременное техническое обслуживание. Также важно обучать работников правилам безопасности при работе на борту самолета и предоставлять им необходимые средства защиты.

Охрана труда на водном транспорте также имеет свои особенности. Важно обеспечить безопасность работников на воде, предотвращая возможные аварии и производственные травмы. Для этого необходимо регулярно проводить проверку судов, обеспечивать их правильную эксплуатацию и своевременное техническое обслуживание. Также важно обучать работников правилам безопасности при работе на водном транспорте и предоставлять им необходимые средства защиты [3].

Охрана труда на транспорте также включает в себя предотвращение травматизма при погрузке и разгрузке грузов. Работники должны быть обучены правильным методам и техникам погрузки/разгрузки, использованию специального оборудования и средств защиты. Работы по погрузке и разгрузке должны проводиться с соблюдением всех норм и правил безопасности.

Один из важных аспектов охраны труда на транспорте – это обеспечение безопасности пассажиров. Водители и другие работники транспортных предприятий должны обладать необходимыми навыками и знаниями для обеспечения безопасности пассажиров во время движения. Важно также проводить регулярные проверки транспортных средств на наличие неисправностей, которые могут повлиять на безопасность пассажиров.

Охрана труда на транспорте также включает в себя предотвращение профессиональных заболеваний, связанных с работой в данной отрасли. Различают следующие вредные производственные факторы [4]:

- *физические факторы*, такие как: температура, влажность, электромагнитные излучения, шум, пыль, освещение;
- *химические факторы*. Под химическими факторами подразумевается работа с химическими веществами и некоторыми биологическими веществами;
- *биологические факторы* – работа с микроорганизмами, например продуценты, живые клетки, споры, патогенные микроорганизмы;
- *тяжесть труда*. Включает в себя физическую нагрузку на опорно-двигательный аппарат, сердечно-сосудистую систему организма и т.д.;
- *напряженность труда*. Включает в себя нагрузку на центральную нервную систему, органы чувств;

– *производственные факторы*. Включают в себя факторы, связанные с производственными процессами: движущаяся техника, незакрытые механизмы, отлетающие при обработке частицы материала, электрический ток и т.д.

Работники должны быть осведомлены о возможных вредных факторах на рабочем месте и принимать меры по их минимизации или устранению. Также важно обеспечить работникам необходимые средства индивидуальной защиты.

### **Заключение**

Для обеспечения безопасности работников транспорта и пассажиров следует обеспечить выполнение следующих мероприятий:

- соблюдение правил дорожного движения;
- регулярные проверки технического состояния транспортных средств;
- обучение работников правильным методам погрузки / разгрузки;
- предотвращение профессиональных заболеваний.

Охрана труда на транспорте является сложной и многогранной задачей, требующей постоянного внимания и соблюдения соответствующих мер безопасности. Работодатели и работники должны сотрудничать в этом вопросе, проводить обучение и тренировки, а также регулярно анализировать и улучшать систему охраны труда на транспорте.

### **Список литературы**

1. Васильев Н.Е. Охрана труда на железнодорожном транспорте: Учебное пособие. – М.: Академия, 2009. – 189 с.
2. Графкина М.В. Охрана труда. Автомобильный транспорт: Учебник. – М.: Академия, 2017. – 175 с.
3. Камалыгин А.Л. Охрана труда на судах. – М.: МОРКНИГА, 2005. – 220 с.
4. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.

### Сведения об авторах:

*Пахомова Людмила Владимировна* – к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «СМ и ПТМ».

*Гусейнова Дарья Федоровна* – студентка;

*Белюсова Екатерина Михайловна* – студентка.



УДК 669.018.95

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМО-ГРАФИТНОЙ КОМПОЗИЦИИ

*Михлик В.М., Курганова Ю.А., Калачев А.О.*

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

**Ключевые слова:** флюоматричный композит, графитный наполнитель, механические испытания, прочность, изгиб, сжатие, твердость, микротвердость.

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты исследований структуры и микротвердости металлического композиционного материала нового состава на основе алюминия с внедрением дисперсных частиц графитного порошка. На полученных экспериментальных образцах при металлографических исследованиях, удалось выявить графит, что свидетельствует о его успешном введении в алюминиевый сплав и следовательно, о решении проблемы смачиваемости графита алюминием. Исследования структуры и свойств демонстрируют не только эффект введения графита, но и достаточную степень распределения графита по объему.

## INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ALUMINUM – GRAPHITE COMPOSITION.

*Mikhlik V.M., Kurganova Yu.A., Kalachev A.O.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

**Keywords:** aluminum matrix composite, graphite filler, mechanical tests, strength, bending, compression, hardness, microhardness.

**Abstract.** This paper presents the results of studies of the structure and microhardness of a metal composite material of a new composition based on aluminum with the introduction of dispersed particles of graphite powder. Graphite was identified on the obtained experimental samples during metallographic studies, which indicates its successful introduction into the aluminum alloy and, consequently, the solution to the problem of wettability of graphite with aluminum. Studies of the structure and properties demonstrate not only the effect of graphite injection, but also a sufficient degree of graphite distribution by volume.

Антифрикционные материалы привлекают исследователей и разработчиков новых материалов, так как играют ключевую роль в обеспечении возможностей снизить потери при трении, чем повысить эффективность работы многих механизмов и машин. Их применение разнообразно: от подшипников и направляющих до опор и герметизирующих элементов. Такие материалы должны обладать рядом противоречивых характеристик, обеспечение которых возможно при создании композитов [1-6]. В композициях можно соединять самые разнообразные компоненты, а в случае необходимости обеспечения повышенных триботехнических характеристик, в приоритете – графит [7].

Исходя из обозначенных потребностей, основной задачей было получить композицию с графитом. Наиболее распространенная комбинация с графитом, это чугуны и сплавы на основе меди. Недостатком и тех и других, является значительный вес. Среди широкоиспользуемых металлических материалов,

конкуренцию могут составить алюминиевые сплавы. В связи с чем, разработка алюмоматричных композиций с графитом, является актуальной [7-9]. Основной проблемой формирования алюмо-графитной композиции является вопрос смачиваемости. Известно, что алюминий не смачивает графит, а, следовательно, требуются решения моменты введения графита в алюминиевый расплав и обеспечения равномерности распределения введенной фазы.

Таким образом, целью работы является получение образцов, пригодных для дальнейших исследований состава «алюминий-графит».

Проблема совмещения выбранных компонентов композиции решена путем получения предварительной смеси графита с медью. Медь выбрана по причине изученности и предсказуемости поведения сплавов системы «алюминий-медь»; плотности, которая больше, чем у графита и у алюминия, а так же, как компонент, сдерживающий нежелательное образование карбидов при возможном взаимодействии алюминия с графитом.

Подготовленную смесь засыпали под зеркало расплава при помощи титановой трубки, смешивали и отливали образцы.

В качестве матриц, использован технический алюминий и литейный сплав АК12М4Мг. Исходные химические составы матриц АД0 (ТУ 1811-005-53974937-2004) и АК12М4Мг (ГОСТ 1583-93) представлены в таблице 1.

Для наполнения использован графит ГЭ-1 (ГОСТ 7478-75), свойства представлены в таблице 2.

Характеристики медного порошка представлены в таблице 3.

Табл. 1. Химические составы алюминия марки АД0 и сплава АК12М4Мг

Марка	Концентрация элементов, масс. %								
	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Прочее
АД0	99,50	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03
АК12М4Мг	82,00	12,10	0,40	0,51	0,59	4,27	0,06	0,05	0,03

Табл. 2. Общие показатели графита

Показатель	Значение
Зольность, % не более	10
Выход летучих веществ, % не более	1
Содержание меди (Cu) %, не более	0,05
Остаток на сите 0,16 мм %, не более	40
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,08-2,23
Размер частиц, мкм	40-80

Табл. 3. Характеристики порошка ПМС-1

Марка, размер	Концентрация элементов, масс. %								Влаги не более
	Основа	Примесей, не более:							
ПМС-1, 45 мкм	Cu	Fe	Pb	As	Sb	O <sub>2</sub>	MeHSO <sub>4</sub>	HNO	0,05
	99,5	0,018	0,05	0,003	0,005	0,20	0,01	0,04	

Успешной комбинацией по условиям синтеза и качественным характеристикам, посчитали состав смеси порошков 1:1 (рис. 1).



Рис. 1. Графитный и медный порошок

Согласно рекомендациям [10] смесь порошков вводили в расплав алюминия и сплава соответственно.

На полученных образцах исследовали структуру и свойства.

Результаты исследования микроструктуры на оптическом микроскопе Olympus GX-51, полученные с применением программы SIAMS представлены рисунках 2 и 3.

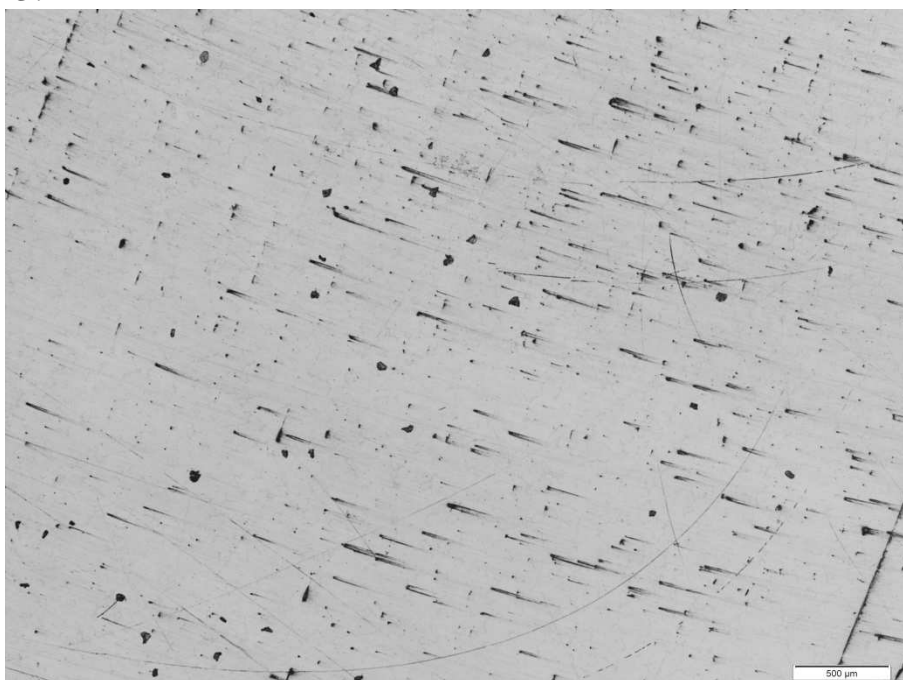


Рис. 2. Микроструктура композиции состава АД0+(1%С +1%Cu) (x5)

На микрофотографиях видны включения графита и распределение его по сечению образца.

Уникальной чертой исследования микроструктуры полученных образцов, является разработка подхода, позволяющего отличить поры, возможные при получении литейных образцов от графита. Предложено при рассмотрении менять фокусное расстояние: если его увеличивать пора будет более четкой, а структура станет размытой. Графит на полированной поверхности виден при установлении фокусного расстояния, соответствующего расстоянию от линзы до плоскости

шлифа, при этом часто виден размытый графитный след, оставшийся от размазывания частиц, вышедших на поверхность (рис. 4).

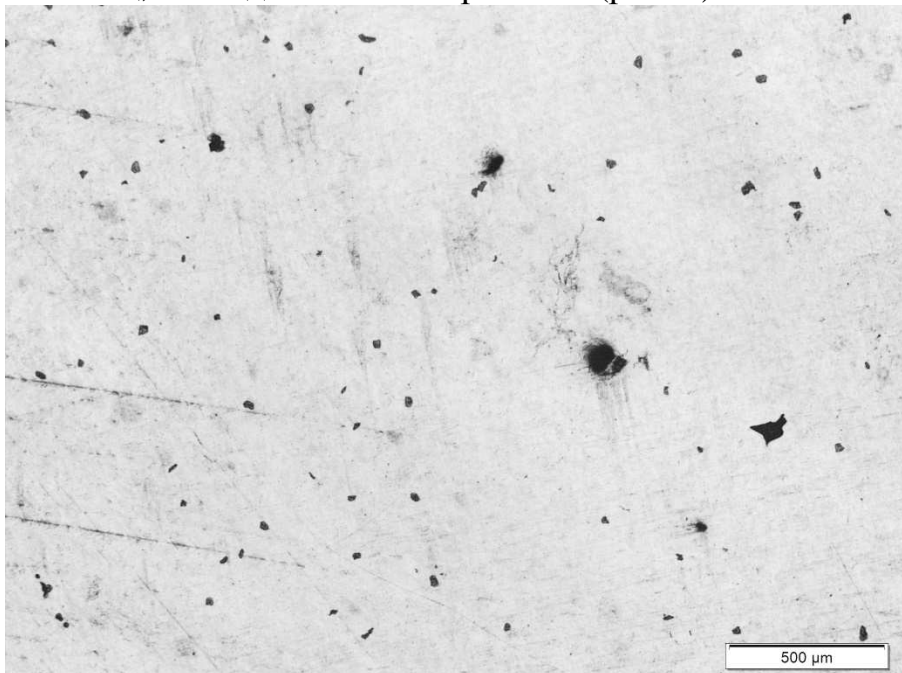


Рис. 3. Микроструктура композиции состава АК12М4Мг+(1%С +1%Сu) (x5)

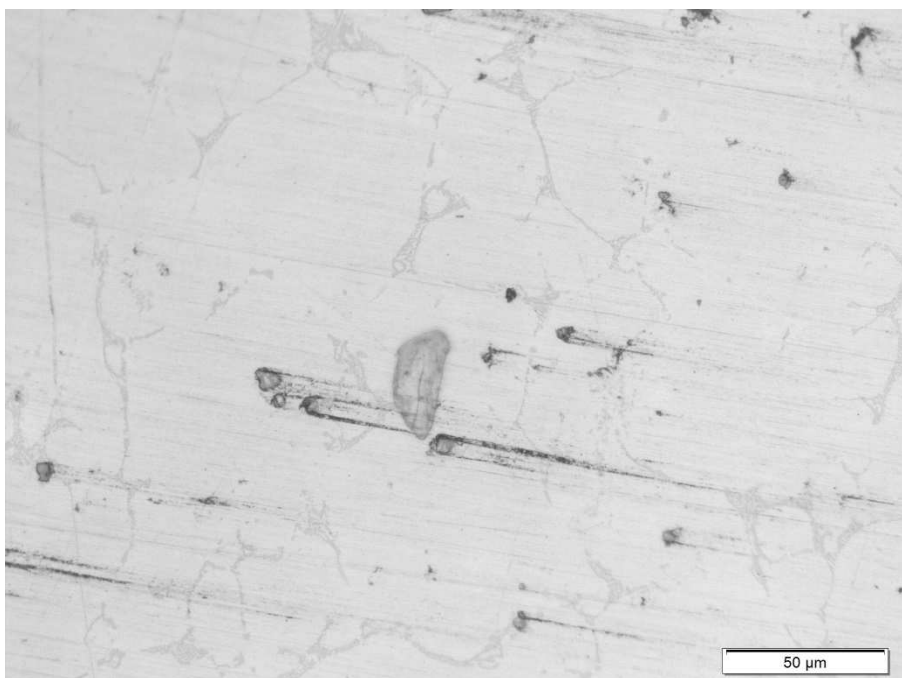


Рис. 4. Микроструктура композиции состава АК12М4Мг+(1%С +1%Сu) (x500)

При оценке свойств, были исследованы прочность и твердость. Прочность при сжатии оценивали на универсальной испытательной машине INSTRON 3382 со скоростью нагружения 1 мм/мин в соответствии с ГОСТ 25.503-97. Анализ результатов эксперимента на сжатие (табл. 4) показал, что внедрение графита в структуру материала привело к увеличению предельных нагрузок, которые могут выдержать образцы при сжатии, а также повышению предела текучести и максимальной деформации материала.

Табл. 4. Результаты испытания на сжатие

Образец	Состав	Нагрузка (МПа)	Напряжение (МПа)	Предел текучести (МПа)	Деформация при сжатии (%)
1	АД0	39986,1	499,3	50,70	68,94
2	1%С + 1%Cu	49691,9	620,5	71,82	69,07

Увеличение предела текучести при добавлении смеси в алюминий, составило на 41,7%.

Испытания на изгиб проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 3382 со скоростью нагружения 1 мм/мин в соответствии с ГОСТ 14019-2003. Результаты эксперимента показали, что включение графита в состав материала способствует увеличению предельных нагрузок при изгибе и максимальной деформации, которые может выдержать материал (табл. 5).

Табл. 5. Результаты испытания на изгиб

Образец	Состав	Нагрузка (кгс)	Напряжение (МПа)	Деформация при изгибе (пик нагрузки) (%)
1	АД0	57,2	170,0	40,47
2	1%С + 1%Cu	62,2	184,2	39,75

При практически сохраненных показателях деформации, уровень выдерживаемых напряжений стал выше на 8,3%

Твердость по Бринеллю производилась на твердомере Emco-test type Dura Vision, используя шарики диаметром  $D = 2,5$  мм и нагрузкой  $P = 62,5$  (613) кгс (Н). По данным расчетов, отмечается прирост в 16,9% значения твердости для КМ по сравнению с АД0.

Измерения микротвердости проводились на микротвердомере Emco-test Dura Scan 70 сила вдавливания составила 0,1 кг. Продолжительность выдержки была принята стандартной для цветных металлов, т.е. 30 с.

Полученные результаты сведены в таблицу 6.

Табл. 6. Значения микротвердости для исследуемых образцов материала по шести точкам.

Состав образца	Микротвердость, HV
AK12M4Mг	73,4±3
АД0	29±0,3
АД0+1%С+1%Cu	36,3±6,3
AK12M4Mг + 1%С+1%Cu	81,74±6,2

По результатам исследования, можем судить об увеличении твердости при добавлении графита. Для матрицы АД0 это увеличение составляет 25,17%, а для АК12М4Мг 11,36%.

На основе полученных результатов можно сделать следующие **выводы**.

Путем жидкофазного совмещения, получен композиционный материал алюмо-графитной композиции с наполнением 1%С+1%Cu, как на основе

алюминия, так и на основе сплава АК12М4Мг. Анализ структуры демонстрирует успешность введения и распределения графита. По результатам испытания на сжатие удалось получить увеличение предела текучести на 41,7%, по результатам испытаний на изгиб выдерживаемые напряжения увеличились на 8,3%. Прирост твердости в среднем составил 16,9%.

Таким образом, в ходе исследований, жидкофазным методом получена алюмо-графитная композиция. Наличие в составе 1% графита подтверждено структурными исследованиями, а эффект армирования выражен в приросте твердости и прочности.

### Список литературы

1. Artyukh V.A., Yusupov V.S., Zelensky V.A., Kholin M.S., Fakhurtdinov R.S. Structural characteristics of a mechanically alloyed Al-Fe powder composite // *Inorganic materials: applied research*. 2017, no. 8(3), pp. 459-463.
2. Puchkov Y.A., Berezina S.L. Use of the theory of hardening factor for predicting the properties of articles from heat-hardenable aluminum alloy V91 // *Metal science and heat treatment*. 2014, no. 56(3-4), pp. 131-136.
3. Shalaby E.A., Churyumov A.Y., Besisa D.H., Daoud A., El-khair M.A. A Comparative study of thermal conductivity and tribological behavior of squeeze cast A359/AlN and A359/SiC composites // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017, no. 26(7), pp. 3079-3089. DOI: 10.1007/s11665-017-2734-3.
4. Kurganova Y.A., Kolmakov A.G., Itszin' Chen', Kurganov S.V. Study of mechanical characteristics of advanced aluminum-matrix composites reinforced with sic and  $Al_2O_3$ . // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 157-160.
5. Kurganova Y.A., Shcherbakov S.P., Chen Y., Lopatina Y.A. Evaluation of the behavior of promising aluminum-matrix composite materials under impact loading conditions // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020, vol. 62, no. 1-2, pp. 174-178.
6. Луц А.Р., Закамов Д.В. Применение алюмоматричных композиционных материалов, дисперсно армированных керамическими частицами, для изделий триботехнического назначения // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2019. – №5(26). – С. 82-86.
7. Ларионова Т.В., Маркина Н.В., Петров Н.В., Шаповалов О.С., Афанасьев А.А., Кольцова Т.С. Структура и твердость композиционных материалов медь-углерод // *Вестник Новгородского государственного университета*. – 2012. – № 68. – С. 15-19.
8. Михлик В.М., Курганова Ю.А., Новиков И.С., Виноградов Д.В. Разработка алюмоматричного композиционного материала с добавлением дисперсных частиц графита, работающего в условиях повышенного трения // *Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика. Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции*. – Уфа, 2022. – С. 132-149.
9. Чекин Р.В., Курганова Ю.А., Смирнов А.Е., Карпухин С.Д. Исследование возможности получения волокнистых алюмоматричных композиционных материалов, армированных углеродом. Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – Т. 20, № 6. – С. 277-281.
10. Патент №2755353 РФ. Композиционный материал на основе алюминия или алюминиевого сплава и способ его получения / Ю.А. Курганова, И. Чэнь. – Заявка №2020134417 от 20.10.2020; опубл. 15.09.2021.

### Сведения об авторах:

*Михлик Владислав Михайлович* – магистрант;

*Курганова Юлия Анатольевна* – д.т.н., доцент, профессор кафедры “Материаловедение”;

*Калачев Андрей Олегович* – магистрант.

## РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ДЕМОНСТРАТОРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ПРИМЕРЕ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД

*Болотеин А.Н., Юрков Д.С., Головкин А.С., Фролов С.С., Василенкова Е.М.  
Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, Рыбинск*

**Ключевые слова:** цифровой двойник, параметризация, автоматизированное проектирование, инновационные технологии.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с процессом разработки цифрового двойника малоразмерного газотурбинного двигателя. Предлагается структурная схема построения и функционирования цифрового двойника. Анализируются перспективы внедрения цифровых двойников на основе отечественных систем автоматизированного проектирования в процессы образования и повышения квалификации высших учебных заведений, а также в производственные процессы на предприятиях авиадвигателестроения.

## DEVELOPING OF A DIGITAL TWIN EDUCATIONAL DEMONSTRATOR USING THE EXAMPLE OF A SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE

*Bolotein A.N., Yurkov D.S., Golovkin A.S., Frolov S.S., Vasilenkova E.M.  
P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk*

**Keywords:** digital twin, parameterization, computer-aided design, innovation technologies.

**Abstract.** The article discusses issues related to the process of developing a digital twin of a small-sized gas turbine engine. A block diagram of the construction and functioning of a digital twin is proposed. The prospects of introducing digital twins based on domestic computer-aided design systems into the processes of education and advanced training of higher educational institutions, as well as into production processes at aircraft engine manufacturing enterprises are analyzed.

Проектирование любого технически сложного изделия, а в особенности газотурбинного двигателя, – трудоемкий, многоступенчатый и многогранный процесс, требующий от специалистов глубоких знаний принципов работы двигателя, практического опыта в области инженерных расчётов и конструирования. В настоящее время задачи проектирования решаются с применением соответствующих автоматизированных систем. Однако эффективная работа в этих системах также требует наличия опыта и хороших практических навыков. В современных реалиях производство столкнулось с дефицитом специалистов такого рода, а разрыв поколений инженеров делает проблему передачи знаний ещё более острой. Сложности вызывает и получение практических навыков в процессе обучения, так как далеко не все вузы могут себе позволить исследовать реальные двигатели и проводить их натурные испытания.

Ситуацию можно улучшить с применением в процессе производства и подготовки специалистов цифровых двойников изделий [1]. Например, цифрового двойника малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД), разрабатываемого РГАТУ имени П.А.Соловьева совместно с ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», АО «Аскон» и ООО НТЦ «АПМ».

Выбор в качестве объекта исследования МГТД не случаен. Такие типы двигателей достаточно востребованы и широко применяются в качестве основных и вспомогательных силовых установок для транспортных средств различного назначения (воздушного, наземного, водного и т.п.). Они достаточно хорошо изучены и имеют более простую конструкцию по сравнению с полноразмерными двигателями. Это упрощает процесс разработки их цифровых двойников, делает его более наглядным, позволяет быстро и легко проверять имеющиеся расчётные алгоритмы и математические модели и адаптировать их для использования в цифровых двойниках.

Цифровой двойник – это виртуальная копия реального объекта, системы или процесса, которая имитирует его поведение, позволяет моделировать различные ситуации и принимать решения без риска для оригинала.

Одним из основных преимуществ использования цифровых двойников является возможность быстрой и эффективной проверки новых идей и решений без необходимости проведения дорогостоящих и длительных экспериментов в реальных условиях. Кроме того, цифровые двойники позволяют собирать и анализировать большие объемы данных, что повышает качество и обоснованность принятия конструкторских решений.

В машиностроении и двигателестроении перспективы применения цифровых двойников обусловлены целым рядом преимуществ, которые они дают по сравнению с традиционными методами проектирования и производства. Цифровые двойники позволяют создавать более точные и детализированные модели изделий. Их можно использовать для оптимизации процессов на всех этапах жизненного цикла изделия от проектирования до эксплуатации. Кроме того, цифровые двойники могут быть интегрированы с другими перспективными технологиями, такими как искусственный интеллект и машинное обучение [2].

Однако, несмотря на все преимущества, использование цифровых двойников также имеет некоторые недостатки. К ним относится необходимость наличия достаточно подробной и точной информации о моделируемом объекте, затраты на оборудование и программное обеспечение, а также на обучение персонала навыкам и технологиям работы с ним. Несмотря на это, цифровые двойники являются важным инструментом для оптимизации процессов и повышения эффективности производства, их перспективность в машиностроении неоспорима, а их использование будет только расти [2].

К основным задачам, которые могут быть решены с помощью разрабатываемого цифрового двойника МГТД можно отнести:

- изучение и освоение новых технологий и конструкций;
- поиск и выявление потенциальных проблем в конструкции;
- быстрое внесение необходимых корректировок в конструкцию;
- повышение уверенности в долговечности и эффективности конструкции;
- увязка отдельных расчётных методик в рамках единой конструкции;
- установление связи между проектными параметрами и эксплуатационными характеристиками.

На рисунке 1 представлена структурная схема построения и функционирования разрабатываемого цифрового двойника. В соответствии с



этой концепцией цифровой двойник реализуется на основе специализированного программного обеспечения, осуществляющего интегрированное взаимодействие и обмен данными между CAD- и САМ-системами на основе исходных данных, заданных расчётчиком. В CAD-системе происходит создание 2D-модели продольного разреза двигателя, 2D- и 3D-моделей его деталей и модели общей сборки. Для всех моделей должна быть предусмотрена параметризация. Необходимый набор параметров для моделей цифрового двойника формируется на основе существующих для МГТД алгоритмов и методик расчёта центробежных и осевых компрессоров, турбин, камер сгорания и т. д. и соответствующих математических моделей.

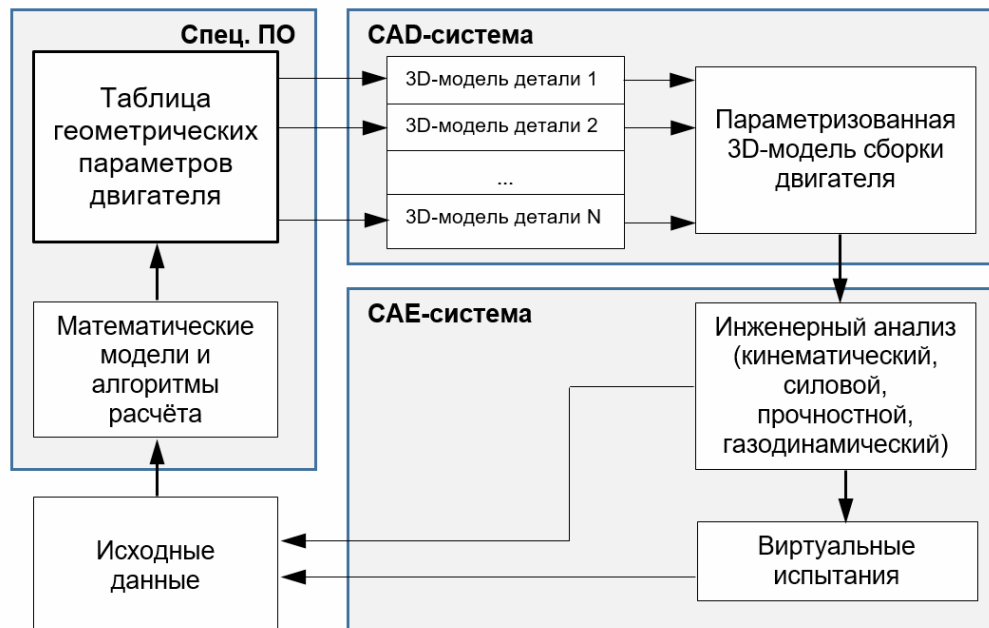


Рис. 1. Структурная схема функционирования цифрового двойника

Большинство подобных проектов, известных в настоящее время, ориентируются на зарубежные системы, применение которых в существующих экономических и политических условиях является весьма сложным или невозможным. При этом некоторые современные российские системы автоматизированного проектирования и инженерного анализа во многом не уступают зарубежным и могут составить им достойную конкуренцию. В рамках работы над проектом были использованы САПР Компас 3D (АО «Аскон») и АРМ WinMachine (ООО НТЦ «АПИМ»).

На текущий момент в рамках проекта были разработаны схемы геометрической параметризации проточной части двигателя и его основных деталей (рис. 2). Сформированы электронные таблицы параметров деталей с привязкой к их геометрии. Созданы 2D- и 3D-модели деталей двигателя (рис. 3). Выполнена 3D-модель его общей сборки в САПР Компас 3D (рис. 4). Все модели параметризованы, а часть из них оптимизирована для выполнения необходимых инженерных расчётов в соответствующих САЕ-системах [3].

Параметризация моделей позволяет за короткое время проанализировать различные варианты сочетаний исходных данных и соответствующие им конструкции проектируемого изделия, позволяет заранее избежать

принципиальных ошибок в его структуре и размерах, а также гибко модифицировать (видоизменять) конфигурацию моделей.

Имя	Выражение	Значение	Плоск.
p2d_d2per_cs	144.5	144.5	
p2d_d0v1_cs	126.3	126.3	
p2d_d0per_cs	134	134	
p2d_d7v1_cs	70.8	70.8	
p2d_d7per_cs	101.9	101.9	
p2d_d8_cs	108.7	108.7	
p2d_d0_cs	8.5	8.5	
p2d_d1_cs	106.6	106.6	
p2d_d2_cs	98.1	98.1	
p2d_d3_cs	70.1	70.1	
p2d_d4_cs	28	28	
p2d_graph_dkcs	174.85	174.85	
p2d_tvd_Dvt1	70.8	70.8	
p2d_tvd_Dper1	101.9	101.9	
p2d_tvd_Dvt2	69.4	69.4	
p2d_tvd_Dper2	103.8	103.8	
p2d_tvd_Dvt4	68	68	
p2d_tvd_Dper4	105.7	105.7	
p2d_tvd_Lasa	36.1	36.1	
p2d_tvd_Lark	19.5	19.5	
p2d_tvd_Zak	17	17	
p2d_tvd_Zrk	25	25	
p2d_graph_dxt	281.45	281.45	

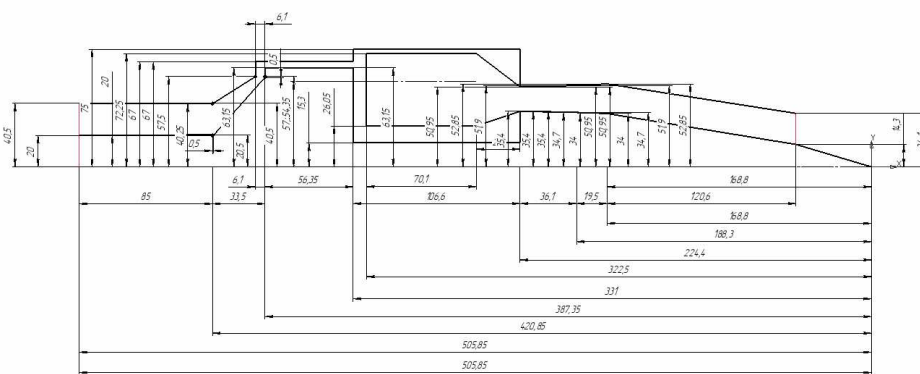


Рис. 2. Модель проточной части МГТД с таблицей параметров

Имя	Значение	Выражение
tvd_D1	9	9
tvd_H11	9.75	9.75
tvd_H12	2.1	2.1
tvd_H13	5.5	5.5
tvd_H14	10.75	10.75
tvd_HR2	2.1	2.1
tvd_HR3	5.5	5.5
tvd_HR4	10.75	10.75
tvd_HR5	6	6
tvd_v11	2.1	2.1
tvd_v12	4.7	4.7
tvd_v13	4.2	4.2
tvd_v14	6	6
tvd_vR1	2.1	2.1
tvd_vR2	4	4
tvd_vR3	4.2	4.2
tvd_vR4	4	4
tvd_vR5	3.5	3.5
tvd_R11	2	2
tvd_R12	1.5	1.5
tvd_R13	3.3	3.3
tvd_R14	3.3	3.3
tvd_R15	3	3
tvd_R16	3	3
tvd_R17	3	3
tvd_R18	1.3	1.3
tvd_R19	0.5	0.5
tvd_R110	1	1
tvd_R111	0.5	0.5

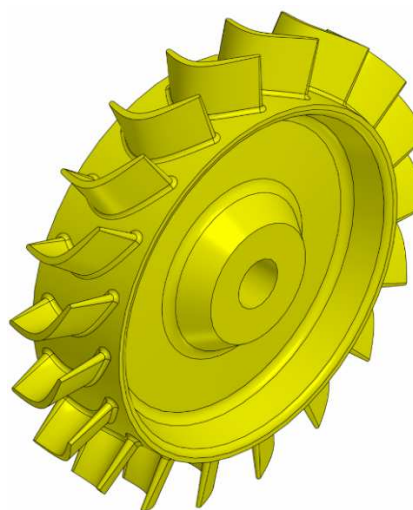
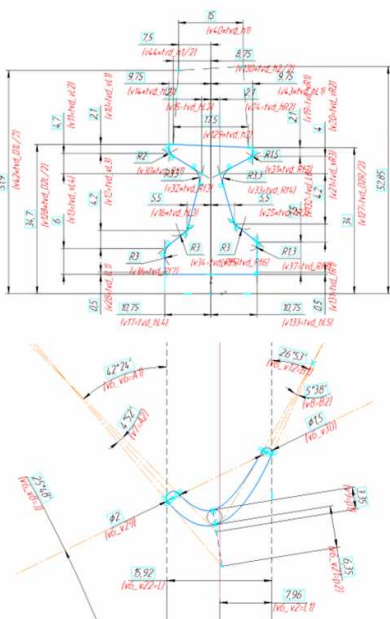


Рис. 3. Модель рабочего колеса турбины с таблицей параметров

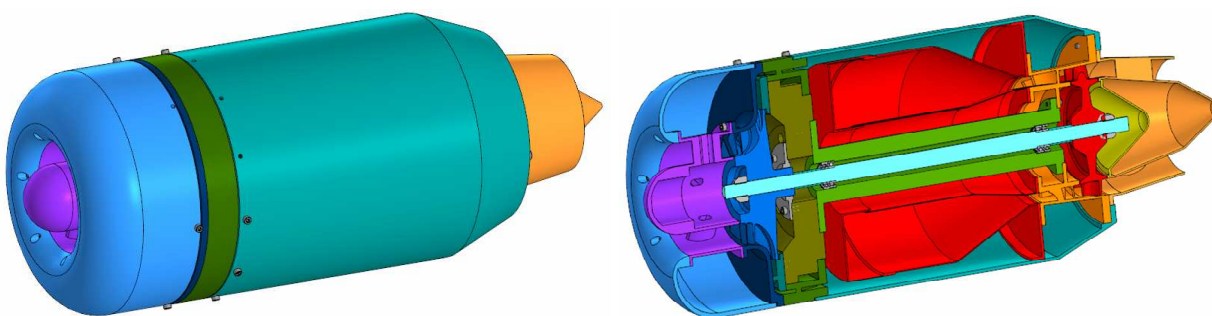


Рис. 4. Параметризованная 3D-модель МГТД

На основе созданных CAD-моделей средствами 3D-печати был изготовлен макет МГТД в масштабе 1:1, который используется в процессе обучения для наглядной демонстрации конструкции и принципов работы двигателя [4]. Демонстратор можно подробно рассмотреть, привести в движение или разобрать на детали, как в реальном, так и в виртуальном варианте. Основная задача демонстратора – проанализировать потенциал и определить возможные направления развития технологии «цифровых двойников» и других цифровых

технологий, например, системы управления требованиями и расчетными данными, автоматизации и сквозного проектирования, супервычислений и т.д.

В перспективе развития проекта предполагается доработка геометрических и математических моделей, а также создание программного обеспечения для удобного взаимодействия с ними. Совершенствование цифрового двойника даст возможность его практического применения в учебном процессе, в научных исследованиях и в производстве при проектировании изделий подобного типа. В учебном процессе применение цифрового двойника позволит разработать специализированные курсы и учебные материалы, ориентированные на максимальное использование отечественного инженерного программного обеспечения. Это позволит заложить фундамент конструкторской и технологической независимости отрасли еще на этапе подготовки кадров.

### Список литературы

1. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс] // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. – Режим доступа: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>.
2. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – №4. – С. 35-43. – doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35.
3. Демонстратор цифрового двойника в облике малоразмерного газотурбинного двигателя на базе отечественного программного обеспечения: первые результаты работы и перспективы развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ascon.ru/news\\_and\\_events/news/3721](https://ascon.ru/news_and_events/news/3721).
4. Проектирование авиадвигателей с использованием «цифровых двойников». Мастер-класс ЦИАМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ciam.ru/press-center/news/tsiam-provel-master-klass-po-proektirovaniyu-aviadvigatelay-s-ispolzovaniem-tsifrovyykh-dvoynikov>.

### Сведения об авторах:

*Юрков Даниил Сергеевич* – студент;

*Фролов Сергей Сергеевич* – студент;

*Василенкова Екатерина Максимовна* – студент;

*Головкин Антон Сергеевич* – студент;

*Болотеин Алексей Николаевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры Прикладной механики.

Научное периодическое издание

# **Механика и машиностроение. Наука и практика:**

**Материалы международной  
научно-практической конференции**

№6

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 6,28.

Подписано в печать 08.12.23г. Заказ №23-25.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/mimnip.html>

<https://doi.org/10.26160/2658-6185-2023-6>

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

*Главный редактор:* Жуков Иван Алексеевич.

*Редакция:* Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,  
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru/spbf/>

E-mail: [spbf@srcms.ru](mailto:spbf@srcms.ru)