

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**

№7

Санкт-Петербург, 2024

УДК 531 : 621.01
ББК 34.4
М55

М55 Механика и машиностроение. Наука и практика:
Материалы международной научно-практической конференции.
– Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – №7. – 176 с. – DOI:
10.26160/2658-6185-2024-7.

Представлены материалы VII международной научно-практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика» (27 ноября 2024г.). 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, 2024
© НИЦ МС, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Механика деформируемого твердого тела

Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Али И., Бараненко А.В. Особенности распределения напряжений и деформаций при работе на изгиб элементов силовой рамы авиационных передвижных электроагрегатов	6
Бобылев А.А., Завойчинская Э.Б., Каблин А.Р. Задача о вынужденных колебаниях упругого стержня в экспериментальных методах исследований усталости конструкционных материалов.....	9
Гончарова Г.Ю., Туралин Д.О., Королев И.А. Исследование прочностных свойств ледовых материалов, модифицированных поливиниловым спиртом.....	12
Гараников В.В., Корнильев Е.О. Проверка физической достоверности трехмерных определяющих соотношений теории упругопластических процессов на пространственных траекториях нагружения	18
Петушков В.А. Моделирование предельных состояний и прогнозирование ресурса повреждаемых неоднородных элементов конструкций	23
Першуткин Н.В., Федорова А.А. Обзор конструкций экзоскелетов для поддержки спины	31

Динамика и прочность машин

Бохонский А.И., Варминская Н.И. Время и энергия оптимального перемещения упругого объекта из исходного в конечный абсолютный покой.....	34
Лазарев А.Д. Уточнение методики расчета сварных соединений деталей секции скребкового конвейера методом конечных элементов	38

Мехатроника и робототехника

Сковпень С.М., Лобанов Н.В., Малыгин Н.И. Метод цифрового управления одноприводными мехатронными устройствами с разветвлённой системой подач	43
Нгуен Дык Ань, Чан Ван Тунг. Решение для интеллектуального мониторинга и управления анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV на основе интернета вещей	49
Тикунов А.В., Бурковский А.В., Писаревский Ю.В., Титова Л.Н., Черных Т.Е., Писаревский А.Ю. Повышение энергоэффективности электродвигателя винтомоторной группы мультироторного беспилотного летательного аппарата.....	54
Веригин А.Н., Коробчук М.В., Ишутин А.Г., Саенко С.С. Мехатронный технологический комплекс как объект исследований	58

Технология машиностроения

Клуонис А.С., Плотников С.А. Трибологические характеристики концевой твердосплавной фрезы с поверхностным покрытием TiAlN.....	63
Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Зарубина Ал.С., Зарубина Ан.С. Статистическое исследование качества слитков титановых сплавов для различных областей промышленности	66
Синюков М.С. Магнитно-абразивная обработка плоскоовальных труб	69
Муравьев Д.В. Технология закалки в штампе при производстве поршневых пальцев тепловозных дизелей	72
Бабин С.В., Прокофьев Е.Ю. Особенности фрезерования криволинейных поверхностей концевыми фрезами	79
Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Хуснетдинов Т.Р., Карлявин А.М. Перспективные методы электромеханической обработки резьбы.....	83
Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Блохин В.Б., Кожевников В.Ю., Осинников И.В. Исследование формирования регулируемого микрорельефа на изделиях, полученных методом селективного лазерного сплавления, с применением копировально-прошивной электроэрозионной обработки	87
Шлыков Е.С., Блохин В.Б., Абляз Т.Р., Легостаев Н.С., Осинников И.В. Исследование влияния режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки на обеспечение точности при обработке жаропрочного никелевого сплава BV751П.....	90
Землянушнова Н.Ю., Землянушнов Н.А., Малыхин В.Д. Способ упрочнения пружин по внутренней поверхности витков	94
Сорокопуд Н.И. Магнитно-абразивная обработка как средство для улучшения качества сварочных соединений поверхностей из сплава АМц.....	97

Машины, агрегаты и процессы

Каюмов У.Э., Джураев Р.У., Пардаева Ш.С. Разработка метода оценки эффективности водоразбрызгивающих форсунок охлаждающей системы стационарной компрессорной установки горного предприятия....	102
Лукьянов А.С., Стариков А.И., Дмитриев Н.А. изнашивание узла трения ось-втулка шкива клиноременного вариатора	106
Стариков А.Н. Механика протектора шин.....	109
Москвина Д.С., Кувшинкин С.Ю. Выемочно-транспортирующие машины: их виды и ведущие производители.....	115
Туманян Х.А. Исследование струйной техники в междисциплинарных областях путем применения компьютерного моделирования.....	119

Коровкин Н.В., Железняк В.Н., Бекузин В.И. Попарная группировка целевых функций для решения задач многокритериальной оптимизации электрических машин	124
Новоженкин А.Ю. Прогнозирование остаточного ресурса зубчатой передачи мультипликатора	127
Кудусов Д.И. Повышение эффективности работы сепаратора жидкой смеси, воспроизводимой эталоном расхода	131

Аддитивные технологии и производство

Каткова Е.Д., Терентьева З.С. Выбор порошковых материалов производства ЕС и КНР, применяемых в технологии селективного лазерного плавления, на основе гранулометрического анализа	134
Огородников А.И., Аль.Коаерджи Мозан А.М. Интеграция конструкционной бионики и аддитивных технологий при проектировании корпусных деталей	139
Александрова Е.П., Наплавкова К.С., Сергеева В.М. Влияние комбинированных процессов WAAM и формообразования на прочность и пластичность металлических деталей.....	142
Щапов Г.В., Казанцева Н.В., Царьков А.В. Влияние параметров сварки трением с перемешиванием на структуру, механические свойства и образование дефектов в сварных соединениях алюминиевого сплава АМг5	146

Экономика и организация машиностроительного производства

Ураскин Е.А., Хаймович И.Н., Гречников Ф.А. Формирование автоматизированного рабочего места технолога в системе технологической подготовки производства	149
--	-----

Инновационные проекты в машиностроении

Азимов А.М., Храпенкова Е.С. К проблеме повышения эффективности дробления горной породы гидро-, пневмомолотами.....	153
Алиева Л., Удальцова А.В. К разработке нового технического решения индентора безлезвийного бурового инструмента.....	158
Хадеев Р.Г. Автомобиль без коробки скоростей и механизма сцепления	166
Андрейчук Н.А. Мониторинг температурных погрешностей станков с числовым программным управлением с помощью волоконно-оптических датчиков на Брэгговских решетках	170
Злотников Е.Г., Гильвитинов М.О., Дзюба А.А. Режущая керамика в металлообработке: инновации и практика	173

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАБОТЕ НА ИЗГИБ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ РАМЫ АВИАЦИОННЫХ ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ

Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Али И., Бараненко А.В.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж

Ключевые слова: деформация, напряжение, опасное сечение, теория упругости, прямоугольные координаты, система дифференциальных уравнений.

Аннотация. В работе рассмотрены особенности работы на изгиб элементов силовой рамы передвижных электроустановок в предположении механики сплошных сред, определяющих напряжения и деформаций вдоль всего элемента рамы. Проводится сравнительный анализ результатов расчёта с использованием аппарата сопротивления материалов и теории упругости. Даются результаты расчета изучаемых силовых элементов.

FEATURES OF STRESS AND DEFORMATION DISTRIBUTION DURING BENDING WORK OF POWER FRAME ELEMENTS OF AIRCRAFT MOBILE ELECTRIC UNITS

Penkov N.A., Sidorkin O.A., Ali I., Baranenko A.V.

*Military Educational and Scientific Centre of the Air Force
N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh*

Keywords: deformation, stress, dangerous section, elasticity theory, rectangular coordinates, system of differential equations.

Abstract. The paper examines the features of bending work from the elements of power frame mobile electrical installations under the assumption of mechanics continuous media, determining stresses and deformations along the entire frame element. A comparative analysis of the calculation results is carried out, using the apparatus of resistance materials and the theory of elasticity. The results of the calculation of the studied force elements are given.

При определении прочностных показателей силовой рамы специальной техники необходимо количественное определение потенциальных мест зарождения трещин в несущей конструкции [1]. Часто, для этих целей использование аппарата сопротивления материала оказывается недостаточно. Экспериментальные исследования показывают, что фактическое место зарождения трещин в силовой конструкции отличается от расчетного. Для более детального рассмотрения напряженно-деформированного состояния таких элементов целесообразно использовать аппарат механики сплошных сред [2].

В качестве модели рассматриваемого элемента рамы рассмотрим консоль, имеющую узкое прямоугольное поперечное сечение единичной толщины и изгибаемую силой P , приложенной на конце (рис. 1).

Решение задачи будем проводить с использованием функции напряжения Эри (G.B. Airy). Вводится прямоугольная декартова система координат так, как представлено на рисунке 1.

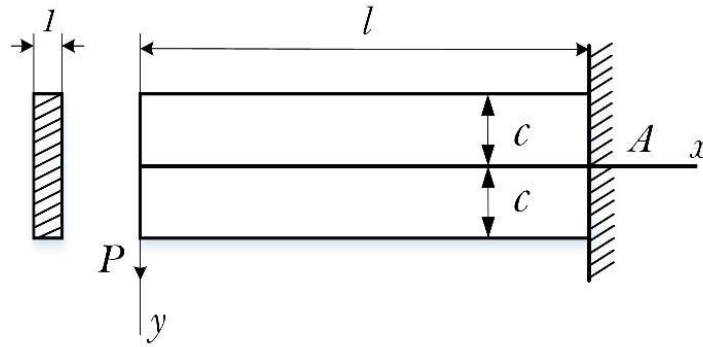


Рис. 1. Модель нагрузки элемента рамы

Верхняя и нижняя грани рассматриваемой консоли свободны от нагрузки, на торце (горизонтальная ось симметрии рассматриваемого элемента конструкции: $x = 0$) распределены касательные усилия, имеющие результирующую силу $-P$. Этим условиям нагружения можно удовлетворить, выбрав надлежащую комбинацию напряжений чистого сдвига с напряжениями [3]. В этом случае можно заметить, что такое напряженное состояние описывается функцией Эри (ϕ_4 , где индекс обозначает степень используемого полинома) в виде:

$$\phi_4 = \frac{a_4}{12}x^4 + \frac{b_4}{6}x^3y + \frac{c_4}{2}x^2y^2 + \frac{d_4}{6}xy^3 + \frac{e_4}{12}y^4, \quad (1)$$

где неизвестные константы a_4 , b_4 , c_4 , d_4 , e_4 подлежат определению, y – вертикальная ось координат при описании рассматриваемой модели.

Для рассматриваемого напряженного состояния полагаем значения растягивающих компонент тензора напряжений (σ_x , σ_y) и касательной составляющей (τ_{xy}) в виде:

$$\sigma_x = d_4xy, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = -b - \frac{d_4}{2}y^2, \quad (2)$$

где b – численное значение касательного усилия при чистом сдвиге.

В качестве граничных условий, чтобы продольные края рассматриваемой консоли были свободны от усилий, полагаем:

$$(\tau_{xy})_{y=\pm c} = -b - \frac{d_4}{2}c^2 = 0, \quad (3)$$

где c – половина значения толщины рассматриваемой рамы.

Для связи величины касательного усилия с записанными компонентами тензора напряжений проинтегрируем их по всей площади поперечного сечения:

$$-\int_{-c}^c \tau_{xy} dy = \int_{-c}^c \left(-b - \frac{b}{c^2} y^2 \right) dy = P. \quad (3)$$

Из записанного соотношения определяем значения неизвестных коэффициентов в функции Эри:

$$d_4 = -\frac{2b}{c^2}, b = \frac{3}{4} \frac{P}{c}. \quad (4)$$

Возвращаясь к определению компонент напряжений, получим:

$$\sigma_x = -\frac{P}{l}xy, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = -\frac{P}{2l}(c^2 - y^2). \quad (5)$$

Полученное решение соответствует элементарному, полученному в предположениях сопротивления материалов. Однако, это решение является точным лишь в случае, когда касательные усилия на конце распределяются по тому же параболическому закону, что и касательные напряжения τ_{xy} и интенсивность нормальной силы в заделке пропорциональна величине y . Если усилия на конце распределяются иным образом, распределение напряжений (5) не является точным. Но если принять принцип Сен-Венана, то оно может считаться удовлетворительным для поперечных сечений, достаточно удаленных от этого конца.

Для определения компонент деформации и перемещения воспользуемся соотношениями обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} = \frac{\sigma_x}{E}, \varepsilon_y = \frac{dv}{dy} = -\frac{\nu\sigma_x}{E}, \gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (6)$$

где u, v, w – главные компоненты тензора перемещений, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ – компоненты главных значений тензора деформаций, E – модуль Юнга, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона.

Далее, определяя значение перемещений свободного конца рамы, $v|_{y=0} = \frac{Px^3}{6EI} - \frac{Pl^2x}{2EI} + \frac{Pl^3}{3EI}$, получим уравнение изогнутой оси балки.

Таким образом, при определенных видах нагружения решения, даваемые сопротивлением материалов, оказываются вполне применимыми. Однако, для наиболее общего рассмотрения характера нагружения силового элемента авиационного передвижного электроагрегата, необходим расчет модели изучаемого силового элемента производить в предположениях механики сплошных сред.

Список литературы

1. Скребов Н.Н., Тюнин А.Б., Шуклин И.К. Средства электроснабжения воздушных судов. – Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2021. – 393 с.
2. Timoshenko S.P. Strength of materials P.1. Elementary theory and problems. – NY: D.Van Nostrand company, 1930. – 365 p.
3. Airy G.B. British Associated Advanced Science. – London: Rept., 1862. – 18 p.

Сведения об авторах:

Пеньков Никита Алексеевич – д.т.н., доцент, доцент кафедры;

Сидоркин Олег Анатольевич – к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры;

Али Исмаил – соискатель.

Бараненко Андрей Васильевич – соискатель.

ЗАДАЧА О ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бобылев А.А., Завойчинская Э.Б., Каблин А.Р.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Ключевые слова: кривая усталости, частота нагружения, резонанс, вынужденные колебания, многоцикловая и гигацикловая усталость, хрупкое разрушение, продольные и крутильные колебания.

Аннотация. На основе решения задач о вынужденных продольных и поперечных колебаниях упругого стержня прямоугольного и корсетного сечений приводятся формулы для нахождения амплитуд напряжений. Определяются собственные частоты и частоты резонансных колебаний стержня прямоугольного сечения. Показывается, что в известных экспериментах по много- и гигацикловой усталости состояний резонанса в образцах не возникает. При заданной частоте нагружения кривая усталости по макроразрушению в областях много- и гигацикловой усталости является единой непрерывной кривой.

THE PROBLEM OF FORCED VIBRATIONS OF AN ELASTIC ROD IN EXPERIMENTAL METHODS OF FATIGUE STUDIES OF STRUCTURAL MATERIALS

Bobylev A.A., Zavoychinskaya E.B., Kablin A.R.

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Keywords: fatigue curve, loading frequency, resonance, forced oscillations, high and very high cycle fatigue, brittle failure, longitudinal and torsional oscillations.

Abstract. Formulas for finding stress amplitudes are given on solving problems of forced longitudinal and transverse vibrations of an elastic rod of rectangular and corset sections. The eigen frequencies and resonant vibration frequencies of a rectangular rod are determined. It is shown that in well-known experiments on high- and very high cycle fatigue, resonance states do not occur in samples. At a given loading frequency, the fatigue curve is a uniform continuous curve in the areas of high- and very high cycle fatigue.

Кривая усталости по макроразрушению при одночастотном симметричном одноосном нагружении описывается функцией трех независимых переменных: $\sigma_a^* = \sigma_a^*(\omega, N, T)$, где σ_a^* – амплитуда напряжения при разрушении, ω – круговая частота ($\omega = 2\pi\nu$, ν – частота нагружения), N – число циклов до разрушения, T – температура, и является единой непрерывной кривой по каждой из переменных в областях много- ($N \in (10^4; 10^6)$ циклов) и гигацикловой ($N \in (10^6; 10^{11})$) циклов усталости.

При построении кривых усталости, в особенности в гигацикловых областях, в связи с большой продолжительностью испытаний возникает необходимость применения методов ускоренных испытаний [1-6]. В экспериментах при симметричном осевом нагружении задается амплитуда перемещений одного из концов образцов переменного сечения u_a , другой конец

остается свободным. Амплитуду напряжения σ_a^* авторами предлагается определять из условия возникновения в образце резонансных продольных колебаний. Подбирается т.н. «резонансная» длина образца, которая, например, для прямоугольного сечения представляется в виде: $L = \frac{\pi}{\omega^*} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (E – модуль

Юнга, ρ – плотность материала), и дается алгоритм нахождения σ_a^* при разрушении. В экспериментах при симметричном кручении задается угловая ультразвуковая вибрация с амплитудой φ_a одного из концов образцов переменного сечения, другой конец остается свободным. «Резонансная» длина образца в этом случае для прямоугольного сечения имеет вид: $L = \frac{\pi}{\omega^*} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (G –

модуль сдвига). Условия этих экспериментов соответствуют двум известным постановкам краевых задач о колебаниях упругого стержня, а именно: задаче о вынужденных колебаниях при циклическом осевом перемещении или крутильных колебаниях одного конца и задаче о вынужденных колебаниях с закрепленным концом при действии внешней периодической силы или момента. В данной работе анализируются решения этих задач. Показывается, что решения рассматриваемых задач совпадают. Резонансы, при которых имеет место бесконечное перемещение стержня прямоугольного сечения длины l , в рассматриваемых задачах возникают на следующих

частотах: $\omega^{pez.}_n = \frac{\pi(2n+1)}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, $n=0,1,2,\dots$. Задаваемая в опытах частота

вынужденных колебаний ω^* не является резонансной, как полагают авторы работ, а находится посередине между первой и второй резонансными частотами: $\omega^{pez.}_0 < \omega^* < \omega^{pez.}_1$. Таким образом, в экспериментах условий для резонанса не возникает.

В случае продольных колебаний амплитуда осевых напряжений имеет вид: для прямоугольного сечения – $\sigma_a = u_a \omega \sqrt{E\rho}$, для корсетного сечения – $\sigma_a = Eu_a \cos(kL_2) \cosh(\alpha L_1) \left[(k \tan(kL_2) + \tanh(\alpha L_1)) \cosh(\beta L_1) - \beta \sinh(\beta L_1) \right]$ где $2L_1$ – длина центральной части образца с переменным сечением радиуса r , $R_1 < r < R_2$; L_2 – длина каждой из частей прямоугольного сечения радиуса $r = R_2$ $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $k^2 = \frac{\omega^2}{a^2}$, $\alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh} \frac{R_2}{R_1}$, $\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}$. В случае поперечных колебаний амплитуда касательных напряжений представляется в таком виде: для прямоугольного сечения – $\tau_a = \varphi_a R \omega \sqrt{G\rho}$, для корсетного сечения – $\tau_a = GR_1 \varphi_a \cos(kL_2) \cosh(\alpha L_1) \left[(k \tan(kL_2) + \tanh(\alpha L_1)) \cosh(\beta L_1) - \beta \sinh(\beta L_1) \right]$; $c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$, $\alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh} \frac{R_2}{R_1}$, $\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2}$. Вычисленные таким образом

амплитуды σ_a^* и τ_a^* при разрушении в зависимости от числа циклов N и определяют экспериментальные кривые усталости.

В результате анализа обширного экспериментального материала можно выделить два класса металлов и сплавов: с не зависящими и зависящими от частоты усталостными свойствами. Для материалов второго класса при заданной частоте отсутствуют «бифуркационные участки» кривой усталости, наличие которых полагает А.А. Шанявский и др., «две ветви долговечности», которые рассматривали Л.Р. Ботвина и В.Ф. Терентьев. Кривая усталости не является «дуплексной кривой», как ее представляли Т.Sakai с коллегами, K.Shiozawa, S. Ishihara и др. В много- и гигацикловой областях не существует «эффекта дуальности кривой Велера», как это полагают О.Б. Наймарк с коллегами и описывают в предложенной ими модели усталостного разрушения.

У большинства материалов второго класса наблюдается упрочнение и увеличение пределов усталости при высоких частотах. Например, у низко- и среднеуглеродистых сталей это увеличение достигает 40%. Отсюда следует, что для таких материалов применение методов высокочастотных испытаний как методов ускоренных испытаний может привести к предсказанию пределов усталостной прочности и долговечности выше реальных. При этом для материалов с не зависящими от частоты усталостными свойствами есть возможность использования этих методов для оценки усталостной прочности.

Список литературы

1. Завойчинская Э.Б., Каблин А.Р. О много- и гигацикловой усталости металлов и сплавов // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 12. – С. 1736-1739. – DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56807.f241-23.
2. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle fatigue in mechanical practice. – New York: Dekker Publisher, 2005. – 304 с.
3. Schonbauer B.M., Yanase K., Chehrehrazi M., Endo M., Mayer H. Effect of microstructure and cycling frequency on the torsional fatigue properties of 17-4PH stainless steel // Materials Science & Engineering: A. 2021, vol. 801, pp. 1446-1455. DOI:10.1016/j.msea.2020.140481.
4. Стратула Б.А., Никитин А.Д. Сверхмногоцикловые усталостные испытания на кручение // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 179-182.
5. Найденкин Е.В., Солдатенков А.П., Мишин И.П., Оборин В.А., Шанявский А.А. Закономерности сверхмногоциклового усталостного разрушения титанового сплава BT22 // Физическая мезомеханика, 2021. – Т. 24, №2. – С. 23-33. – DOI: 10.24412/1683-805X-2021-2-23-33.
6. Sharma A., Min Chul Oh, Byungmin A. Recent Advances in Very High Cycle Fatigue Behavior of Metals and Alloys // Metals. 2020, vol. 10, p. 1200. DOI: 10.3390/met10091200.

Сведения об авторах:

Бобылев Александр Александрович – к.ф.-м.н., доцент;
Завойчинская Элеонора Борисовна – д.ф.-м.н., доцент;
Каблин Александр Романович – студент.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИВИНИЛОВЫМ СПИРТОМ

Гончарова Г.Ю., Туралин Д.О., Королев И.А.

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

Ключевые слова: лед, прочность, химически модифицированный лед, поливиниловый спирт, арктические материалы, ледовые переправы, автозимники.

Аннотация. Обоснована актуальность повышения прочностных характеристик водного льда, рассмотрен современный метод упрочнения льда внесением модифицирующих соединений. Проведены экспериментальные исследования прочностных свойств ледового материала с добавлением поливинилового спирта. Показано, что внесение поливинилового спирта в замораживаемый раствор способствует значительному упрочнению ледовой матрицы, определен оптимальный диапазон концентраций поливинилового спирта, соответствующий максимальному увеличению прочности льда на трехточечный изгиб.

STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF ICE MATERIALS MODIFIED WITH POLYVINYL ALCOHOL

Goncharova G.Yu., Turalin D.O., Korolev I.A.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: ice, strength, chemically modified ice, polyvinyl alcohol, arctic materials, ice crossings, winter ice roads.

Abstract. The relevance of increasing the strength characteristics of water ice is substantiated, a modern method of strengthening ice by introducing modifying compounds is considered. Experimental studies of the strength properties of ice material with the addition of polyvinyl alcohol are conducted. It is shown that the introduction of polyvinyl alcohol into the freezing solution contributes to a significant strengthening of the ice matrix, the optimal range of polyvinyl alcohol concentrations corresponding to the maximum increase in the strength of ice for three-point bending is determined.

Согласно современной стратегии развития Российской Федерации, освоение северных территорий является приоритетной задачей при решении вопросов обеспечения национальной безопасности. При этом важнейшим значением обладают проблемы развития логистики и транспортной инфраструктуры. Арктическая зона Российской Федерации характеризуется наличием большого количества отдаленных территорий, сухопутный доступ к которым возможен только посредством использования сезонных автодорог – зимников и ледовых переправ, функционирующих в зимний период. В настоящее время и в ближайшей перспективе не прослеживается альтернативы северным сезонным автодорогам. Использование воздушного транспорта не может обеспечить требуемые объемы массовых грузо- и пассажироперевозок, связано с большими расходами, как эксплуатационными, так и затратами на сами летательные аппараты и строительство аэродромов. Ограниченный период

навигации в северных регионах не позволяет широко применять водный транспорт для доставки грузов по рекам, при этом требуются дополнительные меры для дальнейшей транспортировки грузов до места назначения. Строительство круглогодичных автодорог и мостов ввиду их значительной протяженности, ограниченного срока эксплуатации и необходимости применения особых дорогостоящих материалов и технологий экономически нецелесообразно [1].

Эксплуатация сезонных автозимников ограничена зимним периодом, в течение которого климатические условия позволяют покрытию сохранять свою несущую способность. Продление периода эксплуатации сезонных дорог способствует значительному увеличению объемов грузоперевозок, в том числе мероприятий северного завоза, ускорению строительства и ввода в эксплуатацию объектов нефтегазодобычи в отдаленных районах, расширяет возможности северной транспортной инфраструктуры. При этом наиболее слабыми звеньями, работоспособность которых определяет срок службы всего автозимника, являются ледовые переправы, устраиваемые на замерзших реках, озерах, протоках. Водный лед, активно применяющийся в качестве конструкционного материала инженерных сооружений в арктической зоне, в особенности на объектах дорожной инфраструктуры, характеризуется доступностью, экологичностью, но вместе с тем недостаточной прочностью и высокой хрупкостью. Это обуславливает применение различных мер по повышению физико-механических свойств водного льда и разработке новых материалов на основе льда с улучшенными прочностными характеристиками.

Исследователями предлагались различные варианты повышения прочности льда, которые предполагают создание нового материала на основе водного льда в комбинации с различными добавками. По обобщенной классификации [2] методов упрочнения льда, в отличие от метода макроармирования, в котором предполагается добавление в ледовый материал различных протяженных элементов: сеток, настилов, полотен, различных природных и строительных материалов, метод микроармирования подразумевает создание однородного ледового композита. В последнем случае упрочнение ледовой матрицы происходит при воздействии на ее структуру водорастворимых химических соединений, нанодисперсных частиц и волокон, при этом возможны различные механизмы улучшения физико-механических свойств ледовой матрицы. Перспективно совместное использование методов упрочнения ледовой матрицы и внесения армирующих элементов [3].

Интересно отметить, что внесение химических соединений в ледовую матрицу изначально часто рассматривалось с позиции его антиобледенительных свойств, т.е. способности снижать прочность льда, и обширные исследования показали, что в общем случае внесение химических примесей способствует разупрочнению льда в различной степени [4]. Однако впоследствии при исследованиях ледовых структур покрытий для спорта высших достижений были разработаны рецептуры водорастворимых составов высокомолекулярных полимерных соединений, улучшающих трибологические свойства ледового массива, а также повышающих его прочность, снижающих хрупкость, трещино- и

снегообразование [5, 6]. Применяемые для упрочнения спортивного льда модифицирующие добавки характеризуются химической стабильностью, хорошей водорастворимостью, экологической безопасностью, высокой устойчивостью к воздействиям внешних факторов. При этом для срабатывания механизма упрочнения льда с добавлением высокомолекулярных полимеров концентрации вносимых соединений должны быть очень малы, и не превышать 1000 ppm. В этом случае в межкристаллическом пространстве ледовой матрицы происходит образование демпфирующей субстанции из гидратных оболочек, окружающих цепи макромолекул водорастворимого полимера. В результате образуется регулярная структура льда с характерным размером кристаллической фазы и прослойкой из связанной воды, что способствует значительному снижению интенсивности межкристаллических воздействий [7].

Перспективным полимерным соединением для модификации ледовых структур является поливиниловый спирт. Поливиниловый спирт представляет собой термопластичное полимерное соединение, растворимое в воде, способное к биodeградации, включенное в перечень биоразлагаемых материалов по ГОСТ Р 57432-2017, имеющее стоимость в несколько раз ниже, чем у биоразлагаемых полимеров микробиологического происхождения [8]. Биоразлагаемые композитные материалы на основе криогелей, сформированных из водных растворов ПВС и крахмала, рекомендуется применять для упрочнения верхних слоев почв [9]. В сфере аграрного хозяйства ПВС добавляют в составы к удобрениям и субстратам, что качественно улучшает состав почвы. Важными достоинствами поливинилового спирта, делающими его перспективным соединением для упрочнения ледовых покрытий объектов сезонной дорожной инфраструктуры, являются высокая прочность на разрыв, гибкость, хорошая пленкообразующая способность, водорастворимость, химическая стабильность, а также нетоксичность.

В данной работе проведено экспериментальное исследование прочностных свойств ледовых материалов с добавлением поливинилового спирта в различных концентрациях. Использовался полностью омыленный поливиниловый спирт марки 17-99. Водные растворы поливинилового спирта приготавливались в специальных емкостях, оснащенных циркуляционными насосами и позволяющими поддерживать температуру растворения вещества в воде на уровне 90°C. Для проведения прочностных испытаний по методике трехточечного изгиба изготавливались параллелепипедные ледовые образцы с габаритами: длина – 190 мм, ширина – 50 мм, высота – 20 мм. Образцы были получены послойным намораживанием приготовленных водных растворов в силиконовых формах, толщина каждого слоя составляла 2 мм, что характеризует реальные условия формирования ледовых массивов на ледовых переправах и автозимниках. Силиконовые формы для намораживания образцов размещались в климатической камере, температура воздуха в которой поддерживалась на уровне минус 15°C. Промежуток времени между двумя заливками слоев льда составлял 60 минут. Для проведения оценки эффекта изменения прочностных свойств ледовых материалов при их модифицировании поливиниловым спиртом были также изготовлены образцы из дистиллированной воды, с которыми проводилось

сравнение полученных характеристик. Для обеспечения корректности полученных результатов для каждого варианта концентрации поливинилового спирта изготавливалось по 5 ледовых образцов.

После завершения намораживания ледовые образцы извлекались из форм, упаковывались и выдерживались в климатической камере при температуре минус 15°C в течение 2 суток. С помощью штангенциркуля измерялись линейные габариты каждого ледового образца. Затем образцы испытывались на прочность методом трехточечного изгиба на испытательном стенде, оснащенный сервомеханическим силовым приводом, динамометром и датчиком перемещения. Скорость нагружения ледовых образцов подвижным пуансоном при испытаниях на трехточечный изгиб оставалась неизменной и составляла 0,5 мм/с. Значения перемещения пуансона и усилия на тензодатчике передавались на персональный компьютер, где затем были обработаны и преобразованы в диаграммы нагружения образцов. Установка для испытания ледовых образцов размещалась в климатической камере при температуре воздуха минус 15°C, что воспроизводило условия эксплуатации ледовых покрытий.

Прочность образцов на изгиб определялась по формуле (1):

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2}, \quad (1)$$

где P – максимальная нагрузка, испытываемая образцом; l – расстояние между опорами, составляющее 125 мм; b – ширина образца; h – высота образца.

Испытывались ледовые образцы, замороженные из водных растворов поливинилового спирта в 5 вариантах концентраций: 1000, 2500, 5000, 7500, 10000 ppm.

Для каждого варианта концентрации рассчитывалось среднее значение прочности ледовых образцов на изгиб, а также величины доверительных интервалов при доверительной вероятности ($p = 0,95$). Результаты прочностных испытаний ледовых образцов на изгиб отражены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты прочностных испытаний ледовых образцов на изгиб

Концентрация ПВС, ppm	0 (дистиллят)	1000	2500	5000	7500	10000
Средняя прочность на изгиб, МПа	1,35 ± 0,10	3,94 ± 0,51	4,48 ± 0,74	4,61 ± 0,48	4,89 ± 0,56	4,96 ± 0,55

На рисунке 1 показана зависимость средней прочности образцов на изгиб от концентрации поливинилового спирта, а также средняя прочность на изгиб испытанных образцов из дистиллированной воды.

Результаты прочностных испытаний демонстрируют, что при повышении концентрации ПВС средняя прочность льда на изгиб увеличивается. Наибольшее упрочнение льда происходило при добавлении в замораживаемый раствор поливинилового спирта в концентрации 10000 ppm (1%) – средняя прочность образцов на трехточечный изгиб превышала прочность дистиллята в 3,7 раз. Однако, можно заметить, что добавление поливинилового спирта уже в небольших концентрациях приводит к повышению прочности льда на трехточечный изгиб. Добавление 1000 ppm ПВС приводит к повышению

прочности льда на изгиб относительно дистиллята в 2,9 раз, 2500 ppm – в 3,3 раз. Отмечено пластифицирующее действие поливинилового спирта на ледовую матрицу и улучшение деформационных свойств льда. Добавление поливинилового спирта уменьшает хрупкость ледовой матрицы, это проявляется в изменении характера разрушения льда, который становится более вязким.

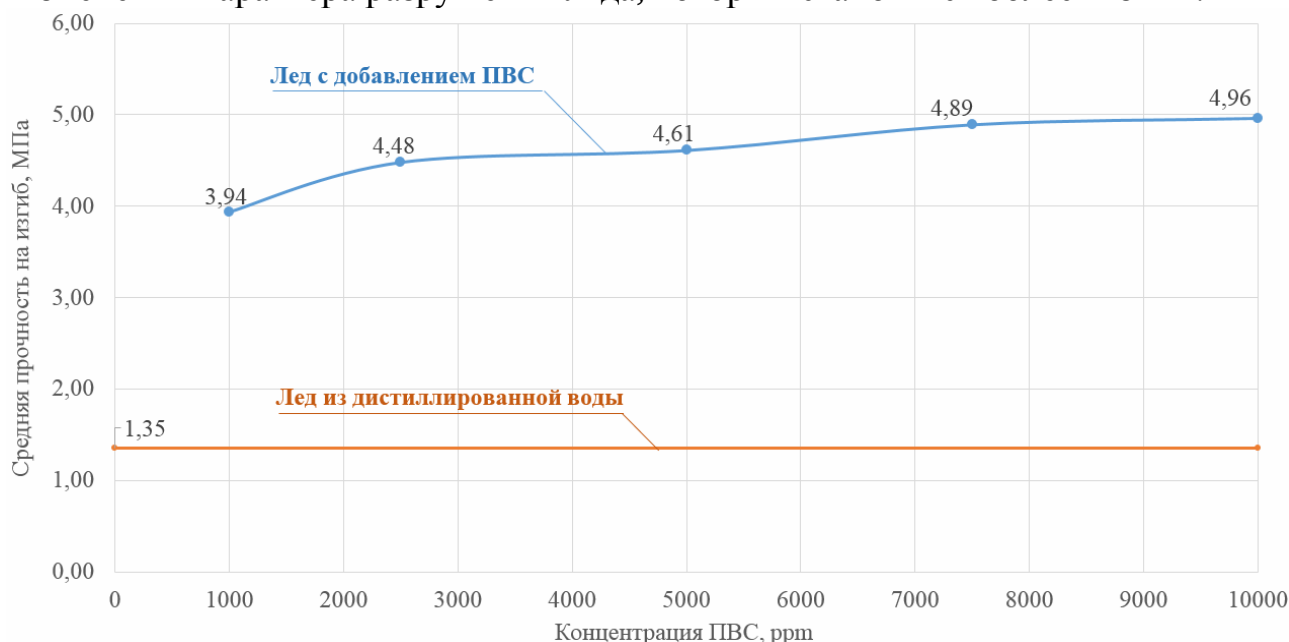


Рис. 1. Зависимость прочности льда на изгиб от концентрации поливинилового спирта

Механизм упрочнения ледовой матрицы с добавлением поливинилового спирта возможно связать с криоструктурированием полимерных цепей при кристаллизации водного раствора поливинилового спирта и образованием макрорадикалов. Их взаимодействие с соседними молекулами приводит к образованию ковалентно-сшитых гелей. В результате в ледовой матрице образуется сетка протяженных полимерных волокон, которая располагается как между кристаллическими образованиями, так и внутри них, что и приводит к армирующему эффекту.

В результате проведенного экспериментального исследования подтверждено наличие эффекта значительного упрочнения льда при внесении поливинилового спирта в замораживаемые растворы. Актуальным вопросом дальнейших исследований стоит определение диапазона оптимальных концентраций ПВС. В реальном техпроцессе заливки покрытий протяженных автосимников и ледовых переправ невозможно выдерживать точную концентрацию модифицирующего вещества, и она неизбежно будет меняться по линейным размерам покрытия. Явление сохранения или незначительного изменения эффекта упрочнения ледового материала при изменении концентрации поливинилового спирта в широком диапазоне может стать очень полезным с позиции применимости технологии модификации льда на реальных объектах сезонной дорожной инфраструктуры.

Финансирование. Статья подготовлена в рамках субсидии от Министерства науки и высшего образования FSFN-2024-0080.

Список литературы

1. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. – 2023. – Т. 20. – № 6 (94). – С. 786-797.
2. Васильев Н.К., Шаталина И.Н. Методы армирования льда для создания ледяных и льдогрунтовых композитов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2011. – Т. 264. – С. 119-129.
3. Buznik V.M., Goncharova G.Yu., Grinevich D., Nuzhny G.A. Strengthening of ice with basalt materials // Cold Regions Science and Technology. 2022, vol. 196, p. 103490.
4. Timco G.W. Flexural strength of ice grown from chemically impure melts // Cold Regions Science and Technology. 1981, vol. 4(2), pp. 81-92.
5. Гончарова Г.Ю., Нефёдкин С.И. Тайны ледового дворца // Холодильная техника. – 2005. – № 5. – С. 10.
6. Goncharova G.Yu., Razomasov N.D., Borshchev G.V., Buznik V.M. Chemically Modifying Ice and Ice-Based Materials to Control Their Properties // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021, vol. 55(5), pp. 1045-1055.
7. Архаров А.М., Гончарова Г.Ю. Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами // Холодильная техника. – 2010. – №. 11. – С. 46-50.
8. Студеникина Л.Н., Корчагин В.И., Попова Л.В., Саввин П.Н. Биodeградация бинарных композитов на основе поливинилового спирта // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2021. – Т. 14, №1. – С. 111-119.
9. Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Ким Е., Алтунина Л.К. Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2023. – Т. 66, №.11. – С. 126-134.

Сведения об авторах:

Гончарова Галина Юрьевна – д.т.н., профессор;

Туралин Денис Олегович – инженер;

Королев Игорь Антонович – к.т.н., ведущий инженер.

ПРОВЕРКА ФИЗИЧЕСКОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ ТЕОРИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТРАЕКТОРИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Гараников В.В., Корнильев Е.О.

Тверской государственный технический университет, Тверь

Ключевые слова: комплекс СН-ЭВМ, определяющие соотношения, спиральная траектория нагружения, сложное нагружение, криволинейная траектория, диаграмма деформаций, функции пластичности.

Аннотация. В работе представлены результаты расчетов по проверке физической достоверности трехчленных определяющих соотношений теории процессов на пространственных траекториях нагружения постоянной кривизны и кручения. Решение задачи проводилось с учетом ползучести материала. В основу теоретического решения положены определяющие соотношения вязкопластичности. Для описания деформаций ползучести принята теория ползучести типа течения. Рассмотрена пространственная траектория реализованная в трехмерном девиаторном пространстве напряжений.

VERIFICATION OF THE PHYSICAL RELIABILITY OF THREE- DIMENSIONAL CONSTITUTIVE RELATIONS OF THE THEORY OF ELASTOPLASTIC PROCESSES ON SPATIAL LOADING TRAJECTORIES

Garanikov V.V., Kornilyev E.O.

Tver State Technical University, Tver

Keywords: complex CH-ЭВМ, constitutive relations, spiral loading trajectory, complex loading, curvilinear trajectory, deformation diagram, plasticity functions.

Abstract. The paper presents the results of calculations to verify the physical reliability of the three-term constitutive relations of the theory of processes on spatial loading trajectories of constant curvature and torsion. The problem was solved taking into account the creep of the material. The theoretical solution is based on the constitutive relations of viscoplasticity. To describe creep deformations, the flow-type creep theory is adopted. A spatial trajectory implemented in a three-dimensional deviatoric stress space is considered.

Для описания процессов сложного нагружения в трехмерном девиаторном подпространстве используем общие дифференциально нелинейные определяющие соотношения В.Г.Зубчанинова [1-3].

$$d\bar{\varepsilon}/d\Sigma = M_{\kappa}^* \hat{q}_{\kappa} + M^* \hat{\varepsilon}, (\kappa=1,2,..5), \quad (1)$$

где функционалы процесса M_{κ}^* , M^* в общем случае зависят от параметров процесса: длины дуги траектории нагружения Σ , параметров кривизны и кручения κ_m ($m = 1,2,3,4$), $\hat{\varepsilon}$ траектории деформации, $\hat{q}_{\kappa}$ репера Френе, среднего напряжения σ_0 , температуры T и других нетермомеханических параметров β .

$$\begin{aligned} M_{\kappa} &= M_{\kappa} \{ \Sigma, \sigma, \kappa_m, T, \} \beta, \\ M &= \{ \Sigma, \sigma, \kappa_m, T, \beta \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Расчет произведен для пространственной криволинейной траектории постоянной кривизны $\kappa_1 = 4,16 \cdot 10^{-3} 1/\text{МПа}$ и кручения $\kappa_2 = 0,182 \cdot 10^{-3} 1/\text{МПа}$, реализованной в трехмерном девиаторном пространстве напряжений на тонкостенной цилиндрической оболочке, изготовленной из стали 12Х18Н10Т, при плоском напряженном состоянии (рис. 1). В данной работе приведены систематические экспериментальные исследования закономерностей изменения скалярных и векторных свойств металлов на плоских криволинейных траекториях напряжений и деформаций. Исследования выполнены на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе [3]. Данный комплекс разработан группой авторов в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов Тверского государственного технического университета под руководством профессора Зубчанинова В.Г. Более подробное описание комплекса, а также методика экспериментальных исследований представлены в монографиях [4, 5].

Выход на криволинейную часть траектории осуществлялся в результате предварительного простого растяжения. Радиус кривизны траектории в плоскости $S_1 - S_3$ составлял $R = 240 \text{ МПа}$, шаг винта a в направлении $S_2 - 66 \text{ МПа}$. Реализовано три полных витка траектории. Центр следа траектории в координатной плоскости $S_1 - S_3$ совпадает с началом координат.

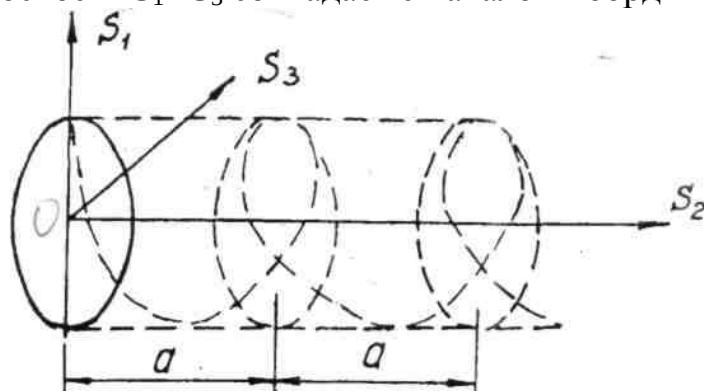


Рис. 1. Пространственная траектория нагружения

Решение данной задачи проводилось с учетом ползучести материала. Основу теоретического решения положены определяющие соотношения вязкопластичности при сложном напряженном состоянии, предложенные в работе [3]. Для описания деформаций ползучести принята теория ползучести типа течения. В первом приближении полагаем скорость деформации ползучести постоянной и принимаем равной $\dot{B} = 4 \cdot 10^{-4} 1/\text{мин}$. В рамках теории процессов векторные свойства для пространственных траекторий характеризуют зависимости $\theta_1 \sim \Sigma$, $\theta_2 \sim \Sigma$, где θ_1 – угол запаздывания (угол между вектором деформаций и единичным вектором касательной траектории нагружения), θ_2 – угол депланации (угол между вектором деформаций и единичным вектором бинормали траектории нагружения), Σ – приращение длины траектории нагружения. Так же рассматриваются зависимости $\nu_1 \sim \Sigma$ и $\Omega \sim \Sigma$, где ν_1 – угол сближения, Ω – угол истинной депланации ($\Omega = \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2$). При расчете экспериментальных значений углов, характеризующих векторные свойства и определяющих функций пластичности, используемых в рамках теории процессов для трехмерных траекторий применялись соотношения [2, с. 3].

Для координатных углов (θ_1, θ_2) процесса нагружения предложены аппроксимации:

$$\theta_1 = \theta_1^0 [1 + a_1 \sin \varphi], \quad (3)$$

$$\theta_2 = 2 a_1 \theta_1^0 (1 - a_1 \cos \varphi) [1 - \exp(-\gamma \Sigma)], \quad (4)$$

где $\varphi = k\Sigma$; $a_1 = \text{const}$, зависящий от параметров кривизны и кручения. Параметр γ подбирается из условия $\exp(-\gamma \Sigma) \approx 0$ в момент исчерпания следа запаздывания векторных свойств материала.

На рисунках 2-5 представлены результаты решения задачи построения образа процесса деформирования для реализованной пространственной криволинейной траектории постоянной кривизны и кручения. Условными символами на рисунках показаны экспериментальные точки, соответствующие испытанию образца п26. Проекция траектории деформаций на координатные оси $\Xi_1\Xi_2$ и $\Xi_1\Xi_3$ показаны на рисунке 2.

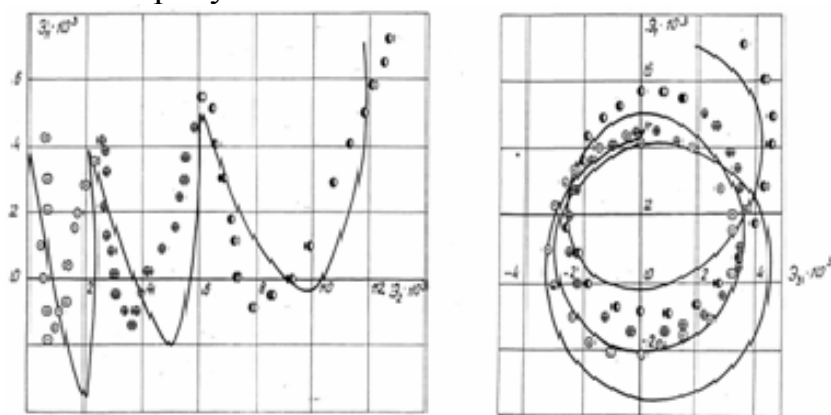


Рис. 2. Проекция траекторий деформаций

Сплошной линией отражены результаты расчета. Наибольшее различие между расчетной траекторией и экспериментальными данными наблюдается для первого витка. Это на наш взгляд, объясняется тем, что используемая аппроксимация (3) для θ_1 не учитывает след запаздывания векторных свойств. На последующих витках результаты расчета хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Диаграмма деформирования материала представлена на рисунке 3, из которого видно, что расчет достаточно достоверно отражает экспериментальную зависимость $\sigma \sim \Xi$. Расчетные модули вектора деформаций на большинстве участков траектории нагружения несколько превышают экспериментальные значения.

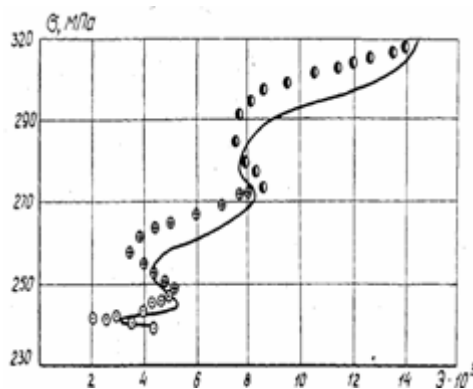


Рис. 3. Диаграмма деформирования

Графики изменения углов θ_1 и θ_2 в зависимости от приращения длины дуги траектории нагружения изображены соответственно на рисунках 4 и 5.

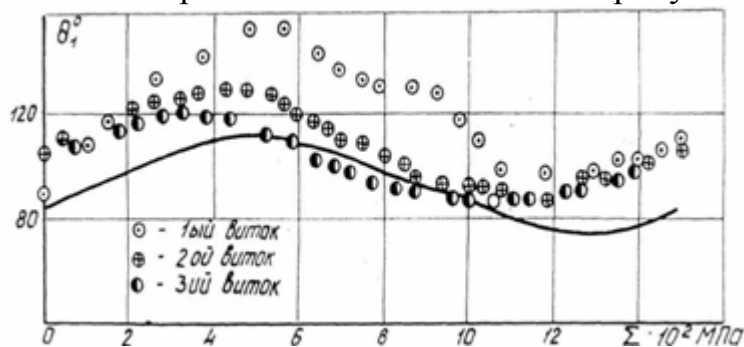


Рис. 4. Зависимость $\theta_1 \sim \Sigma$

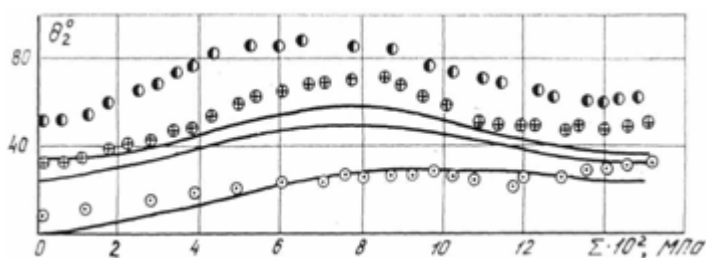


Рис. 5. Зависимость $\theta_2 \sim \Sigma$

Расчетная кривая $\theta_1 \sim \Sigma$ для стабизированных витков, в достаточной мере соответствует экспериментальным результатам (кружки с точкой соответствуют первому витку; кружки с внутренними крестиками — второму; полутемные кружки — третьему). На рис.5 результаты расчета $\theta_2 \sim \Sigma$ представлены кривыми 1,2,3 соответствующими первому, второму и третьему виткам. Угол депланации θ_2 возрастает с каждым витком. Причем, в середине траектории нагружения отдельного витка данный угол принимает максимальные значения. Так максимальный угол депланации на третьем витке составляет 59° , что на 30% меньше значения полученного в эксперименте.

Таким образом можно отметить, что трехчленное соотношение теории пластичности достаточно достоверно описывает пространственные траектории сложного нагружения. Уточнение решения может быть получено при корректировке аппроксимаций определяющий углов процесса. Учет сжимаемости материала при решении данной задачи не приводит к существенному уточнению результатов расчета.

Список литературы

1. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 1: теоретические основы // Проблемы прочности. — 1992. — №5. — С. 3-13.
2. Зубчанинов В.Г. Определяющие соотношения теории неупругих процессов в пространстве напряжений. Сообщение 2: экспериментальные основы // Проблемы прочности. — 1992. — №6. — С. 3-12.
3. Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластичных свойств материалов при сложном нагружении. Решение о выдаче свидетельства на полезную модель. — М.: ВНИИГПЭ, 1997. — №97108023/20(008702).

4. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1: Процессы сложного деформирования. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 174 с.
5. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 2: Процессы сложного нагружения. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.

Сведения об авторах:

Гараников Валерий Владимирович – д.т.н., заведующий кафедры «Техническая механика»;

Корнильев Егор Олегович – старший преподаватель.

УДК 517.958: 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ПОВРЕЖДАЕМЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Петушков В.А.

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

Ключевые слова: трехмерная деформируемая среда, циклическое ударное нагружение, нелинейное деформирование, кинетика повреждаемости, локализация деформаций, разрушение, математическое моделирование.

Аннотация. На основе экспериментальных данных и методов численного моделирования разработана методология изучения предельных состояний и прогнозирования ресурса повреждаемых поликристаллических сред (не однородных элементов конструкций) при ударных и циклических воздействиях. Применяемые при этом модели деформирования и разрушения учитывают сложные истории нагружения, объемный характер возникающих НДС, нелинейности, обусловленные большими деформациями и зависящим от скорости деформирования поведением материалов с изменяемой микроструктурой, а также анизотропное упрочнение и эффект Баушингера. Обсуждаются вопросы идентификации параметров моделей и их верификации на примерах решения задач с известными результатами, полученными численно и экспериментально. Приведены результаты изучения нелинейных волновых и малоцикловых процессов деформирования и локализации деформаций в объемных телах (элементах конструкций) под действием переменного во времени нагружения.

LIMIT STATE MODELING AND LIFE PREDICTION OF DAMAGED HETEROGENEOUS STRUCTURES

Petushkov V.A.

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

Keywords: 3D deformable media, cyclic shock loading, nonlinear deformation, damage kinetics, strain localization, fracture, mathematical simulation.

Abstract. Based on experimental data and numerical simulation, a methodology has been developed to study the limit states and predict the life of damaged polycrystalline media (inhomogeneous structural elements) under impact and cyclic loading. The applied models of deformation and fracture take into account complex loading histories, the volumetric nature of the resulting Stress and Deformed States, nonlinearities due to large deformations, and strain rate-dependent behavior of materials with variable microstructure, as well as anisotropic hardening and the Bauschinger' effect. The identification of model parameters and their verification on examples of solving problems with known numerical and experimental results are discussed. The results of the study of nonlinear wave and low-cycle processes of deformation and strain localization in bulk bodies (structural elements) under the action of time-varying loading are presented.

Введение. Поведение нелинейно деформируемых сред с учетом их структуры является нелокальным с точки зрения классической механики и не может быть охарактеризовано с помощью обычных теорий пластичности. Для их изучения приходится использовать подходы, развиваемые в механике

гетерогенных сред или обобщенной механике – микромеханике сплошных сред с учетом второго (мезо) уровня структуры материалов [1].

Ключевой проблемой всех этих подходов остается разработка моделей повреждаемых сред с достаточно простыми методами идентификации их параметров и методов математического моделирования иначе вычислительного эксперимента.

Структурные уровни материала и повреждаемость деформируемой среды. Уровни описания структуры поликристаллических материалов можно разделить в основном на нано- (атомистический уровень), микро- (дислокации, микронапряжения и единичные пустоты, и включения), мезо- (более крупная часть микроструктуру материала, т.е. сочетания многих включений, слоев, градиентов) и макроуровень (образец, конструкция).

Изучение нелинейных процессов разрушения металлов с учетом первых двух уровней структуры и обоснования ресурса конструкций осуществляется на основе механики повреждаемых сред и математического моделирования. В настоящей работе использована нелокальная модель упруго-вязкопластического деформирования и разрушения поликристаллических сред с растущими исходными и возникающими микродефектами [2-4]. Моделируемые при этом механизмы разрушения и потери несущей способности представляют собой пластический рост и объединение микродефектов (пор, трещин) при конечных деформациях с возможным образованием полос сдвига и учетом влияния остаточных микронапряжений.

Задача математического моделирования деградации свойств и прогнозирования ресурса

Математическая модель, используемая для анализа несущей способности и прогнозирования ресурса повреждаемых деформируемых сред, и постановка соответствующих краевых задач сформулирована в [4].

Для металлов, вязких по своей природе или из-за существенного повышения температуры в процессе деформирования, образование повреждений – микродефектов связано главным образом с образованием микропор. Схема формирования пор с учетом наличия вторых фаз и включений показана на рисунке 1.

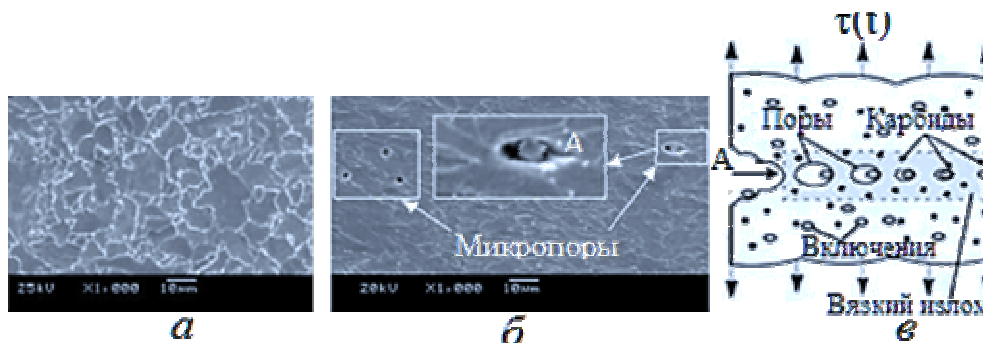


Рис. 1. Структура исходной поликристаллической среды – (а), среда при деформировании – (б), концептуальное представление в модели – (в)

В качестве меры повреждаемости примем по аналогии с [5] относительный объем микроповреждений $\xi = v_d / v$, где V – элементарный объем материала, а

$v_d = (v - \tilde{v})$ – часть его заполненная микроповреждениями, и связь между поврежденным и неповрежденным состояниями деформируемой среды, например для тензора напряжений τ_{ij} , определяется известным соотношением $\tau_{ij} = \tau_{ij}(1 - \xi)$. Кинетика и скорость деградации свойств материала, его разрушения определяются скоростью $\dot{\xi}(x^i, t)$, которая включает в себя скорости зарождения $\dot{\xi}_n$ и роста $\dot{\xi}_g$ микропор, т.е. $\dot{\xi} = \dot{\xi}_n + \dot{\xi}_g$. Уровни накапливаемых повреждений в любой точке x^i материала и для любого вида нагружения вычисляются интегрированием этого уравнения по времени.

В зависимости от объемности НДС рост микропор может происходить в условиях разряжения или кавитации по аналогии с жидкостью и/или сдвига [6]. При этом начальный уровень поврежденности ξ_0 определяется существующими методами диагностики и испытаниями, в том числе с использованием так называемых образцов – свидетелей и вырезаемых темплетов из конструкций, находящихся в эксплуатации.

Фактом вязкого кавитационного разрушения, иначе исчерпания ресурса конструкции или ее элемента, является достижение предельного уровня ξ_F повреждаемости, который для большинства поликристаллических металлов находится в диапазоне от 0,18 до 0,30 [7], и критерий разрушения определяется соотношением $\xi_c \geq \xi_F$. При малых значениях показателя объемности НДС разрушение конструкции происходит из-за накопления и слияния сдвигом микроповреждений в следствие локальной в полосах скольжения потери устойчивости вязкопластического течения, которой способствует термическое разупрочнение материала [6]. В этом случае соотношение между уровнем накапливаемых во времени вязкопластических деформаций ϵ_e^{vp} и предельной при разрушении деформации ϵ_F , устанавливаемой экспериментально, используется в качестве критерия

$$\xi_{sh} = \epsilon_e^{vp} / \epsilon_F \geq 1,$$

где $\epsilon_e^{vp} = (\frac{2}{3} e_{jk}^{vp} e_{jk}^{vp})^{1/2}$ – эквивалентная пластическая деформация, $\epsilon_e^{vp} = \int_t \dot{\epsilon}_e^{vp} dt$

Для прогнозирования усталостной долговечности применяются энергетические критерии, использующие энергию деформации (пластическую энергию, упругую энергию, или суммирование обеих) в качестве ключевого параметра повреждения с учетом последовательности нагрузок и кумулятивного повреждения [8, 9]. При этом для малоциклового вязкопластического нагружения в качестве критерия, отвечающего за процесс накопления повреждений, принимается энергия, равная работе микронапряжений на поле пластических деформаций [8, 10].

При квазистатических и особенно ударных воздействиях происходит разупрочнение материала вследствие повышения температуры и накопления повреждений. В наиболее нагруженных элементах конструкций возникают узкие

зоны локализации с большими(конечными) деформациями, иначе полосы сдвига, из-за потери устойчивости (бифуркации) нелинейного процесса деформирования (рис. 2).

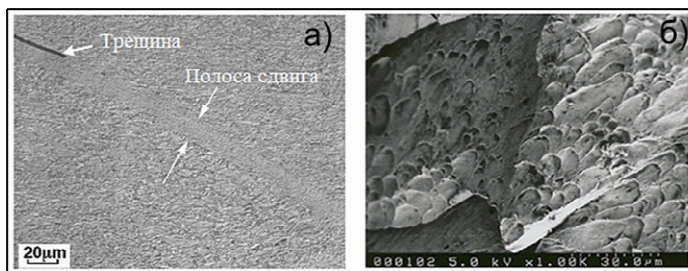


Рис. 2. Полоса сдвига перед образованием трещины – а, поверхность откола – б

При этом ширина сдвиговой полосы может составлять от 3 до 10 мкм в зависимости от материала и условий нагружения. Большая концентрация микропор приводит к разрушению конструкции в виде распространяющей вдоль полосы макротрещины (рис. 2, а). О наличии сдвиговых механизмов разрушения свидетельствует поверхность разлома (рис. 2, б).

В этих случаях возникают проблемы математического моделирования, связанные с корректностью постановки и численной неустойчивостью решения краевых задач.

Кинематика конечного деформирования. Пусть рассматриваемая нелинейно деформируемая среда объема V , занимает в R_3 область Ω , ограниченную поверхностью S . Мерой деформации тела D служит градиент деформаций $F = x/X$, где X и x – соответственно Лагранжевы и Эйлера координаты. Представим скорость деформации D как результат декомпозиции на упругие D^e , вязкопластические D^{vp} и вязко повреждаемые D^d составляющие:

$$D = D^e + D^{vp} + D^d \text{ и } D^d = D^{ed} + D^{vpd},$$

где D^{ed} и D^{vpd} – соответственно упруго-повреждаемые (обратимые) и вязко/пластически-повреждаемые (необратимые) составляющие тензора скоростей деформации. Деформационный градиент F между исходной C_0 и текущей C_t конфигурациями Ω будет:

$$F = F_e \cdot F_{vp} \cdot F_d.$$

Суммарный Якобиан деформации J , характеризующий объемную деформацию, с учетом допущения того, что сжимаемость приходится только на долю повреждаемости будет равен $J = J^d = \det(F)$. Деформации за счет повреждаемости определяются как: $\varepsilon^d = 1/J - 1$

Для определения упрочнения вязкопластического деформирования требуются дополнительные внутренние переменные состояния, которые могут быть объединены в систему $\mathbb{Z}^P = \langle \mathbb{Q}, \mathbb{R} \rangle$ макроскопических мер необратимых явлений, где внутренние переменные состояния связаны с изотропным и кинематическим поведением упрочнения, обозначаемых скаляром $\mathbb{Q}$ и тензором второго порядка $\mathbb{R}$ с компонентами ρ_{jk} , соответственно. С учетом

термодинамических ограничений компоненты $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ тензора вязкопластических деформаций $\dot{D}^{vp}$ определяются в соответствии [11]

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \tau_{ij}},$$

где Λ – множитель Лагранжа, f – поверхность вязкопластической текучести, уравнение которой с учетом повреждаемости ξ и температуры θ ,

$$f = \left(\frac{3}{2} J_2\right)^{1/2} - Q \leq 0,$$

где Q – радиус поверхности течения, описывающий изотропное упрочнение (или разупрочнение) материала, определяется выражением

$$Q = k(\varepsilon_e^{vp}, \theta, \xi) [1 + (\lambda \dot{\varepsilon}_e^{vp})^{1/m}] [1 - (\theta/\theta_m)^n] + n I_1^2 \xi^2$$

$$\text{Здесь } k(\varepsilon_e^{vp}, \theta, \xi) = \tau_y^s(\varepsilon_e^{vp}, \theta, \xi) + \tau_y^r(\varepsilon_e^{vp}, \theta, \xi), \quad \tau_y^s = \tau_y(\theta)(1 - \xi) \quad -$$

статический предел текучести, τ_y^r , m и n зависящие от температуры параметры

материала, $I_1 = \tau_{ii}$, $J_2 = \frac{1}{2} \hat{S}_{jk} \hat{S}_{jk}$, $\hat{S}_{jk} = S_{jk} - \rho_{jk}$, и ρ_{jk} – тензор микронапряжений, определяющий положение поверхности текучести во времени для повреждаемых материалов с анизотропным упрочнением

$$\dot{\rho}_{jk} = \frac{2}{3} c \dot{\varepsilon}_{jk}^{vp} - r \rho_{jk} \dot{\nu} + \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \theta} \rho_{jk} \dot{\theta},$$

где c и ν зависящие от температуры параметры материала, определяемые экспериментально.

Модуль упругости является функцией температуры и повреждений и определяется как:

$$C = 2\mu I + (K - \frac{2}{3}\mu) I \otimes I = C(\xi, \theta).$$

Выражения для объемного модуля K и модуля сдвига G при больших изменениях объема, температуры и разупрочнения вследствие повреждаемости деформируемой среды приведены, например в [3].

Уравнения состояния деформируемой среды при ударных воздействиях определяются известными соотношениями Ренкина-Гюгонио на фронте ударной волны и уравнениями Ми-Грюнайзена [2]. Выбор соответствующей модели повреждаемости определяется конкретными условиями и режимами нагружения деформируемой среды.

Решение задачи нелинейного деформирования и разрушения строится с использованием комплекса программ МКЭ и программных модулей оценки несущей способности и прогнозирования остаточного ресурса с учетом данных мониторинга за состоянием рассматриваемой конструкции или ее элемента.

Идентификация параметров и верификация модели. Целью калибровки модели, приведенной в предыдущих разделах, является нахождение параметров материала, которые при математическом моделировании обеспечивают

максимально приближенные результаты к реальным испытаниям. Для этого проводится серия так называемых базовых экспериментов на специально изготовленных образцах под каждый вид нагружения. Поиск калибровочных параметров модели для условий вязкопластического малоциклового деформирования и повреждаемости осуществляется на основе результатов реальных испытаний и их моделирования с помощью МКЭ. Калибровка параметров основана на экспериментальных результатах с цилиндрическими образцами (рис. 3).

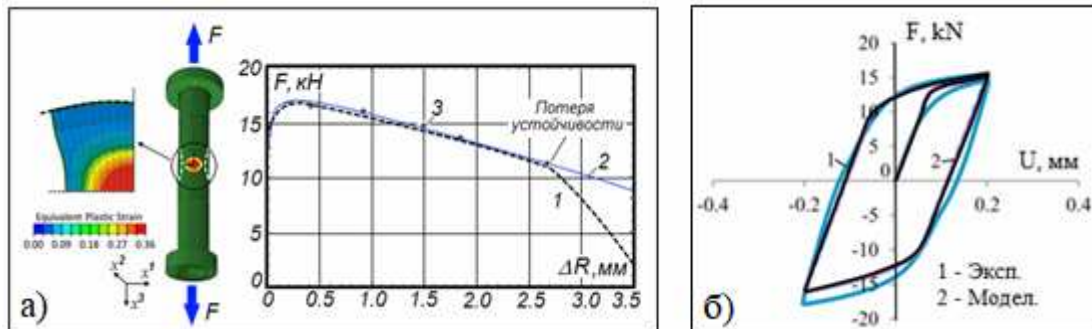


Рис. 3. Калибровка модели, а – пластичность с повреждаемостью – 1, без учета повреждаемости – 2, эксперимент – 3, б – малоцикловое деформирование

Параметры, связанные с циклической пластичностью, калибруются по результатам циклических испытаний гладкого цилиндрического образца при амплитуде $\pm 0,2$ мм, как показано на рисунке 3, б.

Формирование шейки в рассматриваемом образце при конечных деформациях показано на рисунках 4, а, б. Максимальные повреждения, вызванные пластическим деформированием, образуются вблизи края образца в шейке, что хорошо согласуется с результатами эксперимента.

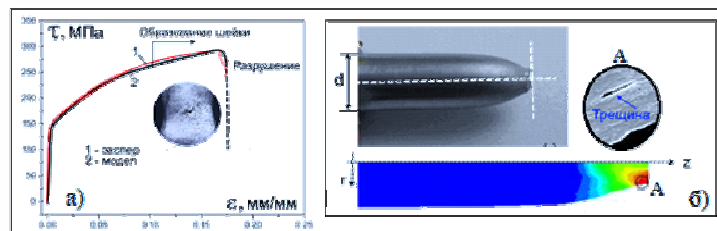


Рис. 4. Кривая истинных напряжений – а; распределение повреждений в шейке образца в момент разрушения – б

Верификация используемой модели применительно к импульсному деформированию выполнена для более сложной трехмерной задачи о стержне Гопкинсона, с известными из эксперимента результатами [3].

Результаты моделирования деформирования и разрушения конструкции. На основе результатов вычислительного эксперимента, представленного в предыдущих разделах, выполнено моделирование процессов деформирования и повреждаемости предварительно нагруженной полосы с подкрепленным отверстием в зоне соединения разнородных материалов, например, элемента трубной доски парогенератора с завальцованной взрывом трубки, подвергаемой ударному и упруго вязкопластическому циклическому нагружению (рис. 5, а, б).

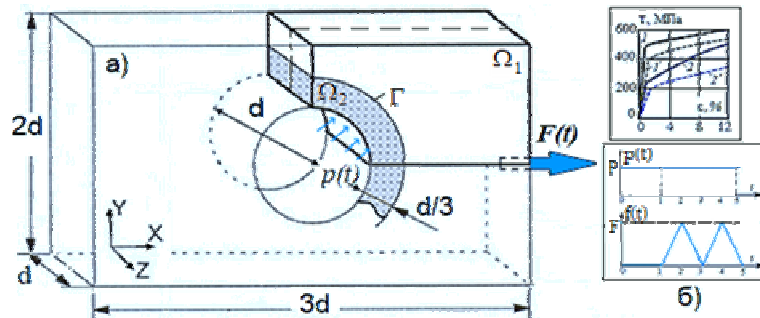


Рис. 5. Пластина с подкреплённым отверстием, а – геометрия и нагрузки, б – история нагружения и кривые деформирования

В соединении используются стали типа 15ХГН2МА и 0Х18Н10Т, которые заполняют соответственно области Ω_1 и Ω_2 как показано на рисунке 5, а. Их свойства с соотношением модулей Юнга $E_1 / E_2 = 1,05$, коэффициентов Пуассона $\nu_1 / \nu_2 = 0,91$, статических пределов текучести $\sigma_{02}^1 / \sigma_{02}^2 = 1,95$, коэффициентов линейного расширения $\alpha_1 / \alpha_2 = 0,69$, начальных плотностей $\rho_1 / \rho_2 = 1,0$. Здесь так же приведены и диаграммы квазистатического деформирования указанных материалов для возможного при эксплуатации парогенератора АЭС диапазона изменения температур и условия нагружения – усилие $f(t)$ с максимальным давлением $F = 150$ МПа на торец пластины и давлением $p(t)$ с $P = 45$ МПа внутри трубки (шайбы) (рис. 5, б). Другие зависящие от температуры и скорости нагружения параметры используемой модели деформирования и разрушения поликристаллических сред определяются из серии специально поставленных экспериментов.

Результаты моделирования предельных состояний, возникающих в такой конструкции биметаллического соединения при наличии исходного квазистатического нагружения, конечных деформаций и повреждаемости материалов приведены на рисунках 6, 7.

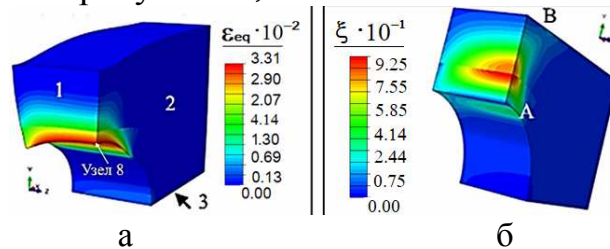


Рис. 6. Максимальный размер зоны пластичности для $t = 2,0$ (1, 2, 3 – плоскости симметрии) – а, суммарные повреждения в момент времени $t = 5$ – б

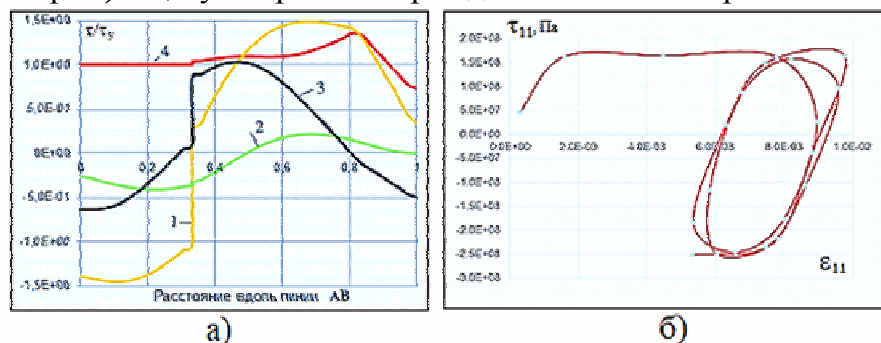


Рис. 7. а – распределение остаточных напряжений вдоль линии АБ (рис. 7) для времени $t = 5$ (1 – τ_{11} , 2 – τ_{22} , 3 – τ_{33} , 4 – $\tau_{\text{экв}}$); б – кривая деформирования $\tau_{11} \sim \epsilon_{11}$ в узле 8 (рис. 6)

Заключение. Разработана методология изучения предельных состояний и прогнозирования ресурса повреждаемых поликристаллических сред (неоднородных элементов конструкций) при ударных и циклических воздействиях с учетом сложных историй нагружения, объемного характера возникающих НДС и нелинейного поведения материалов с изменяемой микроструктурой, анизотропным упрочнением и эффекта Баушингера. Приведены примеры идентификации параметров модели и выполнена ее калибровка на примерах решения задач с известными результатами, полученными численно и экспериментально. Предлагаемый в работе подход может быть основополагающим для надлежащего выбора и оптимального использования конструкционных материалов и требует целостного сочетания испытаний материалов, неразрушающей конструкции оценки ее состояния и детального изучения предельных состояний.

Список литературы

1. Stein E., R de Borst, Hughes T.J.R. et al. Computational Mechanics. Vol. 2: Solids and Structures. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – P. 407-430.
2. Петушков В.А. Вязкопластическое течение и локализация деформаций в повреждаемой среде при ударных воздействиях // Журнал СФУ. Сер. Математика и физика. – 2009. – Т. 2, вып. 3. – С. 336-351.
3. Petushkov V.A. Numerical simulation of high-velocity dynamics of the nonlinear deformation and failure of damaged medium // Mathematical Models and Computer Simulations. 2010, vol. 2, no. 1, pp 76-90.
4. Petushkov V.A. To Forecasting Residual Lifetime of Damaged Constructions under Shock Impacts in Operation // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020, vol. 49(2), pp. 159-169.
5. Работнов Ю.Н. Механизм длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 5-7.
6. Brunig M., Chyra O., Albrecht D. at all A ductile damage criterion at various stress triaxialities // International Journal of Plasticity. 2008, vol. 24, pp. 1731-1755.
7. Seamen L. Curran B.R., Shockey D.A. Computational models for ductile and brittle fracture // Journal of Applied Physics. 1976, vol. 47, no. 11, pp. 4814-4826.
8. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
9. Macha E., Sonsino C.M. Energy criteria of multiaxial fatigue failure // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1999, vol. 22, no. 12, pp. 1053-1070.
10. Новожилов В.В., Рыбакина О.Г. О перспективах построения критерия прочности при сложном нагружении // Прочность при малом числе циклов нагружения / Под ред. С.В. Серенсена. – М.: Наука, 1969. – С. 71-80.
11. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // International Journal of Plasticity. 1989, vol. 5, no. 3, pp. 247-302.
12. Rezaiee-Pajand M., Sinaie S. Calibration of Hardening Rules for Cyclic Plasticity // International Journal of Engineering A: Basics 2013, vol. 26, no. 4, pp. 351-364.

Сведения об авторах:

Петушков Владимир Алексеевич – ведущий научный сотрудник.

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ЭКСОСКЕЛЕТОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ СПИНЫ

Перишуткин Н.В., Федорова А.А.

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

Ключевые слова: пассивный экзоскелет, проблемы с опорно-двигательным аппаратом, механизмы поддержки спины, анализ рынка, оценка эффективности.

Аннотация. При проведении операций хирурги могут занимать различные неудобные позы и находиться в таком положении продолжительное время, тем самым вредя своему здоровью. Статья посвящена решению данной проблемы. В ней был произведен анализ существующих решений на рынке экзоскелетов в различных областях применения и выполнен расчет для выбора оптимального и более эффективного способа поддержки спины во время проведения операции хирургом.

REVIEW OF BACK-SUPPORT EXOSKELETON DESIGNS

Pershutkin N.V., Fedorova A.A.

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

Keywords: passive exoskeleton, problems with the musculoskeletal system, back support mechanisms, market analysis, efficiency assessment.

Abstract. During operations, surgeons can take various uncomfortable positions and stay in this position for a long time, thereby harming their health. The article is devoted to solving this problem. It analyzed existing solutions on the exoskeleton market in various areas of application and performed a calculation to select the optimal and more effective way of back support during surgery by a surgeon.

При проведении операций, хирурги могут занимать различные неудобные позы и находиться в таком положении продолжительное время, которые могут длиться как несколько минут, так и 10-20 ч. [1]. В ходе таких длительных операций у хирургов возникают проблемы с опорно-двигательным аппаратом, появляются боли, мышечные напряжения, затекание конечностей и давление в области позвоночника [2].

Решением данных проблем, может стать использование экзоскелета для поддержки спины во время проведения операций, которая может осуществляться за счет различных усилий элементов в зависимости от конструкции экзоскелетов, позволяющие компенсировать вес верхней части туловища [3]. Целью статьи является обзор конструкций экзоскелетов для поддержки спины хирургов во время проведения операций и их сравнение по критерию использования механизмов с наименьшими необходимыми усилиями.

В статье рассмотрены основные виды экзоскелетов, используемых для поддержки спины, представленные на рисунке 1.

На рисунке 1,а представлен экзоскелет, в котором поддержка осуществляется за счет стопорного элемента, создающего усилия, возникающие в области тазобедренного сустава, на рисунке 1,б – механизм поддержки спины, создает силу сопротивления перпендикулярно спине на уровне груди, на рисунке 1,в – за счет упругого элемента, сила сопротивления действует вдоль спины.



Рис. 1. Экзоскелеты для поддержки спины: а) модель «Раехо back»; б) модель промышленного экзоскелета, разработанного СибГМУ совместно с ООО «Технологическая компания «Биомеханические системы» в) модель «Lowebacker»

Для нахождения необходимых усилий для каждой конструкции построена схема с условным отображением человека с указанием нагрузки в виде веса верхней части туловища и необходимых усилий для его компенсации (рис. 2) для проведения идеализированного расчета без учета сил трения.

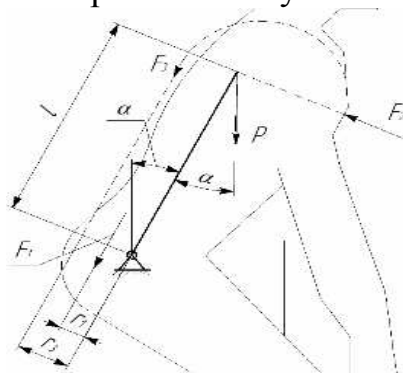


Рис. 2. Эпюра приложенных сил к человеку: α – угол наклона туловища от вертикали при проведении операции; l – кратчайшее расстояние до центра тяжести от крестца; P – вес верхней части тела; F_1 – усилие, создаваемое экзоскелетом «Раехо back»; F_2 – усилие, создаваемое промышленным экзоскелетом; F_3 – усилие, создаваемое экзоскелетом «Lowebacker»; r_1 – максимальный радиус стопорного элемента экзоскелета «Раехо back»; r_3 – кратчайшее расстояние от крестца до линии действия силы упругого элемента экзоскелета «Lowebacker»

Исходя их схемы, изображенной на рисунке 2, определены необходимые усилия по следующим формулам:

$$F_1 = P \cdot \cos(\alpha) \cdot l / r_1, \quad (1)$$

$$F_2 = P \cdot \sin(\alpha), \quad (2)$$

$$F_3 = P \cdot \cos(\alpha) \cdot l / r_3. \quad (3)$$

В качестве исходных данных были выбраны параметры среднестатистического человека и положения хирурга при проведении операции:

- вес верхней части тела, $P = 370$ Н;
- кратчайшее расстояние до центра тяжести от крестца, $l = 0,25$ м;
- угол наклона туловища от вертикали при проведении операции, $\alpha = 20^\circ$;

– максимальный радиус стопорного элемента экзоскелета «Paexo back», $r_1 = 0,05$ м;

– кратчайшее расстояние от крестца до линии действия силы упругого элемента экзоскелета «Lowebacker», $r_3 = 0,1$ м.

Подставляя принятые значения параметров в формулы (1), (2) и (3), получены значения необходимых усилий рассматриваемых конструкций экзоскелетов, которые представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты сравнения

Усилие	Значение
Усилие, создаваемое экзоскелетом «Paexo back» F_1 , Н	1704
Усилие, создаваемое промышленным экзоскелетом F_2 , Н	124
Усилие, создаваемое экзоскелетом «Lowebacker» F_3 , Н	852

Исходя из таблицы 1, можно сделать вывод о том, что второй экзоскелет требуют меньше усилия элемента для удержания туловища пользователя, чем первый и третий. Тем самым можно сказать, что из рассмотренных вариантов наиболее эффективным способом поддержки спины является второй тип экзоскелета, позволяющий использовать пассивные или активные элементы с меньшими усилиями.

Список литературы

1. Исмайылова Л.М., Тоноян А.М. Применение экзоскелетов для снижения тяжести труда врачей хирургической практики // Материалы Всероссийского научного форума с международным участием «Неделя молодежной науки – 2020», посвященного 75-летию победы в Великой Отечественной войне (г. Тюмень, 20 мая 2020 г. (дистанционное проведение)). – Тюмень: ООО «Печатник», 2020. – С. 149-149.
2. Дурноглазова К.А., Хабуева А.Р., Хамидов А.В. Внедрение экзоскелета в эндохирургию, для профилактики профессиональных заболеваний // Актуальные проблемы экспериментальной и клинической медицины: Материалы 79-й международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Волгоград: Изд-во ВолгГМУ, 2021. – С. 223-223.
3. Ali A. et al. Systematic review of back-support exoskeletons and soft robotic suits // Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2021, vol. 9, p. 765257.

Сведения об авторах:

Периуткин Никита Викторович – студент;

Федорова Алена Анатольевна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения.

ВРЕМЯ И ЭНЕРГИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УПРУГОГО ОБЪЕКТА ИЗ ИСХОДНОГО В КОНЕЧНЫЙ АБСОЛЮТНЫЙ ПОКОЙ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

¹*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия;*

²*Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, Севастополь, Россия*

Ключевые слова: упругий объект, оптимальное управление (переносное ускорение), моментные соотношения (трансцендентные уравнения), время движения, достижение абсолютного покоя.

Аннотация. С использованием реверсионно конструируемого оптимального управления переносным движением упругого объекта из исходного состояния покоя в конечное состояние абсолютного покоя используется время движения, представляющее собой один из общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые преобразуются моментные соотношения. На численных примерах показано, что при достижении цели оптимального движения с ростом степени полинома используемого управления (переносного ускорения) снижаются энергетические затраты.

TIME AND ENERGY OF THE ELASTIC OBJECT OPTIMAL MOVEMENT FROM THE INITIAL TO THE FINAL ABSOLUTE QUIESCENCE

Bokhonsky A.I.¹, Varminskaya N.I.²

¹*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia;*

²*P.S. Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, Russia*

Keywords: elastic object, optimal control (translational acceleration), moment relations (transcendental equations), motion time, achieving absolute quiescence.

Abstract. Using the reversibly constructed optimal control of the elastic object translational motion from the initial state of quiescence to the final state of absolute quiescence, the motion time is used, which is one of the common roots of the transcendental equations' system into which the moment relations are transformed. Numerical examples show that when achieving the purpose of optimal motion, with an increase in the degree of the used control (translational acceleration polynomial), energy costs decrease.

Введение

Реверсионному конструированию оптимальных управлений перемещением объектов посвящены работы [1-4] и другие. Обосновано существование наименьшего энергетического принуждения для управлений типа разгон-торможение. При быстром перемещении упругого объекта возможен выбор такого времени движения, при котором в конечном состоянии достигается абсолютный покой. Время движения выбрано как один из общих корней системы трансцендентных уравнений, в которую превращаются моментные соотношения (в относительном движении) при их равенстве нулю в фиксированный момент времени.

1. Затрачиваемая энергия при задаваемом времени движения для классического управления

В этом случае из универсальных аналитических зависимостей при степени полинома ускорения $n = 1$ для управления, скорости и перемещения следуют выражения:

$$U_e(t) = \frac{6L(T-2t)}{T^3}, \quad V_e(t) = \frac{6Lt(T-t)}{T^3}, \quad S_e(t) = \frac{Lt^2(3T-2t)}{T^3}, \quad (1)$$

где L – общее перемещение; T – общее время оптимального движения.

В относительном движении дифференциальное уравнение, описывающее колебания упругой системы с одной степенью свободы, имеет вид:

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -\frac{6L(T-2t)}{T^3}, \quad (2)$$

где k – частота собственных колебаний.

Из решения уравнения (2) при $x_r(0) = 0$, $\dot{x}_r(0) = 0$ и $k = \pi$ с, $L = 1$ м, $t = T$ после преобразований следует система трансцендентных уравнений

$$\begin{aligned} x_r(T) &= -2\sin \pi T + \pi T \cdot \cos \pi T + 1 = 0, \\ \dot{x}_r(0) &= -2\cos \pi T - \pi T \sin \pi T + 2 = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

решение которой представлено графически (рисунок 1).

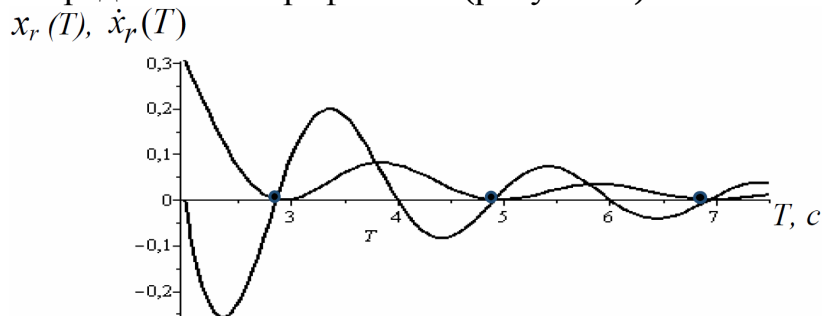


Рис. 1. Графики $x_r(T)$, $\dot{x}_r(T)$ при управлении $U_e(t) = 6L(T-2t)/T^3$ ($n = 1$)

Для $m = 1$ кг каждому времени движения соответствует энергия E , которая вычислена так:

$$E = 2 \int_0^{T/2} m U_e(t) V_e(t) dt. \quad (4)$$

Зависимость E от T сведена в таблицу 1.

Табл. 1. Зависимость энергии от времени движения ($n = 1$)

Время движения T , с	2,85	4,92	6,94
Энергия E , Дж	0,277	0,093	0,047

2. Вычисление времени движения и энергии при реверсионно конструируемом управлении ($n = 3$)

Ускорение (управление), скорость и перемещение имеют вид:

$$U_e(t) = \frac{10L(T-2t)^3}{T^5}, \quad V_e(t) = \frac{10Lt(T^3 - 3T^2t + 4Tt^2 - 2t^3)}{T^5},$$

$$S_e(t) = \frac{Lt^2(5T^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3)}{T^5}.$$
(5)

В относительном движении без учета сопротивления колебания упругого объекта описываются уравнением

$$\frac{d^2x_r}{dt^2} + k^2x_r = -\frac{10L(T-2t)^3}{T^5},$$
(6)

решение которого найдено при $x_r(0) = 0$, $\dot{x}_r(0) = 0$. После преобразований и упрощений моментные соотношения приводятся к виду:

$$x_r(T) = (6\pi^2T^2 - 48)\sin\pi T + (24\pi^2T^2)\pi T \cdot \cos\pi T - \pi^3T^3 + 24\pi T = 0,$$

$$\dot{x}_r(T) = 6(\pi^2T^2 - 8)\cos\pi T + (\pi^2T^2 - 24)\pi T \sin\pi T - 6\pi^2T^2 + 48 = 0.$$
(7)

Графики $x_r(T)$, $\dot{x}_r(T)$ изображены на рисунке 2.

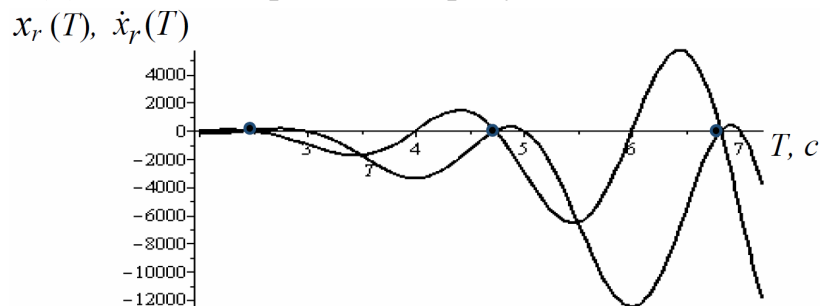


Рис. 2. Графики $x_r(T)$, $\dot{x}_r(T)$ при управлении $U_e(t) = \frac{10L(T-2t)^3}{T^5}$ ($n = 3$)

Таблица 2 содержит вычисления времени движения и энергии при $n = 3$ (прежние исходные данные).

Табл. 2. Зависимость энергии от времени движения ($n = 3$)

Время движения T , с	2,46	4,74	6,82
Энергия E , Дж	0,258	0,0695	0,0336

Для $T = 2,46$ с графики $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$ изображены на рисунке 3.

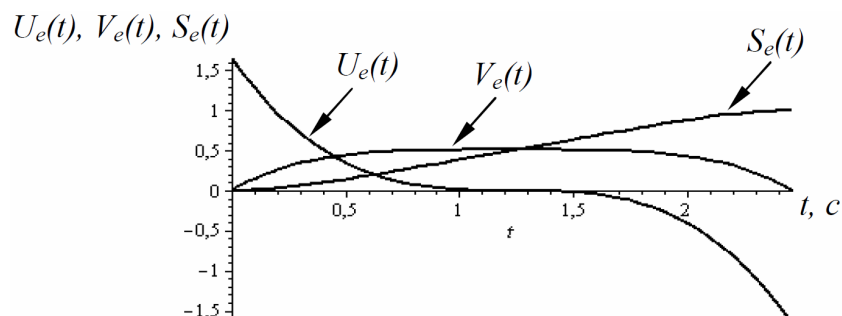


Рис. 3. Графики переносного движения при $n = 3$

На рисунке 4 приведены графики $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$ при $T = 2,46$ с, а на рисунке 5 – графики $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$ для $T = 6,82$ с, которые подтверждают достижение состояния абсолютного покоя в переносном движении упругого объекта.

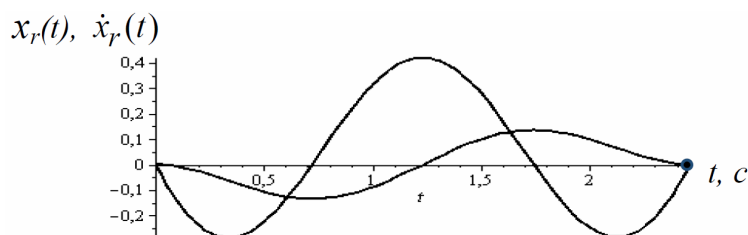


Рис. 4. Графики относительного движения при $n = 3$ и $T = 2,46$ с

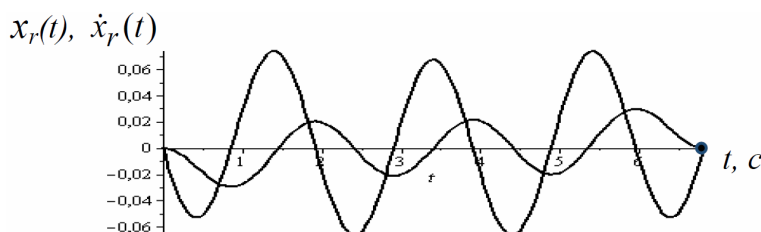


Рис. 5. Графики относительного движения при $n = 3$ и $T = 6,82$ с

Заключение

На наиболее простом примере (при $n = 3$) показано, что использование реверсионно конструируемого управления приводит к существованию значений времени движения, при которых достигается состояние абсолютного покоя и снижаются энергетические затраты. Существование множества корней (для времени движения) облегчает практическую реализацию оптимальных управлений. Численный анализ и сопоставление управлений $n = 1$ (классическое управление) и $n = 3$ (реверсионно конструируемое) показывает, что даже при уменьшении времени достижения цели движения (с абсолютным покоем в конечном состоянии) затрачивается меньше энергии по сравнению с классическим управлением.

Список литературы

1. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
2. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Оптимальное переносное движение объектов конечной жесткости. – Санкт-Петербург: Медианапир, 2024. – 154 с.
3. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Разделение оптимального поворота объекта на разгон и равномерное вращением с последующим торможением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – Вып. 3(365). – С. 14-19.
4. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Наименьшее энергетическое принуждение при разгоне-торможении объекта // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – Вып. 4(366). – С. 27-31.

Сведения об авторах:

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

Варминская Наталья Ивановна – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой физики и общетехнических дисциплин.

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ СЕКЦИИ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лазарев А.Д.

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

Ключевые слова: горно-транспортные машины, уголь, скребковый конвейер, очистной комбайн, метод конечных элементов, сварной шов.

Аннотация. В работе рассматривается методика расчета сварных соединений в контексте разработки комплексного подхода к расчету прочностных характеристик рештачной секции скребкового конвейера. Анализируются известные способы моделирования конструкции рештака, как сборочной модели. Предлагается новый способ моделирования сварных соединений деталей рештачной секции с учетом максимального приближения к реальным физико-механическим свойствам изделия.

REFINEMENT OF THE CALCULATION METHOD FOR WELDED JOINTS OF PARTS OF THE SECTION OF THE SCRAPER CONVEYOR BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Lazarev A.D.

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

Keywords: mining and transport machines, coal, scraper conveyor, cutter-loader, finite element method, welded seam.

Abstract. The paper considers a method for calculating welded joints in the context of developing an integrated approach to calculating the strength characteristics of the section of a scraper conveyor. The known methods of modeling the design of a section as an assembly model are analyzed. A new method of modeling the welded joints of the parts of the section is proposed, taking into account the maximum approximation to the real physical and mechanical properties of the product.

Скребковый конвейер является одной из основных единиц оборудования шахтного механизированного комплекса (рис. 1) [1]. Выполняя функцию погрузки и транспортировки угольной породы, секции конвейера подвергаются высоким нагрузкам и испытывают критические напряжения в определенных частях, что в будущем приводит к поломкам или к снижению производительности работы.

Исходя из проведенного анализа литературы по данной тематике [2-4 и др.], на текущий момент времени не существует обобщенных методик определения прочностных характеристик элементов секции скребкового конвейера. Подход к решению данной задачи основан на эмпирическом опыте и не является комплексным.

В работе [5] были выявлены недостатки в конструкции рештачной секции скребкового конвейера, такие как разрушение сварных соединений, наличие свободного хода рейки и т.д. Способ выявления данных недостатков был основан на разработке расчетной 3D-модели рештака с последующим применением

метода конечных элементов (МКЭ) для определения его прочностных характеристик в условиях нагружения, обусловленных особенностями эксплуатации.

Используя МКЭ при расчете изделия на прочность, становится возможным получение наиболее приближенной к реальной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции.

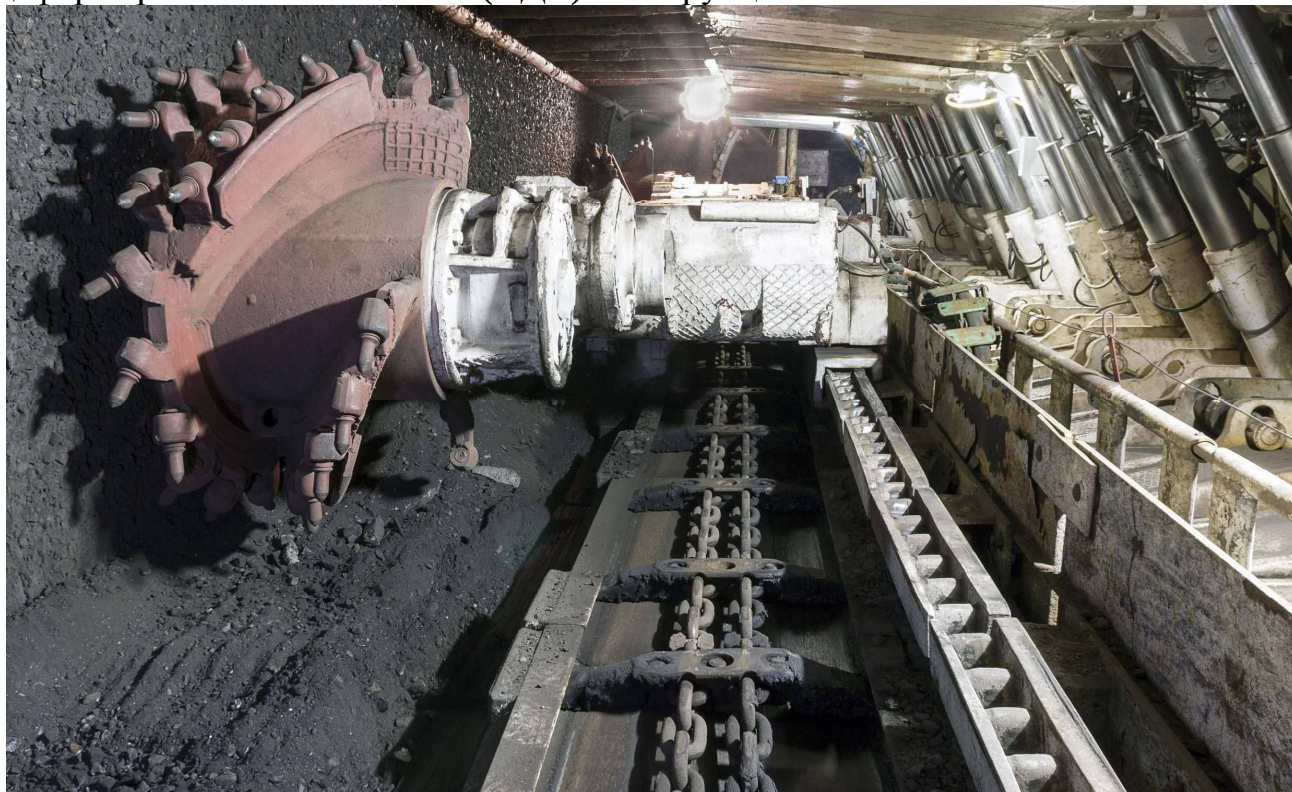


Рис. 1. Механизированный очистной комплекс (фото из открытых источников)

Анализируя порядок проведения вычислений в работе [5], выявлена неточность при создании расчетной модели, а именно то, что трехмерная твердотельная модель решетчатой секции была представлена в виде так называемой «единой детали». Т.е. при задании граничных условий в среде T-Flex в качестве частичного закрепления авторами был выбран такой тип контакта, как «жесткая связь». Такой вариант задания условий контакта между сопряженными гранями отдельных деталей используется в случае, когда необходимо жестко скрепить контактирующие поверхности тел. При этом перемещения грани одного тела без каких-либо ограничений передаются гранями другого тела, что не отражает в полной мере все нюансы соединений, которые оказывает значительное влияние на результаты расчета.

Необходимо отметить, что система автоматизированного проектирования T-Flex позволяет представлять модель сборочного узла с полным учетом физико-механических свойств отдельных деталей и характера их соединений. Команда частичного закрепления в задачах анализа сборочных моделей позволяет устанавливать следующие типы контактов между соприкасающимися гранями: «жесткая связь», «жесткая стенка», «касание» и «нет контакта».

Вариант «жесткая стенка» отличается от «жесткой связи» тем, одно из тел будет считаться недеформируемым, по аналогии с опорой «жесткая заделка» в

задачах сопротивления материалов. Тип закрепления «касания» позволяет моделировать контакт двух тел, при котором они могут свободно перемещаться друг относительно друга, но без взаимопроникновения, учитывая возникающую в результате нагружения деформацию сопряженных граней. Условие «нет контакта» отличается от «касания» тем, что не запрещает телам проникать друг в друга и не учитывает их совместную деформацию.

Показанное различие в граничных условиях задачи расчета на прочность сборочных моделей свидетельствует о том, что условие контакта «жесткая связь» является упрощением таких сборочных технологических операций, как сварка, пайка, склеивание. Однако при необходимости детального анализа напряженно-деформированного состояния таких конструкций следует использовать тип контакта «жесткая связь» только непосредственно в зоне влияния технологической операции.

Очевидно, что сварное соединение является основным типом присоединения деталей конструкции рештачного става (рис. 2). Моделирование сварных швов в системе T-Flex осуществляется путем задания вида применяемой сварки в соответствии с ГОСТ, параметров катета и усиления шва, характеристик сварочного материала, которые автоматически заносятся в таблицу швов. Однако, было установлено, что таким способом моделирования последующий расчет НДС конструкции становится невозможен из-за внутренней ошибки решателя T-Flex. Следовательно, сварной шов должен быть смоделирован, как отдельная деталь, входящая в сборочную модель. Стоит сказать, что такой способ имеет свои плюсы – возможность учета усиления шва и изменения его геометрических размеров в местах перехода форм контактируемых поверхностей.



Рис. 2. Секция скребкового конвейера

В качестве примера, рассмотрим вариант соединения двух деталей угловым сварным швом (рис. 3), очевидно, что характер контакта сопряженных граней деталей и сварного шва будет различным, а именно «жесткая связь» должна быть задана на участках: l'_1 – для деталей 1 и 2 (околошовная зона); l''_1 – для детали 1 и сварного шва; l_2 – для детали 2 и сварного шва. Для остальных контактируемых граней должно быть задано условие «касание».

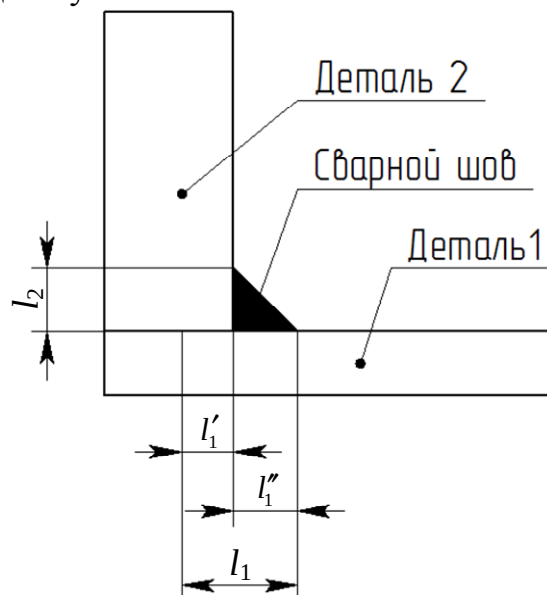


Рис. 3. Сварной шов

Для остальных контактируемых граней должно быть задано условие «касание».

Таким образом, каждая грань каждой отдельной детали должна быть разделена согласно представленным условиям. Используя функцию «Разделение граней» возможно более детализированное описание определённых элементов конструкций расчетной модели (рис. 4).

Применение данного инструмента позволит отразить расчетную модель таким образом, что к одной и той же поверхности детали, участвующей в сборке, будут заданы разные условия контакта, обусловленные реальными физико-механическими свойствами неразъемных соединений.

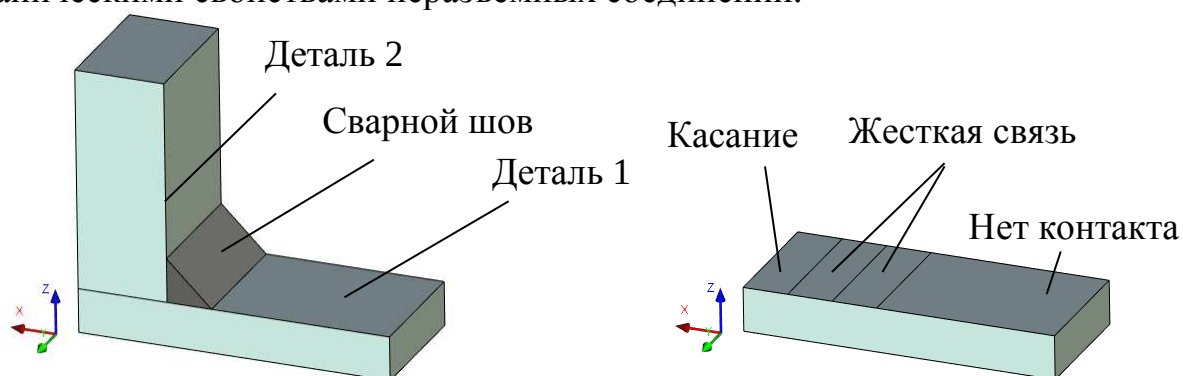


Рис. 4. Пример использования функции «Разделение граней»

Такой подход при разработке расчетной модели необходим для расчетов НДС решетчатой секции скребкового конвейера, как сборочной модели, с учетом свойств ее сборки и сварки, что позволит более точно оценить прочностные

характеристики конструкции, выявить проблемные узлы изделия, разработать предложения по рационализации технологических процессов изготовления рештака.

Наличие правильно подготовленной расчетной 3D-модели рештачной секции скребкового конвейера [6, 7] значительно упрощает работу инженеров-конструкторов, делает ее наиболее эффективной и продуктивной, а также обеспечивает высокое качество и надежность получаемых результатов.

Список литературы

1. Стариков А.П., Тужиков В.Ф., Громов П.Г. Новые конструктивные решения транспортировки угля в очистном забое // Уголь. – 2013. – № 4(1045). – С. 40-44.
2. Шавлак В.Ф. Алгоритм и особенности расчета горизонтально-наклонного скребкового конвейера с высокими скребками // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 3(9). – С. 52-56.
3. Косарев И.В., Мезников А.В., Волотов А.Е., Кондрахин В.П. Повышение технического уровня и безопасности эксплуатации забойных скребковых конвейеров // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – № 4(22). – С. 11-21.
4. Бабокин Г.И. Исследование энергетических параметров системы очистной комбайн-скребковый конвейер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 8. – С. 290-296.
5. Варнава А.В., Жуков И.А. К разработке методики расчета напряженно-деформированного состояния секции става шахтного скребкового конвейера // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 8. – С. 35-39.
6. Клишин В.И., Стародубов А.Н., Крамаренко В.А., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. Исследование параметров выпуска угля из подкровельной толщи средствами имитационного моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 4. – С. 44-51.
7. Стародубов А.Н., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 150-154.

Сведения об авторе:

Лазарев Артур Дмитриевич – аспирант.

МЕТОД ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОДНОПРИВОДНЫМИ МЕХАТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ С РАЗВЕТВЛЁННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧ

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

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

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

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

METHODS OF DIGITAL CONTROL OF SINGLE-DRIVE MECHATRONIC DEVICES WITH A BRANCHED FEED SYSTEM ON THE EXAMPLE OF A MACHINE TOOL

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

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

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

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

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

Принципиальная схема разработанной конструкции [1] представлена на рисунке 1 и включает: главный электропривод – 1; автоматическую коробку скоростей подач и управления осями – 2; блок электромагнитных муфт 3 ступенчатого изменения скоростей подач; блок электромагнитных муфт 4 управления горизонтальной осью ОХ; блок электромагнитных муфт 5 управления вертикальной осью ОZ; цифровая система управления – 6; перемещающийся по оси ОХ суппорт – 7; перемещающаяся по оси ОZ каретка 8, на которой в резцедержателе 9 крепится резец 10; датчик линейного перемещения суппорта по оси ОХ – 11; датчик линейного перемещения ползуна по оси ОZ – 12; обрабатываемая деталь – 13; планшайба – 14.

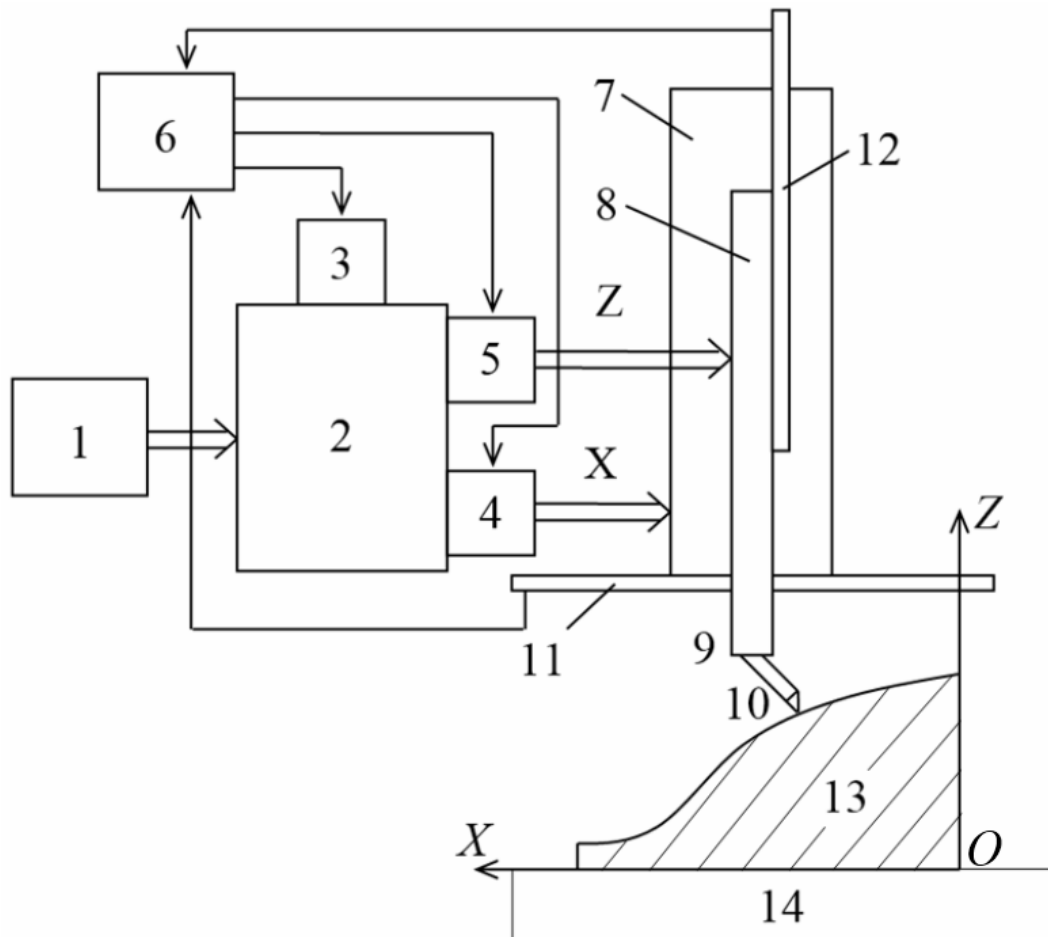


Рис. 1. Принципиальная схема МТК: 1 – главный электропривод; 2 – коробка скоростей подач; 3, 4, 5 – электромагнитные муфты управления скоростями подач и осями ОХ и ОZ; 6 – цифровая система управления; 7 – суппорт; 8 – каретка; 9 – резцедержатель; 10 – резец; 11, 12 – датчики линейного перемещения по осям ОХ и ОZ; 13 обрабатываемая деталь; 14 – планшайба станка

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- относительно большая шероховатость обработанной поверхности;
- отклонение режима работы приводов подач по осям OX и OZ из-за периодического переключения электромагнитных муфт;
- возможное появление перебегов при больших значениях скорости подач, приводящих к пропускам отдельных циклов слежения, и, как следствие, к ухудшению качества обработанной поверхности.

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

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

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

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

Перспективным является способ реализации слежения за траекторией с использованием частотно-импульсного режима (ЧИР) управления следящей подачи [3]. Особенность этого способа слежения за линией отрезка траектории заключается в том, что на ЭМУ следящей подачи (ось OZ) подаются импульсы напряжения с постоянной длительностью, которые определяются экспериментально с учётом особенностей динамики работы ЭМУ и технического

состояния приводов. Длительность импульса должна выбираться такой, чтобы за время его действия резец успел отойти на минимальное расстояние от линии отрезка.

Далее следящая подача отключается с одновременным включением тормозной муфты и, после небольшого перемещения резец останавливается и продолжает движение в направлении ведущей подачи (ось ОХ) с постоянной скоростью до точки пересечения с исходной линией отрезка. В момент пересечения на короткое время вновь включается следящая подача, и осуществляется очередное перемещение и т.д. до конечной точки обрабатываемого отрезка.

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

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

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

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

Список литературы

1. Патент №2504456 РФ. Способ автоматизированного управления копировальным токарным станком / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов, В.Т. Харитоненко, Д.А. Ульяничев. – Заявка №2012116175 от 20.04.2012; опубл. 20.01.2014.

2. Патент №2543020 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подачи станка / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Н.В. Лобанов. – Заявка №2013122789 от 20.05.2013; опубл. 27.02.2015.
3. Патент №2649353 РФ. Способ автоматического управления копировальным токарным станком с автоматической коробкой скоростей подачи / В.И. Малыгин, Ф.В. Черепенин, С.М. Сковпень, Л.В. Кремлева, Н.В. Лобанов. – Заявка №2017101701 от 19.01.2017; опубл. 02.04.2018.
4. Черепенин Ф.В., Сковпень С.М., Ульяничев Д.А. Цифровое моделирование при обработке литейных моделей из древесины и древесных материалов на станках токарной группы // Известия вузов. Лесной журнал – 2017. – № 1. – С. 166-176.

Сведения об авторах:

Сковпень Сергей Михайлович – к.т.н., доцент, доцент кафедры;

Лобанов Николай Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры;

Малыгин Никита Игоревич – студент.

РЕШЕНИЕ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ АНАЛИЗАТОРА ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПМРА-IV НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Нгуен Дык Ань¹, Чан Ван Тунг²

¹*Казанский государственный энергетический университет, Казань;*

²*Ханойский промышленный университет, Ханой, Вьетнам*

Ключевые слова: интернет вещей, экспресс-онлайн, анализатора, протонный магнитный резонанс, облачный сервер, мониторинг.

Аннотация. В настоящее время Интернет вещей является тенденцией развития во многих секторах экономики. Однако в нефтегазовом секторе разработка интеллектуальных нефтяных месторождений с применением интеллектуальных технологий для мониторинга и управления процессом добычи нефти наряду с экспресс-онлайн анализаторами на месторождении по-прежнему ограничена. Современные системы мониторинга и управления на нефтяных месторождениях часто основаны на SCADA или беспроводных сенсорных сетях, и даже современные устройства для анализа нефти не имеют возможности осуществлять дистанционный мониторинг и управление. Поэтому дистанционный мониторинг и наблюдение за изменениями параметров нефти на скважинах еще невозможны.

В данной статье авторы представляют решение, позволяющее использовать Интернет вещей для интеллектуализации процесса мониторинга и управления параметрами нефти на скважинах с помощью протонного магнитного резонансного анализатора ПМРА-IV, разработанного в Казанском государственном энергетическом университете.

SOLUTION FOR INTELLIGENT MONITORING AND CONTROL OF THE PMR-IV PROTON MAGNETIC RESONANCE ANALYZER BASED ON THE INTERNET OF THINGS

Nguyen Duc Anh¹, Tran Van Tung²

¹*Kazan State Power Engineering University, Kazan;*

²*Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam*

Keywords: internet of things, express online, analyzer, proton magnetic resonance, cloud server, monitoring.

Abstract. Currently, the Internet of Things is a development trend in many sectors of the economy. However, in the oil and gas sector, the development of smart oil fields using smart technologies to monitor and control the oil production process along with express online analyzers at the field is still limited. Current monitoring and control systems at oil fields are often based on SCADA or wireless sensor networks, and even modern oil analysis devices do not have the ability to carry out remote monitoring and control. Therefore, remote monitoring and observation of changes in oil parameters at wells is not yet possible.

In this article, the authors present a solution that allows using Internet of Things to intellectualize the process of monitoring and controlling oil parameters at wells using the PMRA-IV proton magnetic resonance analyzer developed at Kazan State Power Engineering University.

Понятия «Умное нефтяное месторождение – (УНМ)» и «Цифровое месторождение – (ЦМ)» [1] – это новые термины, разработанные в последние годы в связи с применением новых технологий в процессе добычи нефти и

оперативного, прямого контроля параметров нефти, с основным акцентом на технологии Больших данных (БД) и Интернет вещей (ИВ). Использование таких систем позволяет увеличить добычу нефти на 10-25% и снизить потери энергии до 8% [2, 3]. Однако, к сожалению, нефтегазовая промышленность Российской Федерации значительно отстает от темпов развития умных и цифровых месторождений в плане эксплуатации и мониторинга добычи нефти. Также следует учитывать объективный фактор – расположение нефтяных месторождений в суровых географических условиях, нехватка инфраструктуры, а также санкции, что замедляет процесс внедрения интеллектуальных технологий в производство на нефтяных месторождениях.

Еще одной задачей, рассматриваемой в процессе интеллектуализации нефтедобывающей отрасли, является разработка быстрых и прямых анализаторов нефти, способных подключаться к системам удаленного управления и мониторинга, а также к сети Интернет. Анализаторы нефти, основанные на протонном магнитном резонансе (ПМР) [4, 5], доказали, что они являются единственными устройствами, способными быстро определять характеристики и состав нефти без контакта и разрушения образца в рамках одного протонного магнитного резонанса анализатора (ПМРА) [6]. Однако объем данных, генерируемых анализатором ПМРА, очень велик, поэтому методы передачи данных с использованием SCADA кажутся неподходящими [7] из-за значительных задержек, короткого расстояния передачи и высоких требований к инфраструктуре. Поэтому использование технологии ИВ для анализатора ПМРА, чтобы подключаться и передавать данные на вторичные устройства и методы анализа, такие как использование нейронных сетей для анализа состава нефти, нефтяной эмульсии и других компонентов [8], является неотложной задачей. Преимуществами данного метода являются упрощение структуры инфраструктуры, возможность хранения и анализа больших объемов данных, а также доступ к ним из любой точки без строгих требований к устройствам доступа.

Исходя из того, что месторождения расположены в удаленных районах с низким уровнем технической инфраструктуры, отсутствием подключения к интернету или сигнала 4G, представленное в статье решение в основном направлено на выполнение задачи передачи данных на большие расстояния с низкой задержкой, высокой пропускной способностью и созданием облачного сервера, чтобы конечные устройства, такие как компьютеры, мобильные телефоны и т.д., могли получить доступ для мониторинга и загрузки данных. На рисунке 1 представлено описание решения для мониторинга и контроля параметров анализатора ПМРА-IV на основе технологии ИВ.

Анализатор ПМРА-IV размещается вблизи скважин для непрерывного мониторинга изменения параметров нефти. Анализатор подключен к интернету через Шлюз. Однако, как отмечается в задаче, места добычи нефти часто не имеют интернет-покрытия, поэтому в структуре шлюза дополнительно используются устройства для передачи радиосигналов, которые обычно применяются в системах ИВ, такие как: *LoRa*, *NB-IoT* и т.д. Интернет- роутер устанавливается в местах с доступом к интернету. На этих станциях

располагаются приемники радиосигналов, которые затем преобразуют данные и отправляют их на облачный сервер. Через IP-адреса и браузеры конечные устройства, такие как компьютеры и мобильные телефоны, подключаются к месту хранения данных, загружают и обрабатывают их в соответствии с конкретными потребностями.

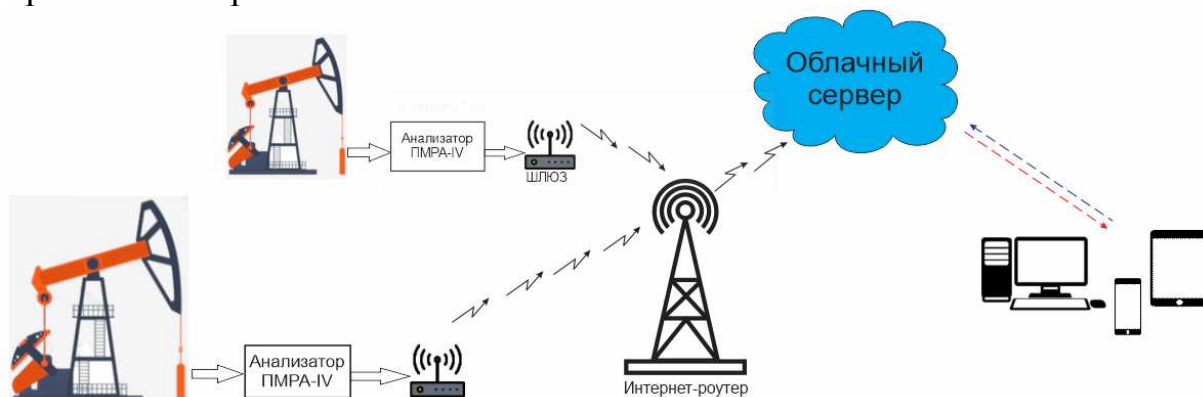


Рис. 1. Мониторинг и контроль выходных параметров анализатора ПМРА-IV на базе ИВ

В случае, если скважины находятся в зоне с интернет-покрытием, шлюзы могут напрямую подключаться к интернету и отправлять данные с анализатора ПМРА-IV на облачный сервер, минуя станции интернет-роутер.

В настоящее время существует множество поставщиков облачных серверов для приложений Интернета вещей, таких как *Amazon*, *Google*,... или Яндекс в России. Обычно пользователи должны платить за аренду или покупку пакета услуг у этих поставщиков. Однако пользователи также могут использовать бесплатные облачные серверы от других поставщиков. Несмотря на ограниченный набор дополнительных услуг, для целей хранения данных таких бесплатных облаков вполне достаточно.

Авторы разработали систему мониторинга параметров потока жидкости от анализатора ПМРА-IV в интерфейсе сайта для облегчения процесса мониторинга, контроля и получения данных. Данные передаются с анализатора ПМРА-IV на облачный сервер с помощью бесплатного сервиса от провайдера *Somee.com*. Через адрес доступа: <http://mayphantich.somee.com> пользователи могут отслеживать параметры, которые анализатор отправляет на облачный сервер. Данные, загружаемые из облака, сохраняются в формате файлов *Excel*, что обеспечивает удобный доступ к параметрам и проведение анализа.

Интерфейс после входа в систему показан на рисунке 2. Слева расположено большое меню для выбора таких функций, как «Мониторинг – *Monitor*», «Отчет – *Report*», «Управление – *Control*» и «Выход – *Logout*». На рисунке 3 показан интерфейс при выборе меню «Мониторинг – *Monitor*» для отслеживания изменений параметров нефти в режиме реального времени. Изменение визуально отображается в виде диаграммы, мгновенное значение измерения отображается в виде измерителя Гауза. Значения измерений сохраняются до 3 месяцев, изменения параметров можно отслеживать в течение многих периодов времени, таких как 1 час, 6 часов, 1 день и т.д.

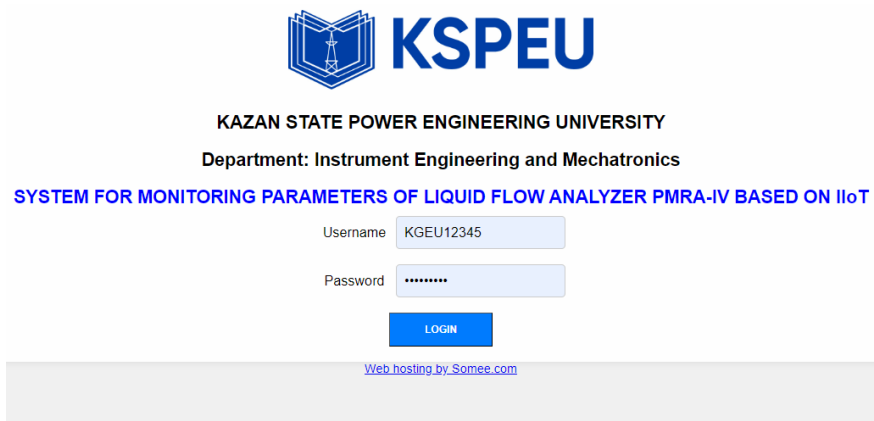


Рис. 2. Интерфейс входа в систему

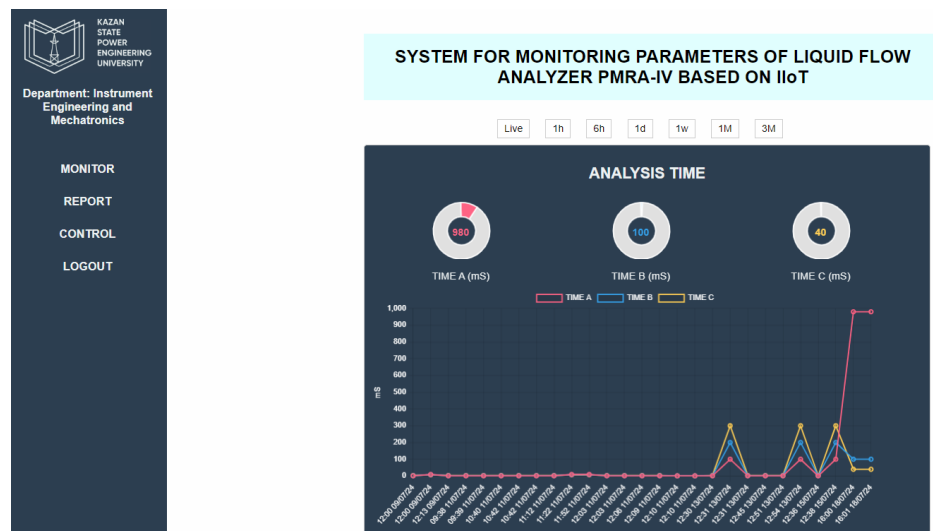


Рис. 3. Интерфейс меню «Мониторинг – Monitor» для контроля изменения параметров нефти на выходе анализатора ПМРА-IV

На рисунке 4 показан интерфейс «Отчет – Report», который позволяет пользователю полностью отслеживать все изменения параметров после анализа и точное время выполнения этих анализов. Эти данные экспортируются и загружаются на компьютер в формате *Excel* после нажатия кнопки «Экспорт Excel».

REPORT DATA										
STT	date Time	timeA	timeB	timeC	amplitudeA	amplitudeB	amplitudeC	concentrationA	concentrationB	concentrationC
1	7/9/2024 12:00:00 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	7/9/2024 12:00:01 PM	9	8	7	6	5	4	3	2	1
3	7/9/2024 12:13:54 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	7/11/2024 9:38:28 AM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	7/11/2024 9:39:05 AM	1	2	3	3	4	5	5	6	7
6	7/11/2024 10:40:45 AM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	7/11/2024 10:42:04 AM	1	2	3	3	4	5	5	6	7
8	7/11/2024 10:42:56 AM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	7/11/2024 11:12:11 AM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	7/11/2024 11:22:20 AM	9	8	7	6	5	4	3	2	1
11	7/11/2024 11:52:27 AM	9	8	7	6	5	4	3	2	1
12	7/11/2024 12:03:22 PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Рис. 4. Интерфейс «Отчет – Report» для экспорта данных и загрузки на компьютер

Интернет вещей постепенно становится популярным и помогает значительно повысить эффективность многих секторов экономики. Это считается технологией будущего. В нефтегазовой отрасли технология ИВ имеет множество

возможностей применения для развития и повышения эффективности добычи нефти. Результаты исследований авторов открывают множество возможностей для применения ИВ для интеллектуализации устройств анализа нефти на основе ПМР, позволяя получить прямой доступ к аналитическим данным ПМРА без прямых манипуляций с анализатором.

Список литературы

1. Демарчук В.В. Перспективы и направления реализации проектов «интеллектуальных» месторождений нефти и газа // Молодой ученый. – 2014. – № 19 (78). – С. 284-289.
2. Rosendahl T., Hepso V. Integrated operations in the oil and gas industry: sustainability and capability development. – Imprint of IGI Global. 2013.
3. Тихомирнов Л. И. Цифровизация: ключевые факторы успеха // Нефтегаз. – 2019. – №. 1-2. – С. 142-143.
4. Kashaev R. Anh, N.D. Kozelkova, V. et al. Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits // Energies. 2023, vol. 16(3), p. 1080.
5. Kashaev R.S., Nguyen D.A., Kozelkov O.V. Apparatus-program complex for on-line express-control of crude oils properties by proton magnetic resonance method. Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA – INDIA // Proceedings of the International University Scientific Forum. – UAE, 2023. – P. 213-220.
6. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Проточный экспресс-анализатор протонного магнитного резонанса в составе промышленного интернета вещей // Известия вузов. Приборостроение. – 2024. –Т. 67, №5. – С.425-434. – DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-425-434.
7. Ramzey H., Badawy M., Elhosseini M., Elbaset A. A. I2OT-EC: A Framework for Smart Real-Time Monitoring and Controlling Crude Oil Production Exploiting IIOT and Edge Computing // Energies. 2023, vol. 16, p. 2023. doi.org/10.3390/en16042023.
8. Ovseenko G.A., Kashaev R.S., Kozelkov O.V., Filimonova T.K., Evdokimova T.S. and Mardanova A.M. Improving the information veracity of the complex of multiparametric control of the relaxometer based on a neural network // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086740.

Сведения об авторах:

Нгуен Дык Ань – аспирант;

Чан Ван Тунг – д.т.н., преподаватель.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ МУЛЬТИРОТОРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Тикунов А.В., Бурковский А.В., Писаревский Ю.В., Титова Л.Н., Черных Т.Е.,
Писаревский А.Ю.*

Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Ключевые слова: энергоэффективность, полетное время, беспилотный летательный аппарат, бесконтактный электродвигатель постоянного тока, винтомоторная группа, схема обмоток.

Аннотация. На сегодняшний день задача снижения энергопотребления беспилотного летательного аппарата на электрической силовой установке является одной из самых актуальных, так как это напрямую влияет на длительность нахождения аппарата в воздухе. Решить эту задачу можно только повысив энергоэффективность электродвигателя, используемого в составе винтомоторной группы беспилотного аппарата. В данной работе приводятся результаты исследований, направленных на повышение энергоэффективности винтомоторной группы за счет перекоммутации схемы соединения обмоток бесконтактного электродвигателя постоянного тока.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTRIC MOTOR OF THE PROPELLER-MOTOR GROUP OF A MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Tikunov A.V., Burkovsky A.V., Pisarevsky Yu.V., Titova L.N., Pisarevsky A.Yu.,
Chernykh T.E.*

Voronezh State Technical University, Voronezh

Keywords: energy efficiency, flight time, unmanned aerial vehicle, brushless DC electric motor, propeller-motor group, winding diagram.

Abstract. Today, the issue of reducing the energy consumption of an unmanned aerial vehicle on an electric power plant is one of the most pressing, since this directly affects the duration of the vehicle's stay in the air. This problem can only be solved by increasing the energy efficiency of the electric motor used in the propeller-motor group of an unmanned vehicle. This paper presents the results of studies aimed at improving the energy efficiency of the propeller-motor group by re-commutating the connection diagram of the windings of a brushless DC electric motor.

Развитие и совершенствование беспилотных авиационных систем в последнее десятилетие стало стратегической задачей во всем мире. Всё большее распространение получают беспилотные летательные аппараты самолётного и мультироторного типа с электрической силовой установкой [1]. Одной из приоритетных задач при разработке электрических силовых установок БЛА является повышение энергоэффективности электродвигателей винтомоторных групп. Как хорошо известно, для БЛА мультироторного типа чаще всего используются бесконтактные электродвигатели постоянного тока (БДПТ) на постоянных магнитах, так как этот тип машин позволяет получать широкий диапазон изменения частоты вращения, а самое главное имеет высокую надежность и требуемые массогабаритные показатели.

От энергоэффективности электродвигателя ВМГ зависит один из важнейших параметров БЛА на электрической силовой установке – расстояние, которое оно может пройти до следующей подзарядки (полетное время). Этот параметр напрямую зависит от емкости аккумулятора, и задача увеличения полетного времени может быть решена применением аккумулятора с большей емкостью, однако это приведет к увеличению массы аппарата, что в БЛА является критичным, так как изменяется коэффициент тяговооруженности:

$$K_T = T_{\text{МАКС}} / M \cdot g,$$

где $T_{\text{макс}}$ – максимальная тяга, M – полная масса БЛА, g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Учитывая, что запас тяги позволяет подобрать БЛА под конкретное назначение, а также определить величину полезной нагрузки. Например, для БЛА перемещающихся с равномерной скоростью коэффициент запаса тяги должен составлять 1,5...2,5, а для спортивных аппаратов 6...8 [2], то увеличение массы аппарата может привести к невозможности его эксплуатации.

Известно, что БДПТ с постоянными магнитами имеют три обмотки на статоре, которые соответственно имеют шесть выводов – начала и концы каждой обмотки, которые можно соединить между собой двумя способами – «звездой» или «треугольником» (рис. 1).

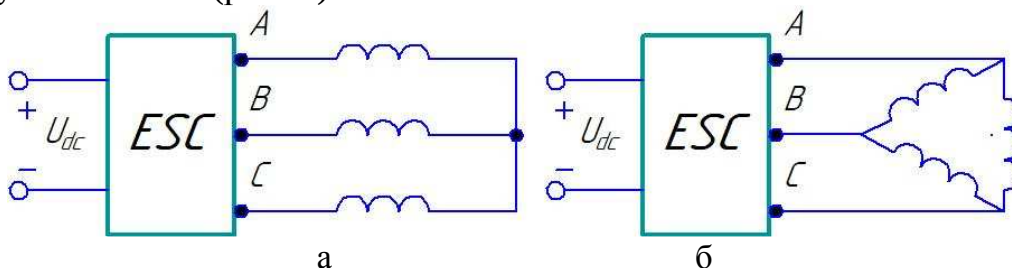


Рис. 1. Схемы соединения обмоток: а – соединение обмоток «звезда»; б – соединение обмоток «треугольник»

От схемы соединения обмоток зависят токи в обмотках и соответственно энергопотребление. Для электродвигателей ВМГ БЛА зарубежные производители чаще всего используют схему соединения обмоток статора «треугольник» (в некоторых источниках такую схему соединения называют «дельта») с целью получить полную мощность электрической машины для создания максимально возможной тяги ВМГ. Однако такой способ соединения приводит к повышенной энергоемкости, а также к значительному нагреву электродвигателя, что во многом сказывается на его сроке службы.

В ходе наших исследований были проведены эксперименты, направленные на уточнение влияния схемы соединения обмоток на показатели электродвигателя и на летно-технические характеристики БЛА в целом.

Экспериментальные исследования проводились с ВМГ на различных электродвигателях и с воздушными винтами различного диаметра, шага и формой законцовок лопастей. На рисунке 2 приведены результаты одного из экспериментов с ВМГ при использовании воздушного винта 7035-3.

В ходе анализа результатов всех проведенных экспериментов было установлено, что при использовании схемы соединения «треугольник» ВМГ

развивает большую максимальную частоту вращения, чем при соединении «звезда». Однако при использовании схемы «треугольник» растут и энергозатраты причем с ростом тяги, разница в энергопотреблении увеличивается. Таким образом, электродвигатель с соединением обмоток по схеме «треугольник» приводит к более быстрому разряду аккумулятора, а, следовательно, уменьшению времени полетного времени БЛА.

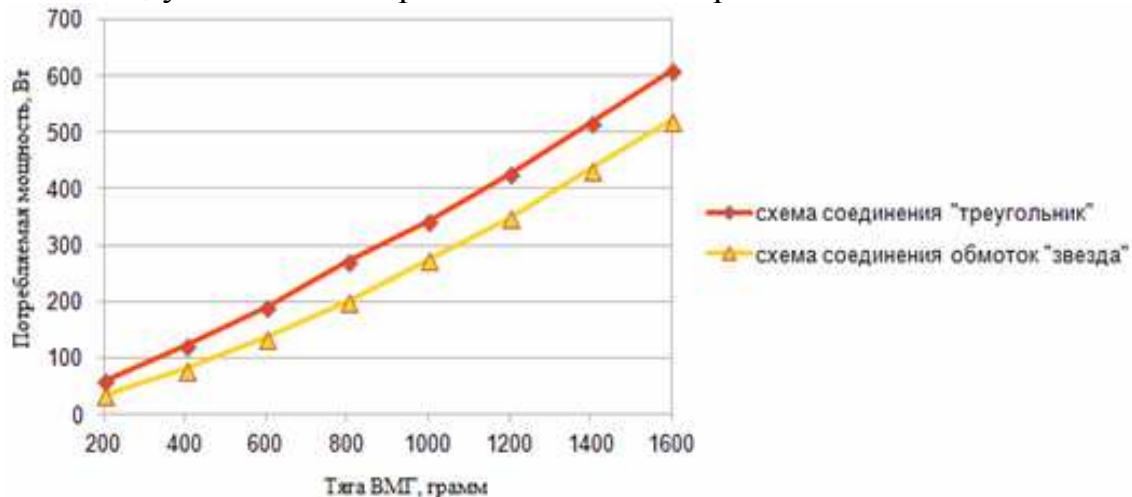


Рис. 2. Зависимость энергопотребления от тяги ВМГ

Исходя из полученных результатов следует, что для получения требуемых летно-технических характеристик БЛА целесообразно при проектировании электродвигателя учитывать его целевое назначение и требования к режиму полета. То есть, для БЛА транспортного назначения, целесообразно использовать электродвигатель со схемой обмоток статора «звезда», так как для данного назначения нет потребности в широком диапазоне изменения частоты вращения винта, коэффициент тяговооруженности может быть не более 2,5, а для создания необходимой тяги достаточно увеличить диаметр винта [3]. Если же назначение БЛА связано с необходимостью быстрого изменения режима полета (аппараты спортивного или специального назначения), то для таких аппаратов целесообразно использовать схему «треугольник», так как для этих аппаратов коэффициент тяговооруженности необходимо иметь от 6 и выше.

Также необходимо отметить, что на практике широко используется способ повышения энергоэффективности асинхронных двигателей путем переключения схем обмоток из пускового в рабочий режим [4], но для БДПТ этот метод не применялся. Приведенные выше результаты экспериментальных исследований позволяют предположить, что использование системы перекоммутации схем обмоток статора БДПТ в составе ВМГ позволит создавать двурегимные БЛА с изменяемой тяговооруженностью.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №FZGM-2024-0006).

Список литературы

1. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Уразбахтин Р.Р., Месропян А.В. Разработка и исследования бесконтактного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов //

- Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 26-38. – DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-26-38.
2. Свердлов С.З. Статический потолок электрического мультикоптера // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – Вып. 10. – doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1808.
 3. Писаревский Ю.В., Писаревский А.Ю., Тикунов А.В., Титова Л.Н., Бурковский А.В. Методика определения параметров электродвигателя винтомоторной пары беспилотного квадрокоптера // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 4(61). – С. 19-26. – doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-19-26
 4. Панов А.Т. Повышение энергоэффективности при переключении обмоток статора по схеме «треугольник-звезда» асинхронных двигателей в текстильной промышленности // Вопросы науки и образования. – 2017. – № 10 (11). – С. 8-11.

Сведения об авторах:

Бурковский Александр Викторович – к.т.н., доцент, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах;

Тикунов Алексей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения;

Писаревский Юрий Валентинович – к.т.н., доцент, доцент, кафедры электромеханических систем и электроснабжения;

Титова Лариса Николаевна – к.т.н., доцент, доцент, кафедры электромеханических систем и электроснабжения;

Черных Татьяна Евгеньевна – старший преподаватель кафедры электромеханических систем и электроснабжения;

Писаревский Александр Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения.

МЕХАТРОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Веригин А.Н., Коробчук М.В., Ишутин А.Г., Саенко С.С.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург

Ключевые слова: мехатроника, химическая технология, мехатронные технологические комплексы физико-химического назначения, управление качеством, мехатронный модуль, техническая система.

Аннотация. В статье делается обоснование выбора нового объекта исследования в рамках системного анализа и дальнейшего совершенствования химико-технологического производства с целью его перевода в качественно новое современное состояние сродни мехатронике для повышения его эффективности. При рассмотрении объекта научных исследований исходим из двух начал: химической технологии – основы химического производства и мехатроники как технологии, объединяющей механику, электронику и управление.

MECHATRONIC TECHNOLOGY COMPLEX AS AN OBJECT OF RESEARCH

Verigin A.N., Korobchuk M.V., Ishutin A.G., Saenko S.S.
Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint-Petersburg

Keywords: mechatronics, chemical technology, mechatronic technological complexes of physico-chemical purpose, quality management, mechatronic module, technical system.

Abstract. The article substantiates the choice of a new object of research within the framework of system analysis and further improvement of chemical and technological production in order to transfer it to a qualitatively new modern state akin to mechatronics to increase its efficiency. When considering the object of scientific research, we proceed from two principles: chemical technology – the basics of chemical production and mechatronics as a technology combining mechanics, electronics and control.

Опыт, накопленный при создании объектов мехатроники в области машиностроения, показывает, что коренная перестройка химико-технологических производств должна быть направлена на создание подобных объектов. Однако этот опыт не может быть формально перенесён в новые условия. Несомненно, должны быть учтены следующие положения:

- создание в химической технологии новых технических средств должно учитывать последние достижения машиностроения;

- их эффективное использование в химической технологии возможно на основе правильного выбора объекта научных исследований.

В нашем случае **объект научных исследований** опирается на два начала:

- химическую технологию как основу производства продуктов химии высокого качества с необходимыми потребительскими свойствами;

- мехатронику, как технологию, которая объединяет механику, электронику и управление на основе компьютерных технологий.

Создаваемые при этом объекты техники должны быть способны к выполнению конкретного процесса химической технологии.

Объект, который в полной мере отвечает этим двум началам, может быть **мехатронный технологический комплекс** (МТК). Как получается такое название? Мехатронный – указывает на его принадлежность к машиностроению. Технологический комплекс – указывает на его принадлежность к химической технологии.

Выбор МТК в качестве объекта исследования требует более детального обоснования. Рассмотрим его как систему, основные признаки которой относятся к области техники. *Под МТК как технической системы понимается совокупность процессов, протекающих при проведении отдельной технологической операции, и технических средств необходимых для её осуществления.*

Данная техническая система не является изолированной, поскольку она при эксплуатации взаимодействует с внешней средой. В этом взаимодействии проявляются её функции и степень достижения цели, для которой МТК был создан. Функциональный аспект определяется характером технологической операции, для выполнения которой он создан. Потенциальные возможности функционирования МТК, присущие ему внутренне, ограничиваются воздействием на него внешней среды. Степень реализации функций зависит от уровня его совершенства, которое закладывается при создании (изучении, разработке и проектировании) и обеспечивается в сфере машиностроительного производства. *МТК – это реальный материальный объект, который является самостоятельным машиностроительным изделием мехатроники, включающий отдельные аппараты, машины, вспомогательное оборудование, приборы КИП и автоматические средства управления технологического процесса, а, следовательно, и компьютерные технологии.*

Поэтому необходимо изучать МТК в трёх периодах его существования: при разработке, создании и эксплуатации. В каждом из них во многом независимо можно сформулировать свои требования к МТК. Техническое совершенство формирует период его эксплуатации, создание определяется периодом его изготовления (машиностроением) и закладывается при разработке. Непосредственно при создании благодаря МТК устанавливается связь между химической технологией и машиностроением.

Анализ периодов эксплуатации, создания и разработки объектов техники в химической технологии полностью доказывает справедливость выбора в качестве объекта научных исследований химической технологии – мехатронного технологического комплекса.

Эффективность технических средств формируется при их разработке, уточняется в период создания и окончательно реализуется в период их изготовления. Любая методология разработки предполагает применение методов управления качеством изделия [1-2]. Эти методы связаны с выполнением определённых рекомендаций, которые непосредственно не связаны с конкретным производством, именно когда появляется необходимость совершенствования объекта техники в рамках системных исследований. Как, системность одинаково необходима при создании различных объектов техники, так средств производств высокой эффективности в химической технологии на основе мехатроники.

Разработка МТК в нашем случае является более обобщающим понятием, чем управление качеством, которое начинается ещё на её начальной стадии.

Поэтому не будем делать различия между разработкой и управлением качеством объекта техники. Основными особенностями, которые делают разработку творческим процессом – это нестабильность, и неопределённость в начале постановки задачи. Что определяет трудность разработки объекта техники, но при этом обеспечивает условия для широкого поля творческой деятельности.

Малоизученными остаются проблемы, которые возникающие при синтезе технических решений, когда свойства вновь создаваемого объекта невозможно однозначно описать на основе свойств его составляющих. Речь идёт об исследовании системности как одной из важнейших концепций современной технической науки [1].

Отличие МТК от автоматических систем управления, прежде всего, состоит концепция построения и подхода к реализации функциональных преобразователей. В МТК осуществляется не только опрос периферийных устройств и последующее исполнение необходимых команд, но и выполнение необходимых действий по корректировке требуемых параметров с учётом меняющихся внешних факторов. Они являются следующим поколением автоматизированных устройств, которые позволяют не только выполнить необходимый порядок действий, а осуществлять анализ, сбор и хранение данных.

Одним из существенных признаков МТК является его модульность. В автоматических системах интерфейсы являются отдельными независимыми устройствами, которые необходимы при монтаже системы управления это – применения дополнительных переходников, драйверов и иных промежуточных средств, и способов коммутации.

Традиционно, химико-технологическое производство является высоко автоматизированным. Однако, автоматизированные системы управления технологическими процессами, позволяют реализовать лишь самый нижний, первый уровень управления. То есть они позволяют организовать локальный контроль над оборудованием, обеспечив поступление сигналов об отказе или изменении режима его работы или об отклонении контролируемых технологических параметров от заданных значений [3, 4].

В основе МТК лежит идея взаимосвязи механических и электротехнических мехатронных модулей, находящихся под управлением компьютерных элементов и устройств, и каждая составляющая обеспечивает отдельный определённый функционал, а совместные действия образуют качественно новую систему и иной функционал [5]. Спецификой МТК является то, что помимо трёх основных, составляющих (механической, электрической и программной) дополнительно появляется ещё один фактор, характеризующий состояние среды, на которую оказывается воздействие. Требуется обеспечить не просто контроль над функционированием и состоянием МТК – режимом работы, положением в пространстве, характером движения кинематических звеньев, а дополнительно установить их взаимосвязь и согласовать с итоговым качественным состоянием среды, на которую оказывается воздействие. В МТК обеспечивается контроль и управление входными параметрами. При точном соответствии их значений, которое обеспечивает постоянство результата на выходе. Для их реализации в нашем случае этого оказывается недостаточно,

поскольку необходимо учитывать обрабатываемую среду не только как объект воздействия, но и как составляющую часть МТК (см. рис. 1).

На примере традиционного графического представления взаимосвязи отдельных направлений технической деятельности изображение МТК дополнено соответствующим блоком. Можно сделать следующее описание каждой из его частей с указанием их взаимных связей.



Рис. 1. Структура МТК

Механическая часть включает в себя элементы установки, узел привода, устройства уплотнения и рабочие элементы, оказывающие непосредственное воздействие на обрабатываемую среду. Контроль состояния, положения отдельных элементов выполняется с помощью необходимых преобразователей, датчиков и сенсоров.

В силовую часть входят модули движения (например, мотор редуктор или электромагнит), преобразователи частоты, стабилизаторы, сетевые фильтры, блоки питания, регуляторы мощности. Различные преобразователи, сенсоры, конечные выключатели и прочие элементы, позволяющие получить данные об актуальном состоянии оборудования, внешней и обрабатываемых сред, состоянии механических и электрических цепей, входящих в состав низковольтной части.

Работа с низковольтной и силовой частями осуществляется с использованием устройства управления. Последнее состоит из электронных силовых преобразователей и информационно – измерительных цепей, которые иерархически так же входят в состав низковольтной электрической сети МТК.

Устройства управления могут представлять собой как отдельные микроконтроллерные блоки, так и быть интегрированными в систему управления

верхнего уровня, например, компьютер оператора. В последнем случае, для управления МТК используется комплекс специально разрабатываемых аппаратных и программных средств.

К вопросам технологической составляющей МТК относятся, прежде всего, параметры, характеризующие состояние обрабатываемой среды не с точки зрения результата технологического процесса (например, его качества), а с позиции ее состояния, когда происходят качественные изменения.

Обрабатываемые вещества является не только объектом воздействия, но и средой, в которой необходимо реализовать конкретные действия. Это обусловлено целым рядом причин, к которым, например, относится проблема неоднородности полей скоростей, градиентов температур и концентраций обрабатываемых веществ и прочее. В технологическом блоке ставится задача интеллектуализации не отдельных мехатронных модулей, а МТК в целом [6].

Так, задача системы управления МТК заключается не просто в преобразовании в определённое механическое воздействие первоначальной, поступающей с верхнего уровня управления информации, а с учётом реализации принципов обратной связи, осуществление анализа поступающих данных и выбор режима его функционирования.

Заключение. Можно сформулировать следующее определение МТК – это объект мехатроники, который осуществляет физико-химическое взаимодействия в обрабатываемой среде, характеристики которого одновременно определяют и внешнюю среду функционирования средств воздействия. Например, МТК вибрационного перемешивания, где над находящимися в ёмкости веществами совершаются определённые действия, сопровождающиеся их, как качественными, так и количественными изменениями, и в результате превращения которых меняются реологические свойства обрабатываемой среды и её гидродинамическая обстановка.

Список литературы

1. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Либроком, 2014. – 532 с.
2. Глушков В.М. Кибернетика, вычислительная техника, информатика: избранные тр. в трех томах. Т. 1. Математические вопросы кибернетики. Т. 2. ЭВМ – техническая база кибернетики. Т. 3. Кибернетика и ее применение в народном хозяйстве. – Киев: Наукова думка, 1990.
3. Шувалов В.В., Огаджанов Г.А., Голубятников В.А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. – М.: Химия, 1991. – 480 с.
4. Гладких Т.Д. Автоматизация технологических процессов в нефтегазовой отрасли. – Инфра-Инженерия, 2022. – 152 с.
5. Marina Indri, Roberto Oboe Mechatronics and robotics: new trends and challenges Boca Raton. – CRC Press. 2020. – 280 p.
6. Коробчук М.В., Веригин А.Н., Саенко С.С. Учебно-исследовательская мехатронная вибрационная установка // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 13. – С. 55-58. – DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-55-58.

Сведения об авторах:

Веригин Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой;

Коробчук Максим Васильевич – к.т.н., докторант;

Ишутин Алексей Георгиевич – к.т.н., доцент;

Саенко Савелий Сергеевич – аспирант, ассистент.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНЦЕВОЙ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ФРЕЗЫ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ПОКРЫТИЕМ TiAlN

Клуонис А.С., Плотников С.А.

Вятский государственный университет, Киров

Ключевые слова: концевые твердосплавные фрезы, поверхностное покрытие, экспресс-испытания, сила трения, TiAlN.

Аннотация. В статье исследованы трибологические свойства покрытия TiAlN в условиях трения на оригинальной установке. Определено, что в процессе испытания при установлении нормального режима износа сила трения при осевой нагрузке в 200 Н на фрезу составляет 4,5 Н с постепенным возрастанием. Результаты исследования представляют интерес для дальнейшего изучения влияния параметров поверхностного покрытия на трибологические свойства инструментов.

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE TiAlN SURFACE-COATED CARBIDE END MILL

Kluonis A.S., Plotnikov S.A.

Vyatka State University, Kirov

Keywords: end carbide cutters, surface treatment, express tests, friction force, TiAlN.

Abstract. In this article, the tribological properties of the TiAlN coating under friction conditions at the original installation are investigated. It was determined that during the test, when establishing a normal wear regime, the friction force at an axial load of 200 N per mill is 4.5 N with a gradual increase. The results of the study are of interest for further study of the effect of surface coating parameters on the tribological properties of instruments.

Металлообрабатывающие предприятия России активно применяют режущий инструмент из углеродистых и легированных сталей, а также из твердых сплавов. При выборе материала инструмента учитываются его тип, форма, свойства обрабатываемого материала и режимы работы. Несмотря на санкции, большинство предприятий предпочитают импортные инструменты от компаний, таких как Sandvik Coromant и Kennametal, считая их более качественными [1].

Тем не менее, ограничения побуждают предприятия создавать отечественные варианты. Российские заводы, такие как Кировградский завод твердых сплавов и Свердловский инструментальный завод, производят инструменты, которые конкурируют с импортными аналогами, также АО «Лепсе» (г. Киров) приступило к производству альтернатив импортных инструментов, обеспечивая весь цикл производства от изготовления самого инструмента до нанесения покрытий.

В ходе внедрения новых инструментов в технологические процессы предприятия АО «Лепсе» было обнаружено, что срок службы аналогов уступает времени работы оригинальных инструментов. В связи с этим было принято

решение о проведении ряда исследований, направленных на изучение эксплуатационных характеристик фрез, с их дальнейшим улучшением [2].

В работе [3] были проведены металлографические исследования инструментального материала и поверхностного покрытия концевой фрезы диаметром 5 мм (рис. 1), установлено, что основой инструментального материала является сплав WC-Co, а износостойкого слоя – TiAlN. На данном этапе работы проведены испытания для определения силы трения на оригинальной установке, описанной в [4]. Эксперимент проводился при следующих режимах: частота реверсивного вращения – 500 об/мин, осевая нагрузка на инструмент – 200 Н, СОЖ – вода, материал контртела – сталь 2Х18Н10Т.

В ходе проведения испытания была получена зависимость силы трения от времени от времени работы инструмента, представленная на рисунке 2.



Рис. 1. Испытуемая фреза

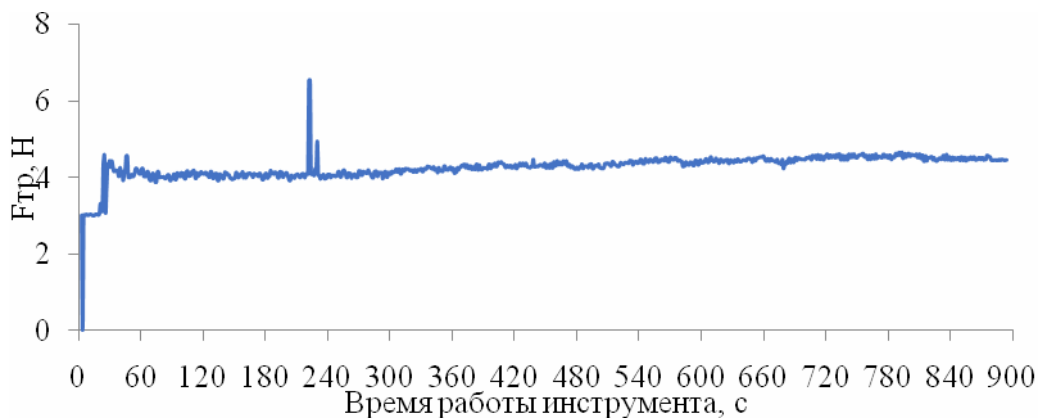


Рис. 2. Зависимость силы трения от времени работы фрезы

Рассмотрим основные этапы протекания процесса.

1. Начальный период (0-20 секунд) – значительное повышение силы трения в начале (быстрый скачок), достигая пика около 4,5 Н. Далее происходит небольшое снижение и стабилизация в районе 4 Н

2. Стабилизация (20-180 секунд) – сила трения стабилизируется в пределах 4-4,5 единиц, с незначительными колебаниями.

3. Резкий скачок (220 секунда) – в этом момента наблюдается резкий скачок силы трения до почти 7 единиц, после чего она падает и быстро возвращается к 4 единицам (возможно образование скола на поверхности фрезы).

4. лительная стабилизация (240-900 секунд): после скачка сила трения снова стабилизируется и повышается незначительно до конца наблюдаемого времени (происходит стабильный износ).

Параметры поверхностного покрытия TiAlN, влияющие на трибологические свойства фрез, включают толщину покрытия, структуру и фазу, твердость, адгезию, состав, стехиометрию и поверхностную шероховатость. Увеличение толщины улучшает износостойкость, но слишком толстые слои могут стать хрупкими. Кристаллическая структура и фаза влияют на твердость и устойчивость к износу, а высокая твердость обеспечивает лучшее сопротивление

механическому износу. Качество адгезии влияет на долговечность и стабильность, а соотношение Ti и Al в сплаве влияет на термическую стойкость [5]. Гладкие поверхности снижают коэффициент трения, а добавление углерода или бора улучшает термическую стабильность и износостойкость. Термическая обработка изменяет механические свойства и трибологическое поведение покрытия.

Результаты данного исследования могут послужить отправной точкой в изучении влияния рассмотренных параметров на трибологические свойства разрабатываемых инструментов, что является актуальной задачей современного машиностроения

Список литературы

1. Клуонис А.С., Плотников С.А. Обзор современных методов нанесения износостойких покрытий и их сравнительный анализ // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. – С. 284-287.
2. Плотников С.А., Клуонис А.С. Определение периода стойкости режущих инструментов, участвующих в технологическом процессе механической обработки детали «Крыльчатка» // Общество. Наука. Инновации (НПК-2024): Сборник материалов XXIV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Киров, 23-25 апреля 2024 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2024. – С. 127-131.
3. Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N., Kluonis A.S., Kozlov E.V. Composition of the Hardened Surface of a Carbide Cutting Tool // Russian Engineering Research. 2024, vol. 44, no. 4, pp. 534-536. DOI: 10.3103/s1068798x24700655.
4. Плотников С.А., Клуонис А.С. Методика испытаний концевых твердосплавных фрез при осевом нагружении // Современные проблемы теории машин. – 2024. – № 17. – С. 139-141. – DOI: 10.26160/2307-342X-2024-17-139-141.
5. Маркова Е.А., Яцкевич О.К. Износостойкие покрытия для режущих инструментов: пособие. – Минск: БНТУ, 2021. – 50 с.

Сведения об авторах:

Клуонис Александр Сергеевич – аспирант;

Плотников Сергей Александрович – д.т.н., профессор.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СЛИТКОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Егорова Ю.Б.¹, Давыденко Л.В.², Зарубина Ал.С.³, Зарубина Ан.С.³

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;*

²*Московский политехнический университет, Москва;*

³*Ступинский филиал Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), Ступино, Московская область*

Ключевые слова: титановые сплавы, слитки, химический состав, качество, статистический анализ.

Аннотация. На основе статистического анализа дана оценка качества слитков титановых сплавов, выплавленных двойного, тройного вакуумного дугового и гарнисажного переплавов. Установлено, что диапазоны легирования основными компонентами не выходят за установленные пределы. Однако средние фактические содержания алюминия и ванадия могут быть выше средних регламентируемых значений практически для всех слитков, что может привести к браку по верхнему пределу. Даны рекомендации по снижению брака в слитках титановых сплавов разного назначения.

STATISTICAL STUDY OF THE QUALITY OF TITANIUM ALLOY INGOTS FOR VARIOUS INDUSTRIAL SECTORS

Egorova Yu.B.¹, Davydenko L.V.², Zarubina Al.S.³, Zarubina An.S.³

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow;*

²*Moscow Polytechnic University, Moscow;*

³*Stupino branch of Moscow Aviation Institute (National Research University), Stupino, Moscow region*

Keywords: titanium alloys, ingots, chemical composition, quality, statistical analysis.

Abstract. Based on statistical analysis, the quality of titanium alloy ingots smelted by double, triple vacuum arc and skull remelting is assessed. It is established that the alloying ranges of the main components do not exceed the established limits. However, the average actual contents of aluminum and vanadium can be higher than the average regulated values for almost all ingots, which can lead to rejects at the upper limit. Recommendations are given for reducing rejects in titanium alloy ingots for various purposes.

В последнее время значительно повысилось качество полуфабрикатов из титановых сплавов, которое было достигнуто благодаря улучшению состава, структуры и свойств слитков. Вакуумно-дуговой переплав с расходуемым электродом является основным способом получения литых полуфабрикатов из титановых сплавов [1]. Для свариваемых сплавов и сплавов криогенного назначения количество примесей должно быть минимально возможным, так как, например, при содержаниях кислорода более 0,1% наблюдается существенное снижение трещиностойкости сплавов. Для термически упрочняемых $\alpha+\beta$ - и псевдо β -сплавов повышенное содержание кислорода и азота может привести к

резкому падению пластичности, снижению способности подвергаться обработке давлением, ухудшению конечного комплекса служебных свойств. В жаропрочных сплавах повышенное содержание кислорода и азота приводит к термической нестабильности свойств при высоких температурах. Для ряда сплавов общего назначения кислород, углерод и азот играют наряду с отрицательной, также и положительную роль, обеспечивая повышение предела прочности [2]. В связи с этим в ВИАМ разработана концепция создания экономнолегированных сплавов, легированных кислородом и азотом [3].

Для титановых сплавов разного назначения важно не только ограничивать содержание примесей, но и поддерживать его постоянным с целью стабилизации свойств полуфабрикатов. В работе [2] было установлено, что с 1970-х по 2000-е годы среднее содержание кислорода в слитках снизилось с 0,12 до 0,06%, азота – с 0,03 до 0,01% из-за повышения чистоты титановой губки и внедрения более эффективного вакуумного оборудования. Однако это сопровождается снижением прочностных характеристик различных полуфабрикатов. В последние годы, для того чтобы компенсировать потерю прочности, слитки легируют основными компонентами по верхнему пределу поля допуска (например, алюминием) и/или дополнительно вводят в шихту рутил титана. Вместе с тем необходимо тщательно контролировать содержание алюминия и примесей внедрения, так как их повышенное содержание может привести к образованию алюминида титана, значительно снижающего термическую стабильность сплавов в процессе эксплуатации [4].

Цель работы состояла в оценке качества слитков титановых сплавов, предназначенных для различных областей применения. Для этого использовали результаты химического анализа более 3000 промышленных слитков (BT1-00, BT1-0, BT6, Grade 5, BT8, BT3-1, BT20, BT18У, BT25У, BT9, Ti-10-2-3, BT22), изготовленных на различных предприятиях страны с 2000 года по настоящее время. Для статистического анализа использовали ППП «Stadia» и «Statistica». Слитки были выплавлены двойным, тройным вакуумным дуговым и гарнисажным переплавами. Для повышения прочности в шихту некоторых сплавов был введен рутил титана. Показатели качества оценивали на основе государственных и отраслевых стандартов, а также с помощью рекомендаций руководства сертификационного центра «Материал» Р СЦМ-04 «Оценка качества авиационных материалов/полуфабрикатов при сертификации их производства». По данным статистического анализа было установлено, что для большинства слитков гистограммы и статистические диапазоны легирования для алюминия, ванадия и кислорода сдвинуты к верхнему пределу поля допуска, а среднее фактическое содержание алюминия и ванадия превышает среднее регламентируемое значение на $\sim 0,3 \div 0,5\%$ (по массе) практически для всех исследованных слитков. В результате этого статистический диапазон легирования может выходить за верхний предел поля допуска. В частности, для слитков сплава BT6 общего назначения несоответствие содержания алюминия по верхнему пределу может появиться с вероятностным процентом несоответствий 2,0% (т.е. около 20 слитков из 1000 могут иметь брак по верхнему пределу), а по кислороду – 0,5%. Для того же сплава, предназначенного для изготовления

дисков авиационного назначения, процент несоответствий по алюминию ниже и составляет менее 1%. Для исключения выпадов по «Зс»-интервалу и снижения брака на основе вероятностного подхода обосновано расчетное содержание легирующих элементов и кислорода в слитках различного назначения путем корректировки состава шихты.

Список литературы

1. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов – М.: Металлургия, 1994. – 368 с.
2. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Чибисова Е.В. Влияние микролегирования кислородом на механические свойства прутков и поковок из титана и титановых сплавов // Электрометаллургия. – 2017. – №5. – С. 7-14.
3. Ночовная Н.А., Исаичев А.В., Анташев В.Г. Проблемы создания экономичных титановых сплавов и пути их решения // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. – № 5. – С. 10-15.
4. Егорова Ю.Б., Скворцова С.В., Давыденко Л.В., Гвоздева О.Н., Чибисова Е.В. Исследование стабильности механических свойств прутков из сплава ВТ6 в зависимости от химического состава и режимов отжига // Титан. – 2020. – №1. – С. 11-18.

Сведения об авторах:

Егорова Юлия Борисовна – д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе;

Давыденко Людмила Васильевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Материаловедение»;

Зарубина Алина Сергеевна – студент;

Зарубина Анна Сергеевна – студент.

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПЛОСКООВАЛЬНЫХ ТРУБ

Синюков М.С.

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

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; устройство с постоянными магнитами; оксидная пленка; шероховатость поверхности; окончательная обработка; пайка алюминия.

Аннотация. Рассмотрен вопрос технологического обеспечения шероховатости поверхностей изделий из алюминия перед пайкой или сваркой. Перечислены особенности магнитно-абразивной обработки, выделены основные факторы, влияющие на окончательное качество обработанной поверхности и предотвращение образования оксидной пленки. Предложено устройство для магнитно-абразивной обработки, включающее в себя постоянные магниты.

MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT OF FLAT-OVAL PIPES

Sinyukov M.S.

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

Keywords: magnetic abrasive treatment; permanent magnet device; oxide film; surface roughness; final processing; aluminum soldering.

Abstract. The issue of technological provision of surface roughness of aluminum products before soldering or welding is considered. The features of magnetic abrasive treatment are listed, the main factors affecting the final quality of the treated surface and the prevention of the formation of an oxide film are highlighted. A device for magnetic abrasive treatment, including permanent magnets, is proposed.

Применение метода магнитно-абразивной обработки с целью предварительной обработки плоскоовальных поверхностей трубы и оребрения является перспективным для машиностроительной отрасли. Данный метод интересен тем, что в процессе обработки температура не достигает значений активного образования оксидной пленки, поэтому является целесообразным с точки зрения обеспечения надежности сварного соединения и всего изделия плоскоовальная труба с оребрением.

На окончательной стадии изготовления плоскоовальной трубы и оребрения возможно проводить магнитно-абразивную обработку алюминиевых поверхностей оребрения и наружной поверхности плоскоовальной трубы (если труба будет выполняться из цветного металла) с целью снижения шероховатости, удаления оксидной пленки перед свариванием оребрения и плоскоовальной трубы, удаления дефектного слоя, образованного на предшествовавшей операции.

Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что ферроабразивный порошок-инструмент прижимается к поверхности, которую следует обработать и полирует ее [1, 2]. Прижим порошка к обрабатываемой поверхности обеспечивается воздействием магнитного поля [3].

Данный способ финишной обработки позволяет производить обработку различных поверхностей: цилиндрические наружные и внутренние; плоские

поверхности; тела вращения с криволинейной образующей; винтовые; с эвольвентным, трапецеидальным и другим профилем [2, 3].

Магнитно-абразивная чистовая обработка характеризуется высокой сложностью процесса, кинематическим взаимодействием сил при движении порошка, механическими и магнитными воздействиями и многочисленными факторами, влияющими на окончательное качество обрабатываемой поверхности [1].

К указанным факторам относятся кинематика процесса (обработка плоской или произвольной поверхности, волнообразной или трубчатой формы и т.д.), параметры процесса (скорость резания, подача, рабочий зазор, количество магнитно-абразивного порошка и плотность магнитного потока), свойства заготовки (механические и магнитные свойства, качество исходной поверхности), магнитно-абразивная щетка (количество порошка, величина рабочего зазора, применение постоянных или электромагнитов), магнитный абразивный порошок (тип, способ изготовления, размер зерна, процентное соотношение ферромагнетика и абразива) и охлаждающая жидкость (тип, химические реакции с материалом заготовки и магнитно-абразивным порошком) [4].

Принципы финишной обработки, используемые в процессе магнитно-абразивной обработки при шлифовании плоскооальной трубы из алюминия с использованием магнитно-абразивных инструментов, показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Схема работы устройства

При вращении заготовки магнитные и абразивные зерна перемещаются в обратном направлении, воздействуя на поверхность заготовки с помощью магнитной силы.

Предлагается располагать устройство (рис. 2) на величину рабочего зазора около 2,5-5 мм. При прохождении устройства вдоль обрабатываемой плоскости плоскооальной трубы, происходит шлифование поверхности, к которой в дальнейшем будут припаяны пластины оребрения или гребенка.

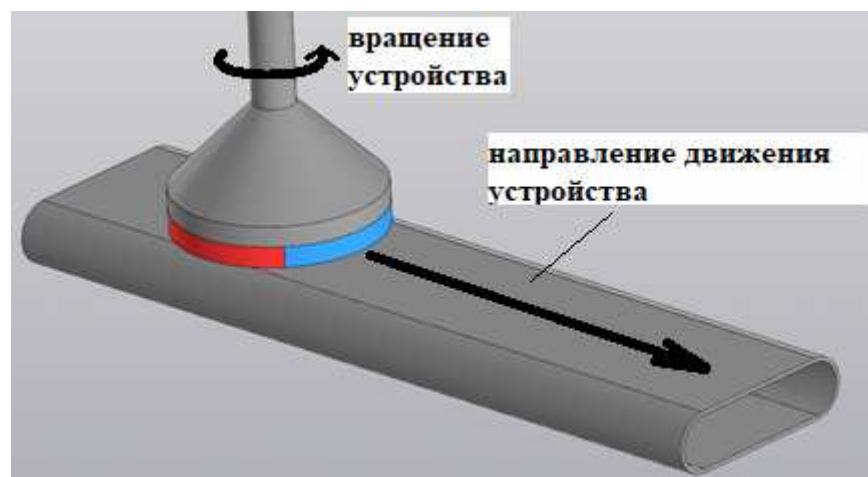


Рис. 2. Схема работы устройства

Магнитно-абразивную обработку предлагается проводить как для пластин оребрения, так и для плоской поверхности плоскоооальной трубы. За счет применения МАО удастся уменьшить слой окислов, повысить качество обработанной поверхности и повысить надежность, прочность неразъемного соединения.

Научный руководитель: д.т.н., проф. Максarov Вячеслав Викторович.

Список литературы

1. Chawla G., Kumar V., Kumar A. Investigation and Optimization of Parameters in Micro-Finishing of Hybrid Al/SiC/B4C MMCs by Novel MAFM Process through RSM // Silicon. 2021, vol. 14, pp. 1191-1208. doi.org/10.1007/s12633-020-00838-y.
2. Chawla Gagandeep, Kumar Vinod, Sharma Rishi. Neural Simulation of Surface Generated During Magnetic Abrasive Flow Machining of Hybrid Al/SiC/B4C-MMCs // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. 2021, vol. 7, p. 153. doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4.
3. Jiang L., Zhang G., Du J., Zhu P., Cui T., Cui Y. Processing performance of Al₂O₃/Fe-based composite spherical magnetic abrasive particles // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021, vol. 528, p. 167811. doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167811.
4. Пантелеенко Ф.И., Максarov В.В., Петришин Г.В., Максимов Д.Д. Повышение производительности магнитно-абразивной обработки использованием диффузионно-легированных порошков // СТИН. – 2023. – № 3. – С. 12-16.

Сведения об авторах:

Синюков Михаил Сергеевич – аспирант.

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАКАЛКИ В ШТАМПЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРШНЕВЫХ ПАЛЬЦЕВ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Муравьев Д.В.

Омский государственный университет путей сообщения, Омск

Ключевые слова: производство, поршневой палец, закалка, штамп, индуктор, технология, точность, обработка.

Аннотация. В статье проведен анализ существующих дефектов поршневого пальца тепловозных дизелей технологического характера, возникающих в результате нарушения режимов термической обработки в процессе их изготовления. Описаны последствия коробления и растрескивания пальцев после термообработки и способы устранения негативных последствий возникновения термических напряжений при закалке. Предложена технология закалки поршневых пальцев в штампе, которая позволит предотвратить или снизить степень искажения формы и изменения размеров пальца после резкого охлаждения с температуры закалки, повысив качество изготовления детали.

DIE HARDENING TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF PISTON PINS OF DIESEL LOCOMOTIVES

Muravyov D.V.

Omsk State University of Railway Engineering, Omsk

Keywords: production, piston pin, quenching, stamp, inductor, technology, precision, processing.

Abstract. The article analyzes the existing defects in the piston pin of diesel locomotives of a technological nature that arise as a result of violations of heat treatment regimes during their manufacture. The consequences of warping and cracking of fingers after heat treatment and ways to eliminate the negative consequences of thermal stresses during quenching are described. The technology of quenching piston pins in a die is proposed, which will prevent or reduce the degree of distortion of the shape and size of the finger after a sharp cooling from the quenching temperature, improving the quality of the part.

Детали и компоненты подвижного состава, изготовленные из металлических сплавов, зачастую подвергаются существенному упругому и пластическому деформированию под давлением, в том числе при воздействии критических температур. Чтобы выдержать эти условия, материалы, применяемые для изготовления деталей, должны быть прочными, надежными и долговечными.

Повышение прочности, твердости и износостойкости деталей достигается путем проведения упрочняющей термической обработки, после которой свойства сплава улучшаются без изменения химического состава. Воспроизводимость и однородность состава сплава имеет первостепенное значение в процессе термообработки. Помимо температуры нагрева и времени выдержки при заданной температуре эффективность термической обработки определяется скоростью охлаждения, которая определяет основные свойства деталей [1].

Поршневой палец тепловозного дизеля (рис. 1) предназначен для передачи шатуну усилия от давления газов, действующих на поршень. Поршневые пальцы бывают подвижными в поршневой головке шатуна и бобышках поршня или

закрепленными в одном из сочленений. Переменные по величине и направлению силы вызывают в поршневом пальце изменчивый в продольном сечении изгиб, поперечную овальность и седлообразный износ. Кроме того, в процессе эксплуатации поршневые пальцы подвергаются усталостному разрушению.

Достижение требуемой износостойкости и прочности поршневого пальца обеспечивается применением среднеуглеродистых конструкционных

сталей марок 40, 45, 40Х, 40ХН, подвергаемых поверхностной закалке токами высокой частоты с индукционного нагрева. Основное затруднение при изготовлении пальца заключается в сочетании сырых и закаленных поверхностей [2].

Размерная точность и качество поверхности пальца в технологическом процессе изготовления достигается путем шлифования после термообработки.

Твердость наружной поверхности поршневого пальца тепловозного дизеля после закалки ТВЧ должна составлять не менее 54 HRC.

Допуск формы наружной цилиндрической поверхности должен составлять 0,005-0,015 мм, а шероховатость – $R_a = 0,10$ мкм после шлифования.

Из общего перечня технологических дефектов, возникающих при закалке и упрочнении деталей машин, выделяют наиболее распространенные, такие как растрескивание, коробление, обезуглероживание и мягкие участки.

Коробление сопровождается большими объемными изменениями и происходит в результате неравномерного нагрева и последующего охлаждения поршневых пальцев с относительно малым поперечным сечением стенки и продольной длиной. Нагретая сторона пальца растягивается и становится выпуклой, в то время как противоположная сторона становится вогнутой, поэтому в процессе закалки палец должен нагреваться и охлаждаться равномерно. Таким образом, деформация и коробление пальцев вызваны внутренними напряжениями в металле, возникающими при нагреве и охлаждении из-за неравномерных структурных изменений и связанных с ними изменений объема.

Технология производства поршневых пальцев тепловозных дизелей предусматривает шлифование наружной цилиндрической поверхности после закалки для устранения коробления, приводящего к искажению формы и изменению размеров детали, удаления окалина и обезуглероженного слоя и для придания требуемой точности и шероховатости. Однако нарушение температурного режима и скорости нагрева пальцев, времени выдержки при температуре закалки, некорректный выбор охлаждающей среды, а также несоблюдение скорости охлаждения способствует существенному короблению, появлению закалочных трещин и снижению усталостной прочности пальцев.

Поэтому для снижения степени коробления пальцев при закалке и, как следствие, для сокращения припуска на шлифование после термообработки



Рис. 1. Поршневой палец дизеля Д50 (ПДГ1М)

предлагается рассмотреть технологию поверхностной закалки поршневых пальцев с охлаждением в закалочном штампе после индукционного нагрева.

Предлагаемая технология позволит в процессе изготовления детали:

1) предотвратить или снизить степень искажения формы и изменения размеров поршневого пальца после резкого охлаждения с температуры закалки в результате возникновения в металле термических структурных и фазовых напряжений, повысив качество изготовления детали;

2) уменьшить припуск на шлифование после термической обработки, сократив тем самым расход материала детали в стружку и продлив ресурс абразивного инструмента, что повысит производительность обработки.

Поверхностная закалка ТВЧ широко применяется в промышленности, в том числе в транспортном машиностроении, благодаря простоте, высокой производительности и возможности автоматизации.

Индукционный нагрев осуществляется вихревыми токами (токи Фуко), генерируемыми на поверхности нагреваемой детали, помещенной в переменное магнитное поле индуктора, создаваемое при пропускании переменного тока по виткам индуктора. При этом нагревается только внешний слой, а внутренний слой, не накапливая термических напряжений, остается более пластичным, предотвращая охрупчивание стали и обеспечивая повышение ударной вязкости и усталостной прочности. Глубина закаленного слоя регулируется частотой тока. Высокая скорость нагрева перемещает фазовый переход в более высокий температурный диапазон, что способствует повышению твердости до 58-62 HRC, чего нельзя достичь объемной закалкой. Зазор между индуктором и деталью поддерживается постоянным за счет вращения детали на оправке, а контакт исключается, что обеспечивает равномерный нагрев, одинаковую структуру и твердость закаленной стали [3].

Охлаждение с критической скоростью при поверхностной закалке поршневых пальцев осуществляется в ванне с охлаждающей жидкостью или путем ее распыления, после чего на поверхности металла остаются высокие сжимающие напряжения, улучшающие эксплуатационные характеристики детали, а твердость стали повышается. Однако внутренние закалочные напряжения, возникающие в переходной зоне, между поверхностным слоем и сердцевиной пальца, и способные привести к появлению поверхностных микротрещин, снимаются после закалки путем проведения низкого отпуска при нагреве в печи до температуры 150-200°C.

Таким образом, разработанная технология упрочняющей термической обработки поршневого пальца тепловозного дизеля включает операции поверхностной закалки ТВЧ при температуре 820-840°C с охлаждением в воде или масле и последующего низкого отпуска при температуре 180-200°C с охлаждением на воздухе. График термообработки для стали 40ХН, позволяющей получить твердость мартенсита отпуска 52-56 HRC, представлен на рисунке 2 [4].

Отличительной особенностью технологии является то обстоятельство, что при охлаждении с критической скоростью поршневой палец зажимается в ручьях двух частей штампа, что предотвращает искажение формы детали в результате коробления при возникновении термических напряжений в металле.

Формовочный штамп предназначен для предотвращения изменения формы и размеров при закалке тонкостенных деталей, не вызывая их разрушения.

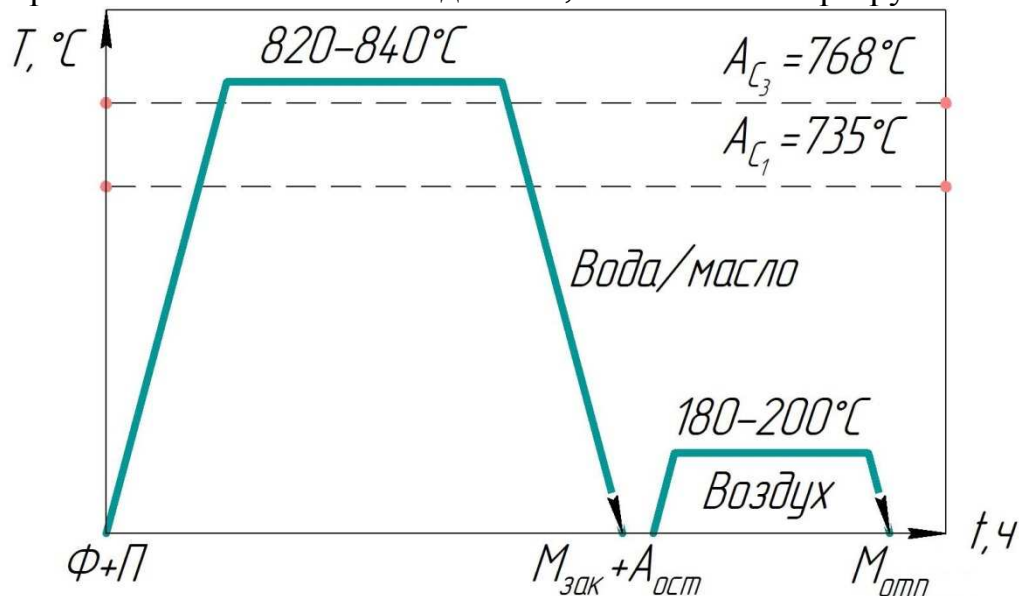


Рис. 2. График упрочняющей термической обработки поршневого пальца

Рабочий чертеж предлагаемой установки для закалки поршневых пальцев дизеля тепловоза в штампе приведен на рис. 3. Корпус 4 штампа, состоящий из двух частей, устанавливается на колонне 3. На платформе нижней части корпуса 4 при помощи болтов 20 закрепляется корпус оправки 5, к которому болтами 19 крепится сменная оправка 9, предназначенная для базирования при закалке поршневых пальцев разных типоразмеров. В верхней и нижней части корпуса 4 установлены матрицы 6, соединенные болтами 17 и 18 с тягами 14, которые связаны пальцами 10 с рычагами 11. На салазках 12 подвижного суппорта 13, способного передвигаться поступательно по направляющим 8 за счет работы кинематической пары «ходовой винт 15 – гайка 1» при вращении маховика 7, размещен индуктор 2. Ходовой винт 15 устанавливается в шариковых радиально-упорных подшипниках 21, обладающих возможностью воспринимать как осевые, так и радиальные нагрузки.

Поршневой палец 22 в ходе термообработки устанавливается на оправку 9 по посадке с минимальным требуемым зазором, после чего к нему подводится индуктор 2 и осуществляется нагрев до температуры закалки, достижение которой сигнализирует о возвращении индуктора в начальную точку.

Внутренний профиль матриц 6 двух половин штампа, установленных и закрепленных в верхней и нижней плите корпуса 4, полностью воспроизводит форму готовой детали 22. Вращение по часовой стрелке верхнего рычага 11 и против часовой стрелки нижнего рычага 11 преобразуется в поступательное движение тяг 14, за счет чего происходит смыкание матриц 6 и охватывание наружной цилиндрической поверхности детали 22 и ее формовка. Отверстия в матрицах для распыления воды (см. рис. 3, Вид А) одинакового диаметра и расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга, чтобы металл поверхности имел одинаковую структуру, предназначены для подачи воды и обеспечения критической скорости охлаждения. По окончании закалки рычаги возвращаются в исходное положение, а поршневой палец снимают.

тогда предельное значение нагрузки при закалке в штампе при условии обеспечения и поддержания плотного контакта поверхностей штампа с поверхностью детали составит $P = 6115,46$ кН.

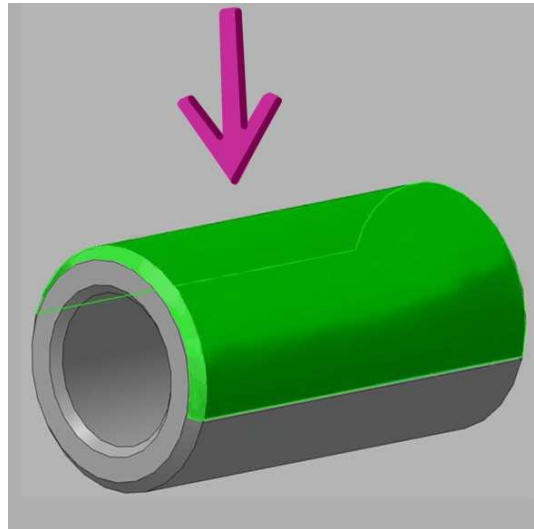


Рис. 4. Площадь охватываемой поверхности поршневого пальца при закалке в одной части штампа

Расчет мощности индуктора для закалки токами высокой частоты начинается с определения объема прогреваемого материала V :

$$V = \pi(r_2 - r_x)^2 L, \quad (5)$$

где L – длина поршневого пальца, мм ($L = 152,1$ мм); r_x – радиус поршневого пальца по глубине закаливаемого слоя, мм, ($r_x = 38,65$ мм при глубине закаленного слоя 2 мм), тогда $V = 955,188$ мм³.

Расчет объемной плотности теплового потока q_v при индукционном нагреве:

$$q_v = \frac{4\lambda(t_{C_2} - t_{C_1})}{r_2^2 \left(2\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 - 1 \right)}, \quad (6)$$

где t_{C_2} – температура нагрева, °C ($t_{C_2} = 830$ °C); t_{C_1} – температура окружающей среды, °C ($t_{C_1} = 25$ °C); r_1 – внутренний радиус, мм ($r_1 = 25,45$ мм на рис. 5); r_2 – наружный радиус, мм ($r_2 = 40,65$ мм на рис. 5); λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/м·К ($\lambda = 0,045$ Вт/м·К), тогда $q_v = 0,237$ Вт/м³ [6].



Рис. 5. Схема поршневого пальца для расчета параметров индуктора

Мощность индуктора N , требуемая для прогрева закаливаемого объема металла поршневого пальца до температуры закалки, рассчитывается по формуле:

$$N = q_v V. \quad (7)$$

$$N = 226,449 \text{ Вт} = 0,226 \text{ кВт}.$$

Таким образом, в результате научных и конструкторских изысканий и расчетов были получены следующие выводы.

1. Предложенная технология позволит контролировать последствия термических напряжений, возникающие при резком охлаждении с температуры закалки, выражающиеся в короблении и влияющие на размерную точность поршневого пальца при изготовлении и его усталостную прочность в процессе эксплуатации за счет сжатия детали в полостях штампа при обеспечении гарантированного и плотного контакта поверхностей детали и штампа.

2. Проектирования штамповочного прессы для фиксации размеров поршневых пальцев при охлаждении в процессе закалки позволит повысить точность и износостойкость деталей и сократить время на их изготовление.

3. Планируется оснастить оправку приводом вращения для равномерного прогрева закаливаемого поверхностного слоя поршневого пальца.

4. Выполненный расчет себестоимости изготовления поршневого пальца тепловозного дизеля по предлагаемой технологии с учетом капиталовложений на внедрение нового оборудования в размере 750 тыс. рублей показал, что при затратах на изготовление одного пальца в 6080,74 рублей коэффициент экономической эффективности составил 23,68%, а срок окупаемости оборудования капиталовложений 4,2 года.

Список литературы

1. Козловский, А. Э., Колобов М. Ю. Термическая обработка углеродистых сталей: учебное пособие. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2017. – 144 с.
2. Галимов Э.Р., Тарасенко Л.В., Унчикова М.В., Абдуллин А.Л. Материаловедение для транспортного машиностроения: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 448 с.
3. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Справочник: Металловедение и термическая обработка стали – Т. 3. Термическая обработка металлопродукции. – М.: Машиностроение, 1983. – 216 с.
4. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
5. Титов Ю.А., Титов А.Ю. Проектирование штампов для горячей объемной штамповки: учебное пособие – Ульяновск: Ульяновский гос. техн. ун-т, 2012. – 116 с.
6. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2011. – 97 с.

Сведения об авторе:

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

ОСОБЕННОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

Бабин С.В., Прокофьев Е.Ю.

*Ступинский филиал Московского авиационного института (национальный
исследовательский университет), Ступино*

Ключевые слова: встречное фрезерование, криволинейные и сопряжённые поверхности, точность и шероховатость обработки, цилиндрические и концевые фрезы, глубина резания, диаметр и жёсткость фрезы.

Аннотация. Приведены результаты исследований встречного фрезерования криволинейных поверхностей типа контуров цилиндрическими и концевыми фрезами. Для повышения точности и уменьшения шероховатости обрабатываемых поверхностей глубину резания следует выбирать с учётом диаметра фрезы и её жёсткости. Глубину резания необходимо подбирать как функцию диаметра фрезы, чтобы силы резания не отталкивали фрезу от заготовки и не прижимали к ней.

PECULIARITIES OF MILLING CURVED SURFACES END MILLS

Babin S.V., Prokofiev E.Yu.

*Stupino Branch of the Moscow Aviation Institute (National Research University),
Stupino*

Keywords: counter milling, curvilinear and mating surfaces, accuracy and roughness of machining, cylindrical and end milling cutters, depth of cut, diameter and rigidity of the cutter.

Abstract. The results of studies of counter milling of curvilinear surfaces such as contours with cylindrical and end milling cutters are presented. To improve accuracy and reduce roughness of machined surfaces, the depth of cut should be selected taking into account the cutter diameter and its stiffness. The depth of cut should be selected as a function of the cutter diameter so that the cutting forces do not push the cutter away from the workpiece or press it against it.

Стремление конструкторов снизить массу, сохраняя прочность и жесткость деталей авиационных конструкций из стали и титановых сплавов, приводит, в числе прочих, к необходимости усложнять их формы, делать различные закрытые и полуоткрытые карманы, колодцы, наружные и внутренние контуры, чтобы убрать лишний металл (рис. 1).

Эти технологические операции выполняются концевыми фрезами, обладающими зачастую малой жесткостью. При обработке наружных и внутренних контуров съём металла осуществляется, как правило, методом встречного фрезерования боковой поверхностью фрезы или одновременно боковой и торцевой поверхностями. Ось фрезы устанавливается параллельно поверхности обрабатываемого контура.

Процесс встречного фрезерования, по сравнению с попутным, протекает при меньших вибрациях из-за более плавного врезания зубьев фрезы в заготовку. В связи с этим не требуется повышенная жесткость станка в направлении подачи и устранение осевого зазора между ходовым винтом и гайкой механизма подачи стола.

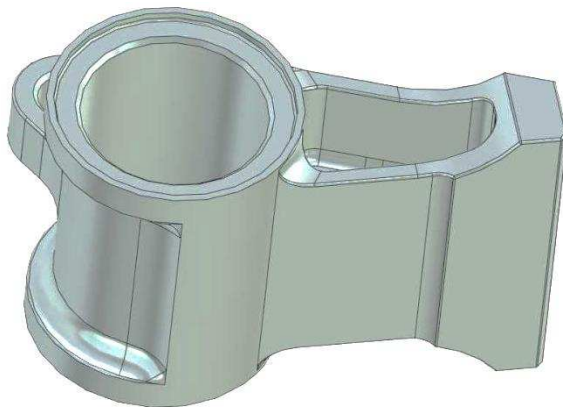


Рис. 1. Пример детали с набором поверхностей

Одной из особенностей встречного фрезерования криволинейных поверхностей является то, что при обработке на горизонтальном фрезерном станке вертикальная составляющая силы резания, действующая со стороны фрезы на заготовку, изменяется не только по величине, но и по направлению в зависимости от соотношения глубины резания и диаметра фрезы. Она может быть направлена как вверх, так и вниз, что неблагоприятно отражается на точности обработки.

Данная зависимость теоретически путём расчёта показана в работе [1-3] и экспериментально подтверждена и опубликована в работе [4] при встречном фрезеровании плоских поверхностей. Фреза и заготовка могут взаимно отталкиваться или прижиматься друг к другу. При этом большим упругим деформациям подвергается концевая фреза малой жесткости, что приводит к уменьшению точности обработки.

Установлено условие, при котором вертикальная составляющая силы отсутствует. Для этого глубина резания t и диаметр фрезы D должны находиться в соотношении

$$t < D \frac{k^2}{1 + k^2},$$

где $k = \frac{P_y}{P_z}$; P_y – радиальная сила резания; P_z – окружная (тангенциальная) сила резания.

Соотношение глубины резания и диаметра фрезы определяет угол контакта ф фрезы с заготовкой, от которого зависит направление и величина вертикальной составляющей силы. При $k = 0,4-0,6$ глубина резания должна находиться в пределах $(0,14-0,26) D$, угол контакта фрезы с заготовкой $43-62^\circ$. При меньшей глубине резания и, соответственно, меньших углах контакта, вертикальная составляющая направлена вниз, при больших – вверх.

Установленная зависимость применима и при встречном фрезеровании плоских поверхностей на вертикальном фрезерном станке. Обозначенные на схеме силы резания расположены в горизонтальной плоскости, поэтому вертикальная составляющая силы заменена и обозначена как горизонтальная боковая сила $P_{бок}$.

В продолжение ранее проделанной работы были проведены исследования встречного фрезерования концевой фрезой на вертикальном фрезерном станке. Рассмотрим фрезерование на универсальном вертикальном фрезерном станке внутреннего контура, угол сопряжения поверхностей которого составляет 90° . Радиус R концевой фрезы должен быть равен радиусу r сопряжения поверхностей контура. При этом угол контакта фрезы с заготовкой составляет более 90° . Результирующая силы резания прижимает фрезу к заготовке и при этом наблюдается искажение контура, так называемые “зарезы” (рис. 2).

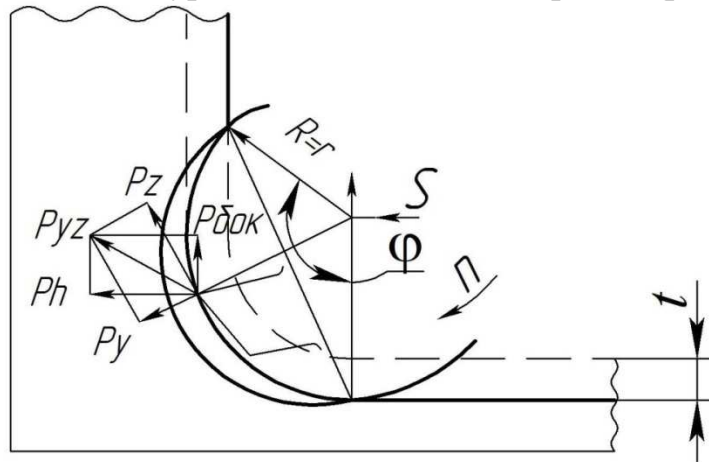


Рис. 2. Схема взаимодействия фрезы с заготовкой

Практика показывает, что даже при малых глубине и подаче контурного фрезерования, неточности из-за упругой деформации технологической системы, в которой наиболее податливым звеном является концевая фреза, могут быть значительными. Снижение производительности для получения заданной точности не даёт в данном случае положительного результата, так как при снижении глубины резания до минимума угол контакта фрезы с заготовкой не может быть меньше 90° .

Сложность выполнения подобных операций заключается в том, что в ряде случаев приходится фрезеровать контуры достаточно большой глубины (свыше 50 мм), радиусы сопряжений поверхностей которых могут быть малой величины (до 10 мм). Эти особенности вызывают необходимость применения концевых фрез малого диаметра и большой длины, обладающих недостаточной жёсткостью и подвергающихся упругой деформации под действием сил резания.

Чтобы избежать погрешностей обработки, рационально применение концевых фрез, имеющих радиус меньший, чем радиус сопряжения поверхностей контура ($R < r$). При этом траектория фрезы должна быть эквидистантна обрабатываемой поверхности контура, что возможно при использовании фрезерных станков с ЧПУ. Угол контакта фрезы с заготовкой существенно снижается, удаётся добиться отсутствия вышеуказанных дефектов, но только тогда, когда боковая составляющая силы сведена к минимуму (рис. 3).

На рисунках показана схема сил, действующих со стороны фрезы на заготовку. Согласно третьему закону механики, равные им силы, действующие со стороны заготовки на фрезу, направлены противоположно (на рисунках не показаны).

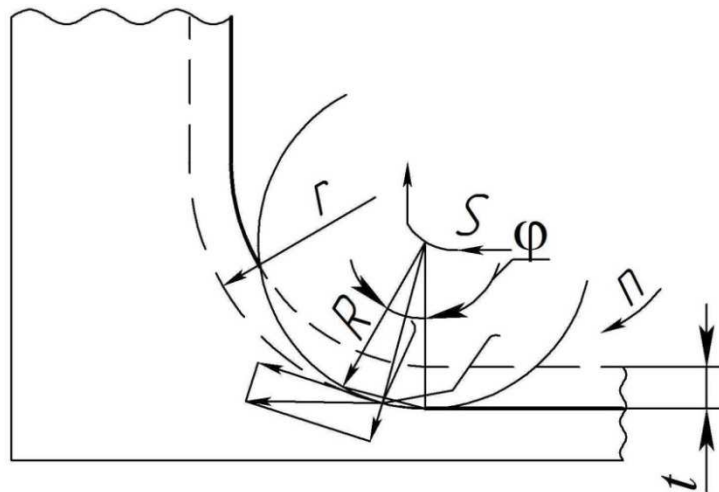


Рис. 3. Схема взаимодействия фрезы радиуса меньшего, чем радиус сопряжения

В заключение необходимо отметить, что для повышения точности обработки плоских или сопряженных поверхностей при встречном фрезеровании концевыми фрезами важно подобрать глубину резания как функцию диаметра фрезы, чтобы силы резания не отталкивали фрезу от заготовки и не прижимали к ней.

Список литературы

1. Игнатов М.Г., Бабин С.В., Перминов А.Е. К вопросу об изменении вектора вертикальной составляющей силы резания при встречном фрезеровании // Вестник машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 75-76.
2. Перминов А.Е., Бабин С.В., Прокофьев Е.Ю. Особенности фрезерования деталей концевыми фрезами // Вестник машиностроения. – 2017. – № 12. – С. 57-58.
3. Тимирязев В.А., Хостикоев М.З., Данилов И.К., Дацко А.Г. Управление точностью контурной обработки концевыми фрезами // СТИН, 2020. – №12. – С. 22-26.
4. Игнатов М.Г., Перминов А.Е., кандидаты технических наук, Прокофьев Е.Ю. Влияние вектора вертикальной силы резания на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности при встречном фрезеровании // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С. 49-50.

Сведения об авторах:

Бабин Сергей Васильевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой;

Прокофьев Евгений Юрьевич – старший преподаватель.

УДК 621.992; 621.993

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБЫ

Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Хуснетдинов Т.Р., Карлявин А.М.
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва*

Ключевые слова: резьба, электромеханическая обработка, упрочнение, твердость, структура, технология, закалка.

Аннотация. Приведены результаты исследований по применению технологии электромеханической обработки для упрочнения резьбы деталей машин и технологического оборудования. Определена номенклатура изделий с наружной и внутренней резьбой, разработаны новые способы повышения качества деталей с резьбой, выполнены металлографические исследования структуры и микротвердости витков резьбы после электромеханической обработки. На основе проведенных исследований подготовлены практические рекомендации по повышению износостойкости, прочности и усталостной выносливости резьбовых соединений.

PROMISING METHODS OF ELECTROMECHANICAL THREAD PROCESSING

Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Y.S., Khusnetdinov T.R., Karlyavin A.M.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: thread, electromechanical processing, hardening, hardness, structure, technology, hardening.

Abstract. The paper presents the results of research on the use of electromechanical processing technology for strengthening the threads of machine parts and technological equipment. The range of products with external and internal threads has been determined, new ways to improve the quality of threaded parts have been developed, metallographic studies of the structure and microhardness of thread turns after electromechanical processing technology have been performed. Based on the conducted research, practical recommendations have been prepared to improve the wear resistance, strength and fatigue resistance of threaded connections.

В машиностроении известна проблема повышения износостойкости, прочности и усталостной долговечности резьбовых соединений [1]. Резьба относится к группе поверхностей с конструктивными концентраторами напряжений. Существует и используется множество методов изготовления и поверхностного упрочнения резьбы. Каждый из применяемых методов поверхностного упрочнения обладает своими преимуществами и недостатками, выбор которых зависит от условий эксплуатации, схемы нагружения и используемых физических механизмов упрочнения. В большинстве случаев упрочнение материала обеспечивается за счёт изменения его химического состава, повышения плотности дислокаций, проведения структурных и фазовых превращений материала и других способов.

Основными способами формирования резьбы на заготовках являются методы резбонарезания и накатывания. В процессе механической, термической

или химико-термической обработки (ХТО) во впадине, на боковых поверхностях витков и в месте перехода резьбы к гладкой цилиндрической поверхности формируются технологические концентраторы напряжений. Наличие на поверхностях резьбы рисков, царапин, микротрещин снижает усталостную выносливость деталей с резьбой и может стать причиной разрушения деталей в процессе эксплуатации изделий.

Среди применяемых методов изготовления востребованы методы упрочнения резьбы поверхностным пластическим деформированием (ППД), основанные на деформационном упрочнении материала, сопровождающимся повышением плотности дислокаций. Методы ППД для создания упрочнённого поверхностного слоя витков резьбы менее энергозатратны, по сравнению с термическими и химико-термическими способами упрочняющей поверхностной обработки. Методы ППД эффективны для упрочнения впадины, прилегающих боковых витков резьбы и применяются для повышения усталостной выносливости деталей с резьбой. Однако методы ППД не приводят к существенному повышению прочности и износостойкости витков резьбы, что для широкой номенклатуры деталей с резьбой является актуальным.

Термические и ХТО методы упрочнения резьбы имеют следующие недостатки: окисление и обезуглероживание поверхностного слоя, коробление и поводка деталей, неравномерное распределение твёрдости в поверхностном слое, сложности процессов, нестабильность результатов, высокая трудоемкость процессов, невозможность упрочнения резьбы крупногабаритных и маложестких трубных деталей.

Данные обстоятельства делает актуальным поиск и разработку новых способов поверхностного упрочнения, позволяющих нивелировать недостатки существующих методов и расширить технологические возможности поверхностного упрочнения.

Резьба деталей подвержена абразивному износу, действию изгибающего и крутящего моментов, знакопеременным нагрузкам, пластическому деформированию витков, и для нее установлены следующие требования по качеству:

- резьба должна иметь благоприятную форму основания и расположение волокон металла, вытянутых вдоль опасного сечения впадины;
- оптимальную высоту и форму микрогеометрии боковых поверхностей и основания;
- витки резьбы должны иметь высокую твердость при сохранении вязкой середины;
- напряжения во впадине должны быть сжимающие.

Перспективными способами поверхностного упрочнения, позволяющими формировать упрочнённый слой на обработанной поверхности резьбы, являются методы электромеханической обработки (ЭМО).

Основными направлениями применения оборудования [2] и технологии ЭМО резьбы [3] являются: электромеханическая поверхностная закалка (ЭМПЗ), отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка (ОУЭМО), отделочно-упрочняюще-калибрующая электромеханическая обработка (ОУКЭМО),

упрочняющее электромеханическое восстановление (УЭМВ), комбинированные способы обработки.

При ЭМПЗ наибольшее влияние на формирование структуры и, как следствие, свойств поверхностного слоя резьбы оказывает температура в зоне контакта «инструмент – поверхность», проходящим электрическим током. В результате преобразования электрической энергии в тепловую, зона контакта мгновенно нагревается до температуры свыше 1100 °С. Отвод тепла из высокотемпературной зоны происходит нижележащими слоями металла заготовки, а также за счет принудительного охлаждения эмульсией или водными растворами с ингибиторами коррозии.

ОУЭМО резьбы формирует комплекс уникальных свойств винтовой поверхности, получить которые другими методами крайне затруднительно или невозможно, в частности:

- формирование резьбы с закаленным поверхностным слоем твердостью HV 4000...8000 МПа и пластичной основой нижележащих слоев твердостью HV 2000...3600 МПа;
- формирование благоприятной формы и расположения волокон металла в сечении впадины резьбы;
- получение оптимальной шероховатости поверхностей резьбы с плоской формой вершин и скругленных микровпадин;
- отсутствуют окисление, обезуглероживание и коробление деталей;
- глубина деформированного слоя 0,02...0,08 мм, а глубина слоя с повышенной твердостью 0,04...0,20 мм;
- структура поверхностного слоя мартенситная мелкодисперсная.

ОУКЭМО резьбы, помимо показателей, реализуемых при ОУЭМО обеспечивает:

- формирование номинального угла профиля резьбы;
- формирование благоприятной формы впадины резьбы;
- благоприятную текстуру волокон металла во впадине и на прилегающих боковых поверхностях витков резьбы.

УЭМВ позволяет восстанавливать геометрические параметры изношенной метрической резьбы, формировать текстуру волокон металла во впадине, повысить микротвердость поверхностного слоя [4].

Комбинированные способы позволяют сочетать последовательность выполнения операций объемной термической обработки заготовок и ЭМО [5], наплавку и последующее упрочнение резьбы.

Результаты опытно-экспериментальных исследований и производственных испытаний деталей с резьбой после ЭМО указывают на эффективность разработанных технологий. Необходимо отметить, что для целой группы деталей с наружной и внутренней резьбой, производителями изделий и ремонтными подразделениями, упрочняющая обработка не производится.

В условиях трубной базы Уфимского филиала Роснефть-ремонт проведены сравнительные испытания резьбовых соединений насосно-компрессорных труб 73 группы прочности Д и муфт 73. Испытанию подвергали детали, обработанные по существующей технологии и изделия после ЭМО резьбы. При базовой

стойкости резьбовых соединений в 20-25 циклов свинчивания-развинчивания, после ЭМО резьбы, износостойкость увеличилась в 8-10 раз.

Результаты производственных испытаний переводников П147/147, П133/133 производства ООО «НИГМАШ» республика Башкортостан, выполненных ООО «Управляющая компания «Татбурнефть» ПАО «ТАТНЕФТЬ» подтвердили высокую износостойкость резьбы упрочненной по технологии финишной ЭМО.

Перспективно применение технологии ЭМО для упрочнения резьбы насосно-компрессорных труб, колонковых и обсадных труб, корпусов установок электроцентробежных насосов изготовленных из сталей 22ГЮ, 25ГЮ. В результате ЭМО резьбы твердость поверхностного слоя увеличивается с 1900-2100 МПа до 4800-5100 МПа, формируются градиентные слои с мелкодисперсной структурой поверхностного слоя.

Список литературы

1. Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мавлютов Р.Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
2. Патент №186927 РФ. Инструментальный узел для электромеханической обработки резьбы / С.К. Федоров, Л.В. Федорова, Ю.С. Иванова, А.А. Яковлева, М.В. Власов, В.Н. Зарипов, М.А. Лашуков. – Заявка №2018106130/20, 2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №5.
3. Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Y.S., Voronina M.V., Sadovnikov A.V., Nikitin V.N. Increasing the wear resistance of adapters and drill pipes by electromechanical processing // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 233, pp. 539-546. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.539.
4. Патент №2240908 РФ. Способ восстановления резьбы на детали / С.К. Федоров, Л.В. Федорова, К.Г. Львов, Ю.С. Иванова. – Заявка №2002135739/02.2002.; опубл. 27.11.2004, Бюл. №33.
5. Патент №2772341 РФ. Способ изготовления резьбы на детали / С.К. Федоров, Л.В. Федорова, Ю.С. Иванова, Т.Р. Хуснетдинов, А.Г. Гамидов, Д.В. Гаврилов. – Заявка №2021121209 от 19.07.2021; опубл. 18.05.2022, Бюл. №14.

Сведения об авторах:

Федоров Сергей Константинович – д.т.н., доцент, профессор кафедры МТ13;

Федорова Лилия Владимировна – д.т.н., профессор, профессор кафедры МТ8;

Иванова Юлия Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры МТ3;

Хуснетдинов Тимур Рустямович – старший преподаватель кафедры РК1;

Карлявин Алексей Михайлович – инженер.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, С ПРИМЕНЕНИЕМ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

*Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Блохин В.Б., Кожевников В.Ю., Осинников И.В.
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь*

Ключевые слова: режимы обработки, время включения импульса, сила тока, напряжение, селективное лазерное сплавление, копировально-прошивная электроэрозионная обработка, шероховатость по Ra .

Аннотация. В работе проведено исследование формирования регулируемого микро рельефа образцов на поверхности электродов-инструментов, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления из мартенситносталя MS1, с применением копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Получена регрессионная модель, описывающая взаимосвязь параметра качества поверхности электродов-инструментов – шероховатости по Ra в зависимости от режимов копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Установлено, что минимальное значение шероховатости на электродов-инструментах по $Ra = 2,95165$ мкм получено при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 75$ В. Время включения импульса оказывает незначительное влияние на шероховатость поверхности. Максимальное значение шероховатости по $Ra = 4,037$ получена при силе тока $I = 8$ А. и напряжении $U = 75$ В.

RESEARCH OF THE FORMATION OF ADJUSTABLE MICRORELIEF ON THE PRODUCTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING WITH THE USE OF COPY-PIERCING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

*Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Blokhin V.B., Kozhevnikov V.Y., Osinnikov I.V.
Perm National Research Polytechnic University, Perm.*

Keywords: machining modes, pulse on-off time, current, voltage, selective laser fusion, copy-piercing electrical discharge machining, Ra roughness.

Abstract. In this work studies the formation of adjustable microrelief of electrode-instrument samples manufactured by selective laser fusion technology from martensitic aging steel MS1 by copy-piercing electrical discharge machining. A regression model describing the relationship between the surface quality parameter of electrode-instrument – Ra roughness depending on the modes of copy-piercing electrical discharge machining has been obtained. It is established that the minimum value of roughness on electrode-instrument y $Ra = 2.95165$ μm is obtained at current strength $I = 4$ A and voltage $U = 75$ V. The pulse turn-on time has a negligible effect on the surface roughness. The maximum roughness value of $Ra = 4.037$ was obtained at current intensity $I = 8$ A. and voltage $U = 75$ V.

Основной проблемой изделий, полученных методом селективного лазерного спекания (СЛС), является необходимость доработки поверхности для повышения ее шероховатости [1-2]. Технология копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) позволяет наносить регулируемый микро рельеф с минимальной потерей геометрии электрода [3-4].

В работе рассматривается экспериментальное исследование нанесения регулируемого микрорельефа на поверхности электродов-инструментов (ЭИ), изготовленные по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) из мартенситностареющей стали MS1, методом копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО). Обосновывается исследование тем, что на сегодняшний день недостаточно изучены вопросы нанесения регулируемого микрорельефа на сложно профильные ЭИ, полученные аддитивными технологиями. Проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 с двумя уровнями и тремя факторами. В качестве исследуемого параметра замерялась шероховатость поверхности по Ra аддитивно изготовленного ЭИ в зависимости от входных параметров – силы тока I , А; напряжения U , В и времени включения импульса T_{on} , мкс. Выходным параметром для оценивания являлась шероховатость поверхности по Ra ЭИ.

Выведена эмпирическая зависимость (1) формирования шероховатости поверхности на ЭИ по Ra (γ , мкм), исходя из варьирования режимов обработки:

$$Ra = -0,7 + 1,07 \cdot I + 0,03 \cdot U + 0,05 \cdot T_{on} - 0,01 \cdot I \cdot U - 0,01 \cdot I \cdot T_{on}. \quad (1)$$

График зависимости варьируемых параметров (силы тока и времени включения импульса) при постоянно напряжении на значение шероховатости обработанной поверхности напечатанного ЭИ по Ra , выполненного из порошка мартенситностареющей стали MS1 методом СЛС, представлен на рисунке 1.

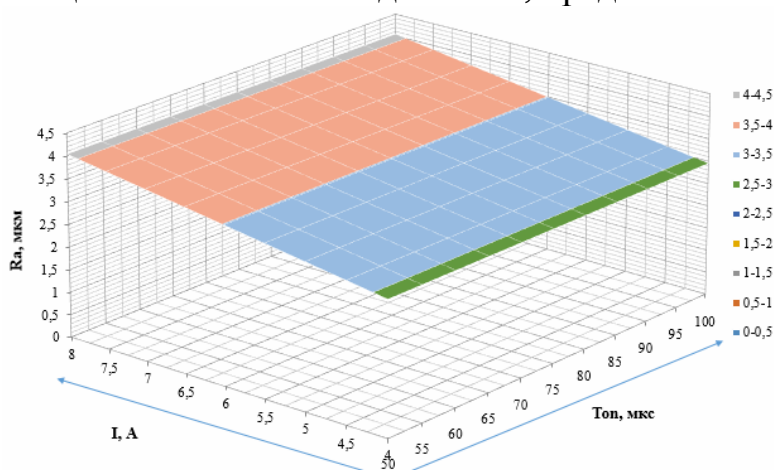


Рис. 1. Гиперповерхность зависимости шероховатости поверхности по Ra ЭИ от времени включения импульса T_{on} , мкс и силы тока I , А при постоянном напряжении $U = 75$ В

Исследование выявило наличие приплавленных частиц порошка и неровностей на поверхности ЭИ из мартенситностареющей стали MS1 после СЛС, представленной на рисунке 2а, формирующих её профиль.

После использования КПЭЭО при силе тока $I = 4$ А, напряжении $U = 100$ В и времени включения импульса $T_{on} = 100$ мкс, рельеф поверхности ЭИ изменился, как показано на рисунке 2, б, неровности сгладились, но появились локальные трещины толщиной от 1 до 2 микрометров. Высокие температуры в зоне обработки, вызванные мощностью единичных импульсов, и быстрое охлаждение диэлектрической жидкостью способствовали формированию этих трещин.

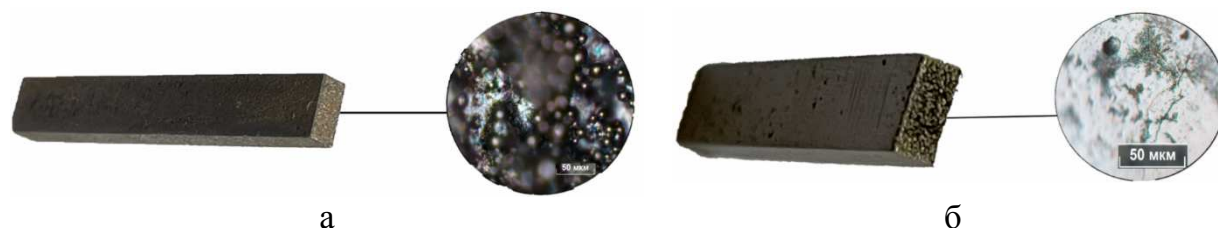


Рис. 2. Поверхности ЭИ: а – после СЛС при увеличении X300, б – после КПЭО при увеличении X500

Авторы приходят к выводу, что получена связь между качеством поверхности ЭИ – шероховатостью Ra и режимами обработки КПЭО. Однако, увеличение времени воздействия импульса слабо влияет на этот показатель. Повышение силы тока приводит к увеличению количества разрядов и образованию трещин на ЭИ, ухудшающих его эксплуатационные характеристики. Рекомендуется использовать чистовые режимы с минимальными значениями силы тока и напряжения для уменьшения поверхностных дефектов.

Список литературы

1. Didier P., Coz G.L., Piotrowski B., Bravetti P., Laheurte P., Moufki A. Post-processing of additive manufactured parts: a numerical strategy applied in maxillary implantology // *Matériaux & Techniques*. 2022, vol. 110, iss. 3, pp. 1-12.
2. Cosma C., Balc N., Berce P., Popan A., Cosma A., Burde A. Direct manufacturing of customized implants from biometals, by 3D printing // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2017, vol. 15, iss. 4, pp. 42-49.
3. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro Electrical Discharge Machining of Micro-Hole // *Advanced Science Engineering and Medicine*. 2020, vol. 11, iss. 11, pp. 1335-1339.
4. Taфраouti A., Yasmina L., Leimann P.K. Study on the Electrical and Geometrical Parameters of Micro Electrical Discharge Machining // *Micro and Nanosystems*. 2023, vol. 15, iss. 3, pp. 23-29.

Сведения об авторах:

Абляз Тимур Ризович – к.т.н., доцент, доцент кафедры ИТМ;

Шлыков Евгений Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры ИТМ;

Блохин Владимир Борисович – аспирант;

Кожевников Владислав Юрьевич – магистрант;

Осинников Илья Владимирович – аспирант.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВВ751П

*Шлыков Е.С., Блохин В.Б., Абляз Т.Р., Легостаев Н.С., Осинников И.В.
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь*

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, режимы обработки, ширина реза, жаропрочный никелевый сплав ВВ751П, эмпирическая модель.

Аннотация. В работе проведено исследование влияния различных режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на изделия из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. Разработана эмпирическая модель, описывающая взаимосвязь ширины реза от режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки. Установлено, что при высоте заготовки 15 мм максимальное значение ширины реза $Y = 380$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 277$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс, $T_{on} = 21$ мкс. При обработке заготовки высотой 10 мм максимальное значение ширины реза $Y = 360$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 292$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс, $T_{on} = 25,5$ мкс.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WIRE-CUT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS MODES ON THE FORMATION OF CUT WIDTH WHEN MACHINING HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY ВВ751P

*Shlykov E.S., Blokhin V.B., Ablyaz T.R., Legostaev N.S., Osinnikov I.V.
Perm National Research Polytechnic University, Perm*

Keywords: electrical discharge machining, machining modes, cutting width, heat-resistant nickel alloy ВВ751P, empirical model.

Abstract. In this paper we investigated the influence of different modes of wire-cut electrical discharge machining on products made of heat-resistant nickel alloy ВВ751P. An empirical model describing the relationship between the cut width and modes of wire-cut electrical discharge machining has been developed. It is established that at the height of the workpiece 15 mm the maximum value of the cutting width $Y = 380$ μm is achieved at $T_{on} = 30$ μs , $T_{off} = 60$ μs , and the minimum value of the cutting width $Y = 277$ μm is achieved at $T_{off} = 51$ μs , $T_{on} = 21$ μs . When machining a 10 mm high workpiece, the maximum value of the cutting width $Y = 360$ μm is achieved at $T_{on} = 30$ μs , $T_{off} = 60$ μs , and the minimum value of the cutting width $Y = 292$ μm is achieved at $T_{off} = 51$ μs , $T_{on} = 25.5$ μs .

Внедрение электроэрозионной обработки в настоящее время определено динамичным развитием отечественного машиностроения и использованием материалов нового поколения при изготовлении газотурбинных двигателей (ГТД). Использование проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) помогает достичь требуемых параметров качества и точности изделий, выполненных из материалов нового поколения. Один из основных показателей качества, позволяющий оценить точность ПВЭЭО изделий из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, является величина межэлектродного зазора,

оцениваемая шириной реза. Актуальной задачей является изучение зависимости ширины реза при электроэрозионной обработке изделий, выполненных из новых жаропрочных материалов [1-3].

В работе представлено экспериментальное исследование ширины реза (Y , мкм). Проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 с двумя уровнями и тремя факторами. В качестве варьируемых параметров использованы – время включения импульса T_{on} , мкс, время выключения импульса T_{off} , мкс и высота заготовки h , мм. В результате получена регрессионная модель зависимости ширины реза Y , мкм от режимов ПВЭЭО жаропрочного никелевого сплава ВВ751П (1).

$$Y = 875422 + 139560 \cdot T_{off} + 1179 \cdot H \cdot T_{off} + 2557 \cdot T_{on} \cdot H - 43 \cdot T_{off} \cdot T_{on} \cdot H. (1)$$

На рисунках 1, 2 представлены графики зависимости величины ширины реза Y от времени действия импульса T_{on} , мкс и времени выключения импульса T_{off} , мкс при высоте обработки $h = 10$ мм и 15 мм соответственно.

Из графика гиперповерхности (рис. 1) следует, что при $h = 10$ мм максимальное значение ширины реза $Y = 360$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 292$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс, $T_{on} = 25,5$ мкс.

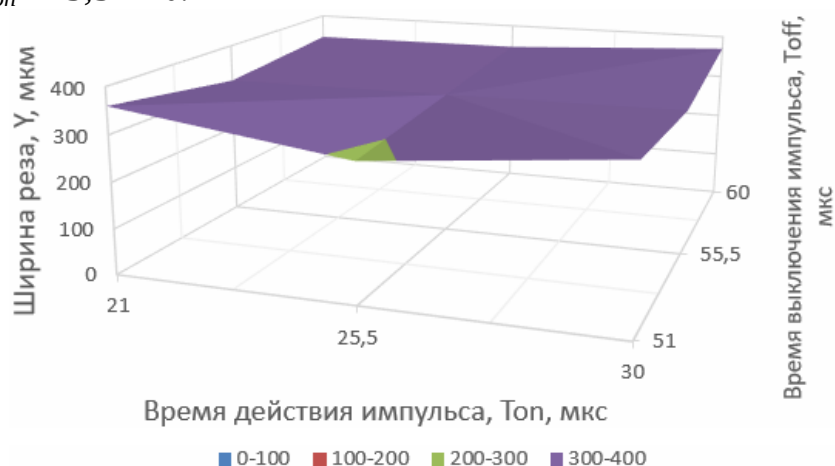


Рис. 1. График зависимости ширины реза от времени включения и выключения импульса при $h = 10$ мм

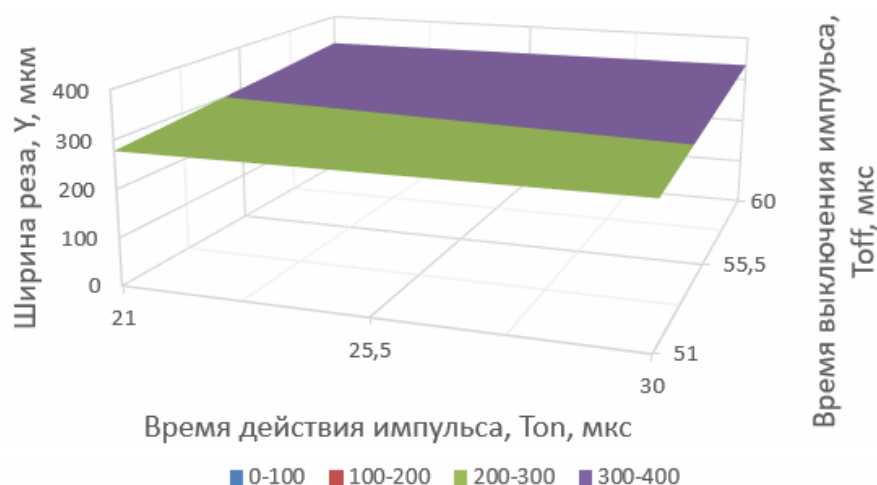


Рис. 2. График зависимости ширины реза от времени включения и выключения импульса при $h = 15$ мм

Из графика гиперповерхности (рис. 2) следует, что при $h = 15$ мм максимальное значение ширины реза $Y = 380$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 277$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс, $T_{on} = 21$ мкс.

На рисунках 2-3 представлены замеры величины ширины реза образцов толщиной 10 мм и 15 мм соответственно, полученных при обработке на режимах 3,4,7,8 при увеличении 100 крат.

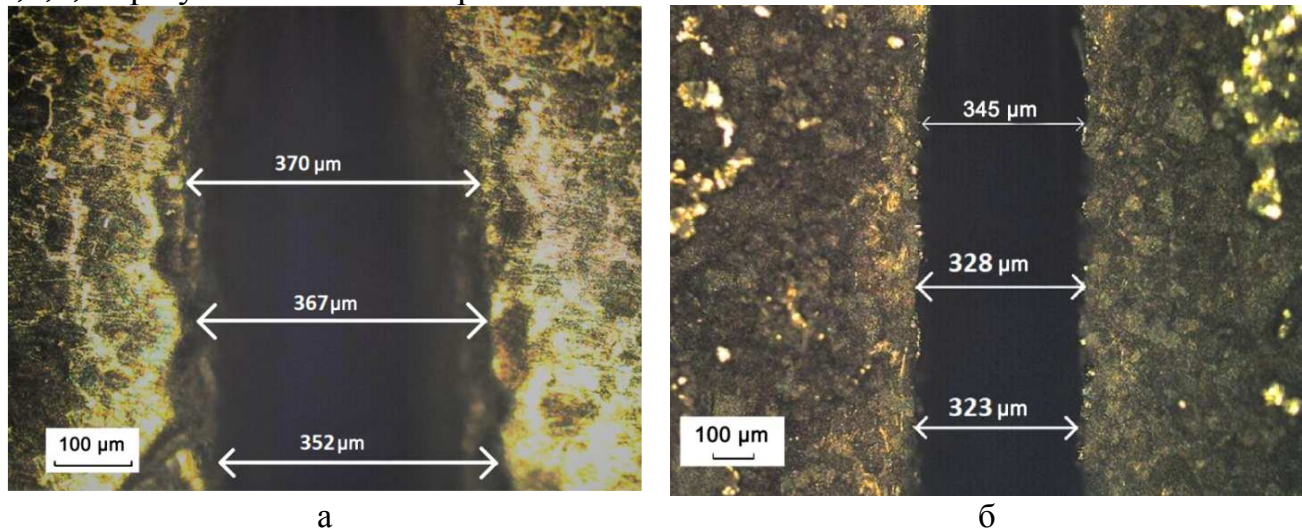


Рис. 3. Значение величины ширины реза при обработке на режимах 3 и 4 при увеличении $\times 100$: а) режим 3; б) режим 4

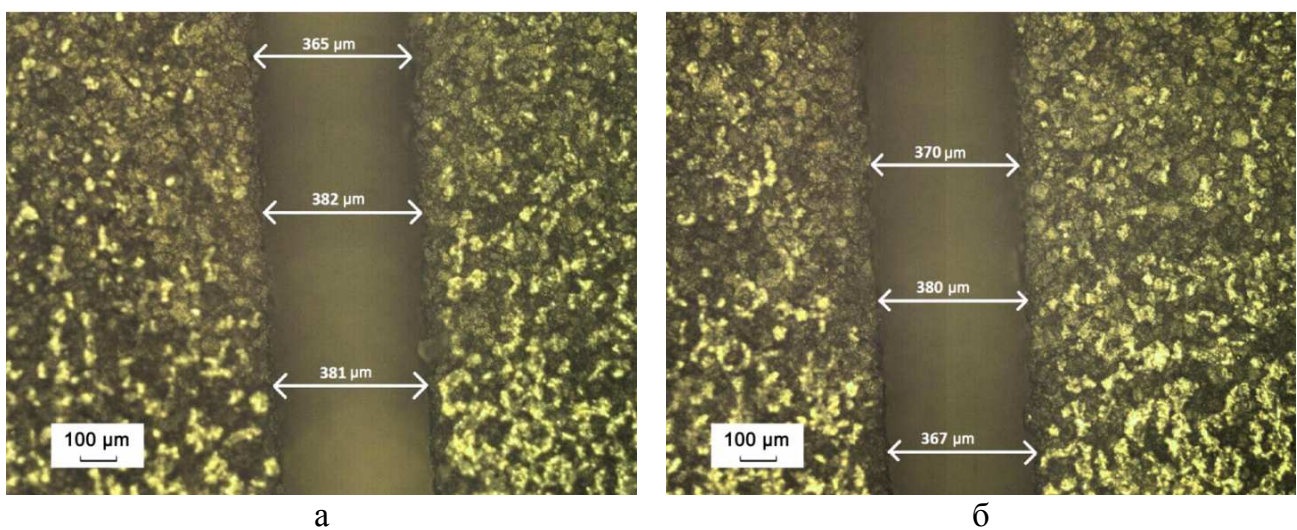


Рис. 4. Ширина реза при обработке на режимах 7 и 8, высоте образца 10 мм при увеличении $\times 100$: а) режим 7; б) режим 8

В ходе выполнения исследования.

1. Разработана эмпирическая модель, которая показывает зависимость ширины реза при обработке жаропрочного никелевого сплава ВВ751П в зависимости от режимов и высоты обработки. Установлено, что ширина реза зависит не от одного из параметров обработки, а от совокупности всех параметров.

2. Установлено, что при ПВЭЭО при $h = 15$ мм максимальное значение ширины реза $Y = 380$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 277$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс,

$T_{on} = 21$ мкс. При высоте $h = 10$ мм максимальное значение ширины реза $Y = 360$ мкм достигается при $T_{on} = 30$ мкс, $T_{off} = 60$ мкс, а минимальное значение ширины реза $Y = 292$ мкм достигается при $T_{off} = 51$ мкс, $T_{on} = 25,5$ мкс.

Список литературы

1. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В. и др. Освоение перспективного высокопрочного гранулируемого никелевого сплава для турбинных дисков авиационных двигателей нового поколения // Технология легких сплавов. – 2012. – № 3. – С. 64-69.
2. Иноземцев А.А., Сандарский В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь: Изд-во ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
3. Савицкий В.В. С13 Электроэрозионные методы обработки материалов: учеб пособие для вузов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 276 с.

Сведения об авторах:

Шлыков Евгений Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры ИТМ;

Блохин Владимир Борисович – аспирант;

Абляз Тимур Ризович – к.т.н., доцент, доцент кафедры ИТМ;

Легостаев Николай Сергеевич – магистрант;

Осинников Илья Владимирович – аспирант.

СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИН ПО ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВИТКОВ

*Землянушнова Н.Ю., Землянушнов Н.А., Мальных В.Д.
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь*

Ключевые слова: упрочнение пружин, напряженный наклеп, контактное заневоливание, устройство для упрочнения.

Аннотация. Проанализирован метод упрочнения пружин напряжённым наклепом. При напряжённом наклепе наружная и внутренняя поверхности пружин оказались обработаны неравномерно, малое количество дроби достигло внутренней поверхности пружины. Для устранения указанного недостатка после напряжённого дробеметного наклепа вместо контактного заневоливания рекомендован наклёп наружной и внутренней поверхности пружины штамповкой одновременно.

METHOD OF HARDENING SPRINGS ALONG THE INNER SURFACE OF THE COILS

*Zemlyanushnova N.Yu., Zemlyanushnov N.A., Malykhin V.D.
North Caucasus Federal University, Stavropol*

Keywords: hardening of springs, strained riveting, contact hardening, hardening device.

Abstract. The method of hardening springs with a stressed rivet is analyzed. During a strained riveting, the outer and inner surfaces of the springs were treated unevenly, a small amount of shot reached the inner surface of the spring. To eliminate this drawback after a strained shotgun riveting, instead of contact clamping, it is recommended to rivet the outer and inner surfaces of the spring by stamping at the same time.

В условиях развития современной техники и необходимости импортозамещения остро стоит задача повышения качества ответственных деталей, в том числе пружин. Качество пружин и пружинных механизмов определяет ресурс большинства машин. Поэтому актуальной является задача разработки новых способов упрочнения пружин.

Одной из обязательных операций при изготовлении пружин является дробеметный наклеп, который в несколько раз повышает ресурс пружин при циклическом нагружении. Причем, рекомендуется обрабатывать дробью рессоры, клапанные пружины в заневоленном (сжатом) состоянии [3].

Однако, после напряжённого наклепа [2] на поверхности пружин осталась риска глубиной до 0,01 мм проходящая по внутреннему диаметру пружины (рис. 1, 2). Риска является технологической проблемой безоправочной навивки пружин. На наружной поверхности пружины наблюдаются следы дробеметного наклёпа глубиной до 0,02 мм. Глубина риски на внутренней поверхности не превышает глубины наклёпанного слоя на наружной поверхности пружины. На внутренней поверхности пружины заметны неотчетливые и редкие следы от дроби. При напряжённом наклепе наружная и внутренняя поверхности пружин оказались упрочнены неравномерно, небольшое количество дроби попало на внутреннюю поверхность пружины.



Рис. 1. Внутренняя поверхность витка пружины

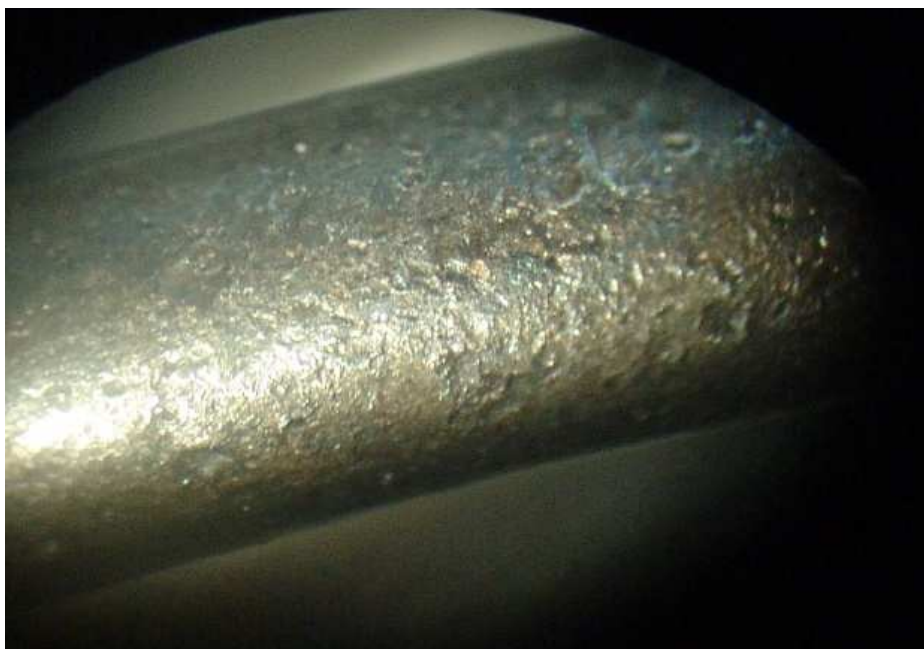


Рис. 2. Наружная поверхность витка пружины

При приложении рабочей нагрузки к пружине максимально напряжённой является внутренняя поверхность её витков, на ней зарождаются усталостные трещины [2]. В данном случае риска является дополнительным концентратором напряжений и увеличивает вероятность появления микротрещин.

Для высокоскоростных и высоконагруженных пружин после дробеметного наклёпа рекомендуется применять контактное заневоливание [1]. В случае напряжённого наклёпа глубина упрочненного слоя будет неравномерно распределена по поверхности проволоки пружины. При исследовании напряжённо-деформированного состояния (НДС) пружины при контактном заневоливании будет сложно учесть влияние упрочненного слоя после дробеметного наклёпа на параметры пружины. Поэтому метод напряженного наклёпа ответственных пружин следует или заменить наклёпом пружины в свободном состоянии или доработать способ упрочнения пружин.

В качестве усовершенствования после напряжённого дробеметного наклепа вместо контактного заневоливания рекомендован [4] наклёп наружной и внутренней поверхности пружины штамповкой одновременно проталкиванием (рис. 3) плотно одетой на пуансон 3 до упора в буртик 4 сжатой пружины 1 сквозь отверстие матрицы 2 устройства, имеющего диаметр меньший, чем диаметр находящейся на пуансоне пружины. При установке в устройство пружина опирается на коническую расточку или упор 5. Радиус пуансона R_1 , радиус матрицы R_2 .

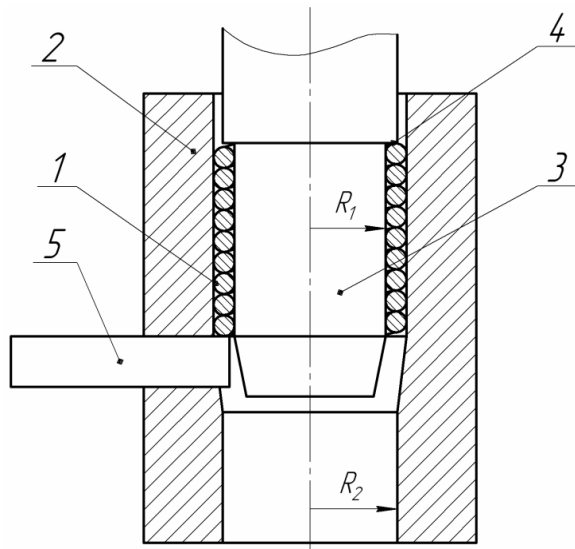


Рис. 3. Устройство для упрочнения пружин

Для определения технологических параметров упрочнения пружин по предлагаемому способу [4] следует разработать теорию НДС пружины при упрочнении по внутренней поверхности витков после напряжённого наклепа. В качестве аналога можно использовать теорию влияния дробемётной обработки на изменение геометрических параметров пружин при контактном заневоливании [1].

Список литературы

1. Землянушов Н.А., Землянушова Н.Ю., Дорохов Д.О. Теоретическое исследование влияния дробемётной обработки на изменение геометрических параметров пружин при контактном заневоливании // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2022. – № 6. – С. 38-47.
2. Знаменский Д.В., Землянушова Н.Ю., Фадеев В.В., Землянушов Н.А. К повышению ресурса клапанных пружин дизельных двигателей д-240 // *Сборник научных трудов SWorld*. – 2014. – Т. 2, №3. – С. 43-47.
3. Радчик А.С. Буртковский И.И. Пружины и рессоры. – Киев: Техника, 1973. – 120 с.
4. Патент №2548876 РФ. Способ упрочнения винтовых цилиндрических пружин / Н.Ю. Землянушова, Д.В. Знаменский, Ю.М. Тебенко, Н.А. Землянушов. – Заявка №2013147210/02 от 22.10.2013; опубл. 20.04.2015.

Сведения об авторах:

Землянушова Надежда Юрьевна – к.т.н., доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования;

Землянушов Никита Андреевич – к.т.н., доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования;

Малыхин Владислав Дмитриевич – студент.

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КАК СРЕДСТВО ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ СПЛАВА АМЦ

Сорокопуд Н.И.

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

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, Al 3003, АМц, окись алюминия, производительность магнитно-абразивной обработки, сварка.

Аннотация. Поверхностный слой изделий, выполненных из алюминия и сплавов на его основе, подвержен окислению при взаимодействии с кислородом. В результате на поверхности изделия образуется плёнка окиси алюминия. В случае, если такая поверхность предназначена для сваривания, охваченный слой оксида может привести к снижению качества сварного соединения. Метод магнитно-абразивной обработки успешно применяется для подготовки под сварку алюминиевых поверхностей из сплавов системы Al-Mg, однако исследования об эффективности метода при выполнении аналогичной задачи для сплавов системы Al-Mn, в частности, сплава АМц, отсутствуют. Исходя из этого, целью настоящего исследования исследование потенциала применения магнитно-абразивной обработки для подготовки поверхностей изделий из сплава АМц к сварке, определение толщины снимаемого при обработке слоя и толщины новообразованной плёнки оксида алюминия на обработанной поверхности.

MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT AS A MEANS TO IMPROVE THE QUALITY OF WELDING SURFACES MADE OF AL 3003 ALLOY

Sorokopud N.I.

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

Keywords: magnetic abrasive blasting, Al 3003, Al-Mn, aluminum oxide, magnetic abrasive blasting performance, welding.

Abstract. The surface layer of products made of aluminum and aluminum-based alloys is subject to oxidation when interacting with oxygen. As a result, a film of aluminum oxide is formed on the surface of the product. If such a surface is intended for welding, this oxide layer may lead to a reduction in the quality of the welded joint. The method of magnetic-abrasive treatment is successfully applied for preparation for welding of aluminum surfaces from alloys of Al-Mg system, but there are no studies on the effectiveness of the method when performing a similar task for alloys of Al-Mn system, in particular, for AMz alloy. Therefore, the purpose of this study is to investigate the potential of magnetic abrasive treatment for the preparation of surfaces of AMz alloy products for welding, to determine the thickness of the layer removed during treatment and the thickness of the newly formed aluminum oxide film on the treated surface.

Отрасль машиностроения тесно связана с дисциплиной материаловедения, описывающей характеристики металлов и сплавов и особенности их внутреннего строения. Материал для изготовления изделия в первую очередь определяется по его физико-механическим свойствам, и лишь во вторую – по показателям экономичности и сложности обработки. В качестве примера можно отметить широкое применение алюминия и сплавов на его основе при изготовлении

сварных конструкций. Требования к лёгкости и коррозионной стойкости определяют применение именно этого материала, однако его особенности, в частности, образование плёнки оксида алюминия при взаимодействии свариваемой поверхности с кислородом, приводят к определённым трудностям при создании неразъёмного соединения. Означенная выше плёнка оксида алюминия имеет температуры плавления значительно выше, чем аналогичный показатель непосредственно свариваемого материала. В результате этого оксидная плёнка при сварке не испаряется полностью, а остаётся в сварном шве в виде посторонних включений. Такие включения нарушают структуру шва и негативно влияют на качество итогового соединения [1].

Интенсивность возникновения на поверхности плёнки оксида алюминия во многом зависит от типа механической обработки материала [2]. Таким образом, выбор метода обработки, который будет предшествовать процессу сварки и после которого интенсивность возникновения на обработанной поверхности оксидной плёнки будет ниже, чем у аналогов, может, при прочих равных условиях, оказать положительное влияние на качество сварного соединения.

Современным методом финишной механообработки, обладающим определённым потенциалом в решении настоящей задачи выбора метода обработки перед сваркой, является метод магнитно-абразивной обработки. Данный метод показал свою эффективность в снижении интенсивности образования плёнки оксида алюминия на обработанной поверхности из сплава АМг-6 в сравнении с традиционными методами финишной обработки, о чём свидетельствуют исследования доктора технических наук Хомича Н.С. [3]. Однако использования этих данных для проектирования процесса магнитно-абразивной обработки и последующей сварки алюминиевых сплавов другой химической группы, например, АМц системы Al-Mn, не представляется возможным ввиду другого набора физико-механических свойств этого сплава. Тем не менее необходимость в сваривании материалов этой системы сохраняется.

Таким образом данное исследование будет направлено на изучения возможности удаления оксидной плёнки с поверхности изделия из сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки и интенсивности новообразования слоя оксида алюминия после данного метода обработки.

Поставленная задача исследования реализовывалась путем проведения эксперимента по магнитно-абразивной обработке заготовок из сплава интересующей марки АМц, и последующего анализа полученных данных. Эксперимент проводился в лабораторных условиях с использованием оборудования, в том числе измерительного, кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Было принято, что для установления возможности удаления оксидной плёнки с поверхности сплава АМц для экспериментальной обработки будет достаточно заготовки простой квадратной формы, размеры которой не превышали 30x30x2 мм.

Для настоящего исследования было принято, что снятие материала с обрабатываемой поверхности происходит равномерно. Согласно матрице центрального композиционного ротатбельного плана в ходе эксперимента был выполнен 31 опыт. Варьируемыми параметрами в ходе эксперимента считалась

величина магнитной индукции в зоне обработки, частота вращения заготовки в абразивной массе, скорость подачи заготовки относительно магнитных полюсов опытного магнитно-абразивного станка, а также время обработки. Эксперимент является полнофакторным (2^4), таким образом, 16 опытов из 31 являются ядром плана, остальные 15 – центр плана и «звёздные» точки (7 и 8 опытов соответственно).

Поскольку измерение толщины снимаемого слоя прямыми средствами измерения в данном случае затруднено низкими значениями измеряемого параметра, было принято решение по оценке количества снятого материала по изменению массы заготовки в результате обработки. После по соответствующей формуле, представленной ниже, выполнялся перерасчёт разницы масс в искомый показатель.

Толщина новообразованной оксидной плёнки определялась замерами нанотвёрдости поверхности после обработки.

$$h = \Delta Q / \rho S, \quad (1)$$

где h – толщина снимаемого в процессе обработки материала, мм; ΔQ – масса снятого материала, мг; ρ – плотность алюминия, 2,73 мг/мм³ [4, 6]; S – площадь обрабатываемой поверхности заготовки, для данного экспериментального исследования принятая равной 1686,75 мм².

Глубина проникновения слоя оксида алюминия в поверхность заготовки после выполнения обработки определялась по скачкообразному изменению показателя твёрдости поверхности при выполнении серии соответствующих измерений. Данные, полученные в результате пересчёта всех экспериментальных значений масс заготовок, использовались для составления регрессионной модели полиномиальных функций зависимостей между величиной варьируемых параметров, и толщиной снимаемого слоя при магнитно-абразивной обработке изделий из сплава АМц. Адекватность полученной модели проверялась по критерию Фишера.

Выводы о зависимостях влияния варьируемых в рамках экспериментальных исследований параметров обработки на показатель толщины снимаемого слоя с обрабатываемой поверхности устанавливались по результатам интерпретации данных регрессионной модели и полиномиальных функций. Установлено, что наиболее сильное воздействие на толщину снимаемого слоя оказывает значение параметра магнитной индукции B , Тл. Это объясняется тем, что от величины данного параметра зависит степень жёсткости абразивного инструмента и, следовательно, величина силы взаимодействия абразивных зерен с подвергаемой обработке поверхностью. Полиномиальная модель влияния данного параметра показывает прямую зависимость между значением магнитной индукции и толщиной снимаемого слоя: при увеличении магнитной индукции увеличивается снимаемый в ходе обработки слой материала. Формула справедлива для интервала значений параметра 0,35÷0,95 Тл, однако будет справедливо предположить, что данная зависимость сохранится и вне означенного диапазона. Графическое представление модели отражено на рисунке 1.

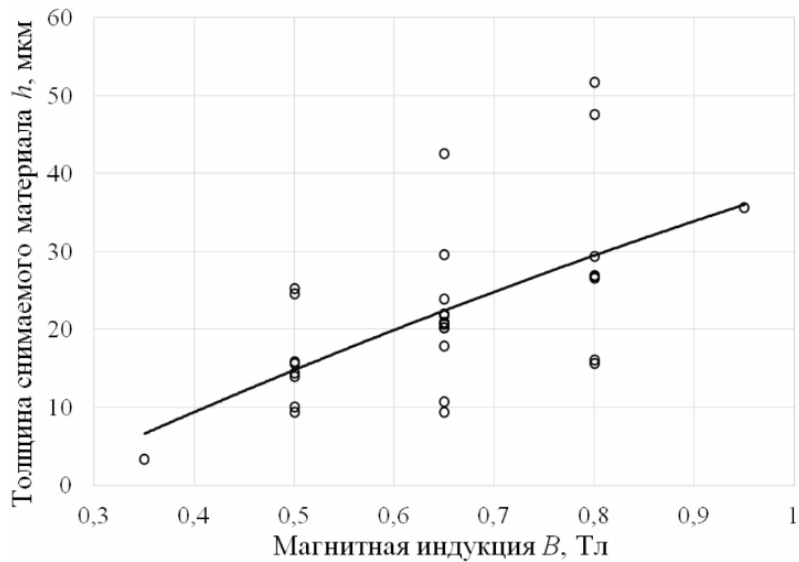


Рис. 1. Графическое представление полиномиальной модели зависимости изменений толщины снимаемого материала в процессе магнитно-абразивной обработки заготовки квадратного сечения из сплава АМц (h , мкм) от изменения величины магнитной индукции (B , Тл)

Математически модель может быть представлена следующей символьной записью:

$$h = -14,6 + 64,9 \cdot B - 12,28 \cdot B^2. \tag{2}$$

Значения толщины снимаемого слоя по выполнению всей матрицы экспериментального исследования варьировались в диапазоне $3 \div 51$ мкм. Среднее значение глубины залегания окисла алюминия не превышает 0,1 мкм, также в упомянутых ранее в работе исследованиях Хомича Н.С. отмечалось, что с поверхности сплава АМг-6 достаточно снять $4 \div 15$ мкм материала, чтобы полностью удалить оксидную плёнку [3-5]. Следовательно, полученного диапазона в $3 \div 51$ мкм так же достаточно для выполнения аналогичной задачи. Ниже представлена таблица с наборами конкретных значений варьируемых в ходе экспериментального исследования параметров, при которых достигается наибольшее или наименьшее снятие материала с обрабатываемой поверхности.

Табл. 1. Сочетания режимных параметров при наибольшем и наименьшем удалении слоя материала, достигнутого в рамках эксперимента

	B , Тл	t , мин	S , мм/мин	n , мин ⁻¹
$h_{\max}$, мкм	0,8	10	75	475
$h_{\min}$, мкм	0,35	8	125	350

Максимум удаления слоя материала было получено при следующих значениях варьируемых параметров: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹. Минимум – при $B = 0,35$ Тл, $t = 8$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 50$ мин⁻¹.

Серией измерений нанотвёрдости обработанной поверхности при разном усилии по пиковому изменению значения твёрдости определялась граница слоя окиси алюминия, твёрдость которого существенно отличается от твёрдости основного материала. По результатам измерений было установлено, что толщина новообразованной плёнки оксида алюминия не превышает 32 нм. При

максимально возможной толщине оксидной плёнки в 1250 нм справедливо утверждение, что применение метода магнитно-абразивной обработки успешно позволяет уменьшить толщину новообразованной оксидной плёнки на поверхности из алюминиевого сплава АМц.

В ходе экспериментов, выполненных в рамках данного исследования, была подтверждена результативность магнитно-абразивной обработки для устранения оксидной плёнки алюминия с поверхности изделий из сплава АМц. Установлено, что этот метод эффективен для финишной подготовки поверхностей, предназначенных для сварки, что подтверждается уменьшением толщины вновь образующегося слоя оксида алюминия. В ходе анализа экспериментальных данных выявлено, что применение магнитно-абразивной обработки плоских заготовок из сплава АМц обеспечило полное удаление оксидного слоя, присутствующего до обработки, а также снизило скорость его повторного формирования. Это демонстрирует потенциал технологии обработки в магнитном поле как этапа подготовки материалов для сварки, способствующего повышению качества сварочных операций.

Список литературы

1. Филипенко И.А. Совершенствование технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных изделий // Сборник тезисов Международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019». – СПб.: Горный университет. – 2019. – С. 587-590.
2. Schmitz Ch. Handbook of aluminum recycling. – Vulkan Verlag, 2006. – 454 p.
3. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
4. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / Под общ. ред. академика РАН И.Н. Фридляндера. – К.: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
5. Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: Наука, 2001. – 192 с.
6. Воронцова Л.А., Маслов В.В., Пешков И.Б. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. – М.: Энергия, 1971. – 224 с.

Сведения об авторе:

Сорокопуд Никита Игоревич – аспирант.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОРАЗБРЫЗГИВАЮЩИХ ФОРСУНОК ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Каюмов У.Э., Джурарев Р.У., Пардаева Ш.С.

*Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои,
Узбекистан*

Ключевые слова: поршневые компрессоры, системы охлаждения, градирня, каплеуловитель, система распределения воды, водоразбрызгивающая форсунка, SolidWorks Flow Simulation – расчёт.

Аннотация. Форсунки для охлаждения играют важную роль в промышленности, производственных процессах и других областях, где контроль температуры имеет ключевое значение для эффективной работы оборудования и сохранности материалов. В данной статье рассмотрим разработанную конструкцию водоразбрызгивающей форсунки с указанной выше совокупностью признаков, которая позволяет добиться снижения гидравлических потерь при распылении жидкости и за счет этого увеличивается радиус распыления жидкости, а также позволяет добиться мелкодисперсного распыления жидкости с формированием развитой поверхности теплообмена между потоками мелкодисперсной жидкости и потоком охлаждающего ее воздуха.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF WATER-SPLASHING NOZZLES OF THE COOLING SYSTEM OF A STATIONARY COMPRESSOR UNIT OF A MINING ENTERPRISE

Kayumov U.E., Djurayev R.U., Pardayeva Sh.S.

Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, Uzbekistan

Keywords: reciprocating compressors, cooling systems, cooling tower, drift eliminator, water distribution system, water spray nozzle, SolidWorks Flow Simulation – calculation.

Abstract. Cooling nozzles play an important role in industry, manufacturing processes and other applications where temperature control is key to efficient equipment operation and material preservation. In this paper we consider the developed design of water spraying nozzle with the above-mentioned set of features, which allows to achieve a reduction of hydraulic losses in the atomization of liquid and due to this increases the radius of atomization of liquid, and also allows to achieve fine atomization of liquid with the formation of a developed surface of heat exchange between the flow of fine liquid and the flow of air cooling it.

Горнодобывающая промышленность – одна из важнейших отраслей добычи полезных ископаемых во всем мире. Однако большинство этих важнейших полезных ископаемых находится в горных породах, залегающих глубоко в горах, что делает процесс их добычи чрезвычайно сложным. К счастью, современная техника внесла большой вклад в развитие горнодобывающей промышленности, в том числе и компрессоры (рис. 1).

Сжатый воздух повсеместно используется в горных промышленных предприятиях. В то же время это самый дорогой источник энергии. Только около 15% затраченной на получение сжатого воздуха электроэнергии переходит в его

потенциальную энергию, которую потом можно использовать при его расширении. Большая часть – 85% – это тепло, выделяемое компрессором во время работы [1].

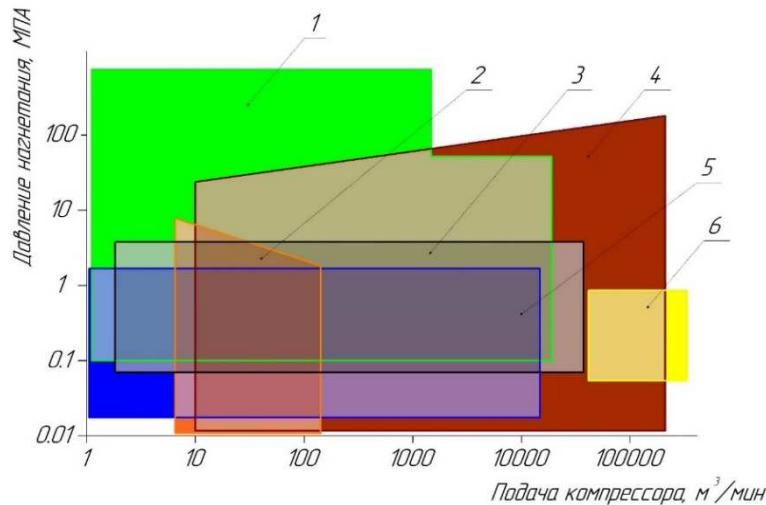


Рис. 1. Области применения различных типов компрессоров: 1 – поршневые компрессоры; 2 – воздуходувки; 3 – винтовые компрессоры; 4 – центробежные компрессоры; 5 – пластинчатые компрессоры; 6 – осевые турбокомпрессоры

Эффективная работа компрессорной установки в значительной степени зависит от охлаждения. Система охлаждения компрессорной установки решает три задачи – снижает энергоемкость процесса сжатия в цилиндре, исключает вероятность возгорания смазочных масел и способствует улучшению условий эксплуатации рабочих узлов компрессора [2].

Водяное охлаждение путем разбрызгивания приводит к большим потерям воды для компрессорных устройств и требует большой площади. Поэтому во многих случаях для системы охлаждения широко используются градирни (рис. 2).

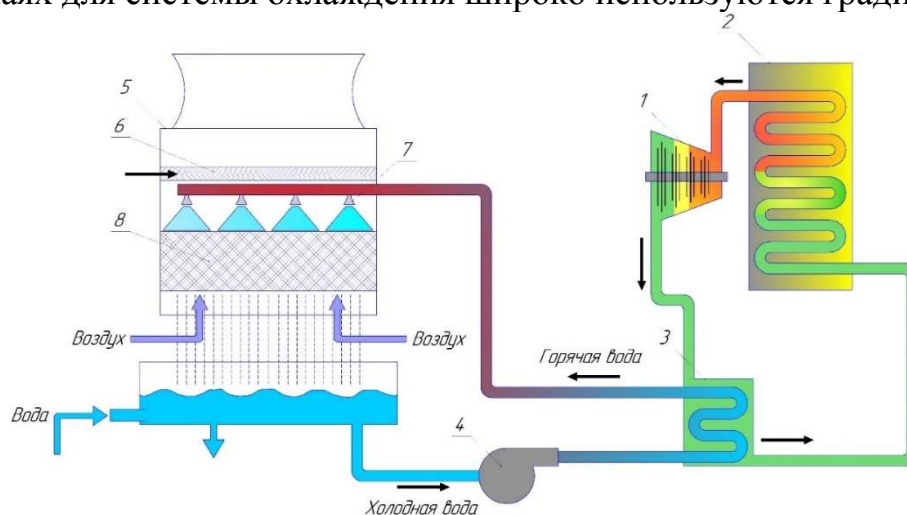


Рис. 2. Схема системы охлаждения с использованием градирни: 1 – многоступенчатый компрессор; 2 – промежуточный холодильник; 3 – концевой холодильник; 4 – насос; 5 – градирня; 6 – каплеуловитель; 7 – система распределения воды; 8 – ороситель

Охлаждение в градирнях происходит главным образом за счёт испарения оборотной воды, стекающей по оросителю в виде капель или плёнок под действием собственной силы тяжести (за счёт испарения 1% оборотной воды понижается её температура примерно на 6°C) [3].

Наиболее важным узлом градирни является распылительная насадка, или блоки оросителя, аэродинамические, массообменные и теплообменные свойства которых, определяют эффективность градирни, а именно влияют на размер новой градирни или оценку возможности охлаждения существующей.

В результате анализа штатных водораспределительных насадок, установленных на градирнях Навоийской области мы увидели, что возникновение рассмотренных недостатков обусловлено следующими причинами: малая тонкость распыла, малый угол выхода факела из сопла и увеличение показателя неравномерного распределения воды по площади орошения в результате уменьшения напора, а также с распылением воды на крупные капли.

Учитывая вышеизложенные недостатки, мы хотели бы предложить разработанную нами конструкцию форсунки (рис. 3).

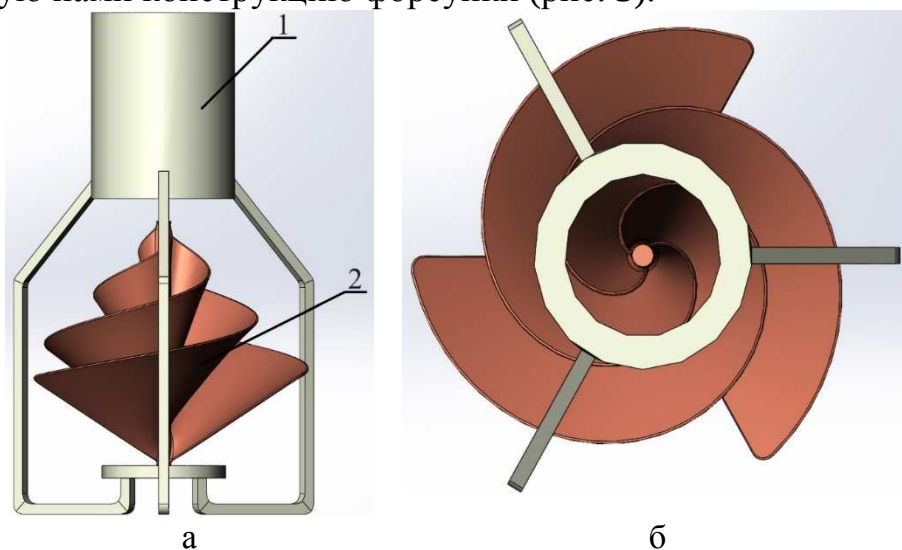


Рис 3. Принципиальная конструкция форсунки разработанная нами:
а) вид спереди форсунки; б) вид сверху форсунки

Учитывая вышеизложенные показатели, мы протестировали разработанную нами форсунку в программе SolidWorks Flow Simulation.

С целью определения оптимальных параметров форсунок в программе SolidWorks Flow Simulation задали следующие показатели:

- температура наружного воздуха;
- скорость воздуха;
- температура воды поступающей на форсунки;
- расход воды на форсунках.

Результат расчетов, выполненных в программе SolidWorks Flow Simulation, показал, что предлагаемое нами водоразбрызгивающая форсунка обладает лучшими показателями по распылению жидкости, а разбитые капли воды хорошо увеличивают взаимодействие с воздухом. Мы можем видеть это на рисунке 4.

В результате детального анализа мы увеличили угол и радиус факела в результате улучшения конструкции водораспылителя форсунки. Кроме того, мы позаботились о том, чтобы вода распределялась по ровной поверхности. Мы оптимизировали форму сопла для преодоления гидравлического сопротивления.

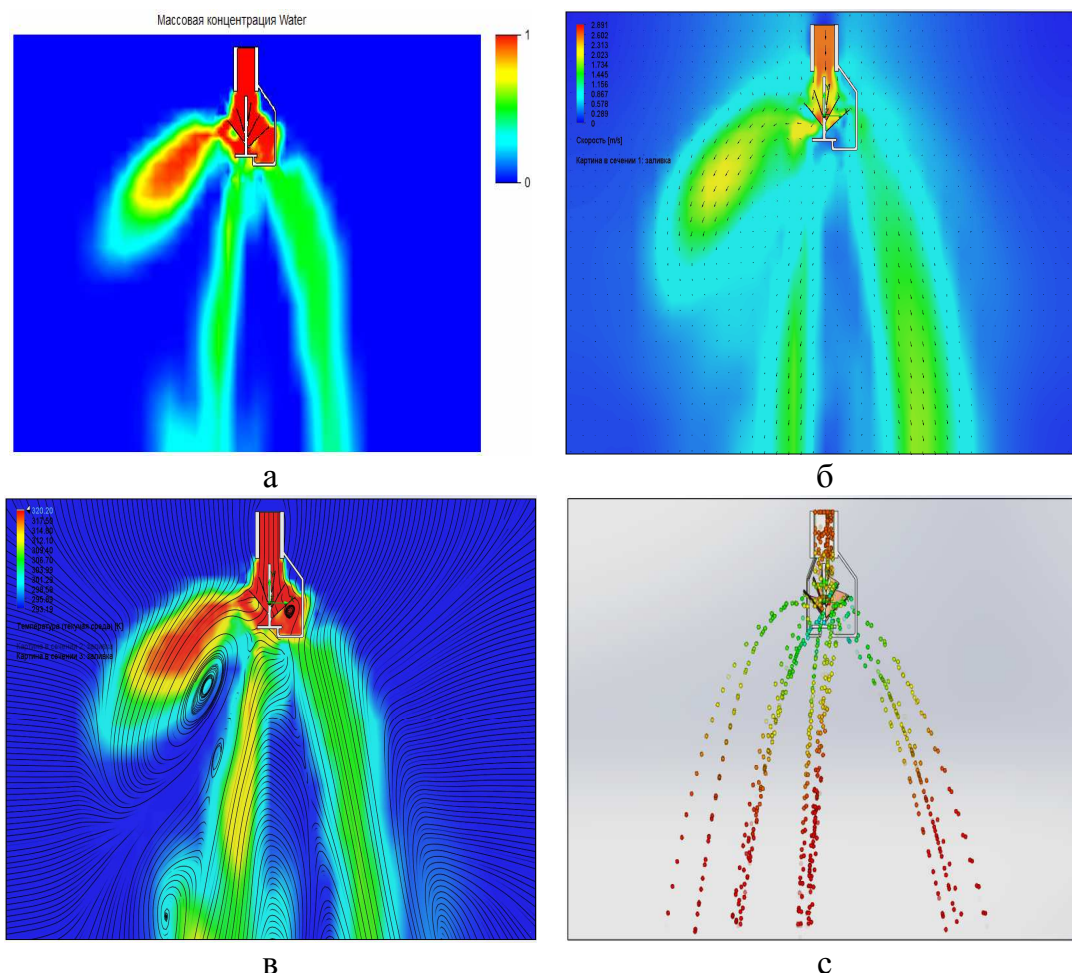


Рис 4. Результат расчетов разработанной конструкции водоразбрызгивающей форсунки: а) массовая концентрация воды в водоразбрызгивающей форсунки; б) скорость движения воды в водоразбрызгивающей форсунки; в) температура воды в водоразбрызгивающей форсунки; г) радиус и угол разбрызгивания факелов водоразбрызгивающей форсунки

В программе SolidWorks Flow Simulation мы разработали метод расчета водораспылителя форсунки с разными характеристиками. Предложенная нами водораспылительная форсунка смогла снизить температуру воды с $+39^{\circ}\text{C}$, упомянутую в источниках, до $+33,5^{\circ}\text{C}$, т.е. до 14%, и добиться эффективного охлаждения.

Список литературы

1. Управление энергией сжатого воздуха: проблемы потребления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studopedia.org/1-88320.html>.
2. Миняев Ю.Н. Энергетическое обследование пневмохозяйства промышленных предприятий. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 131 с.
3. Джураев Р.У., Меркулов М.В., Косьянов В.А., Лимитовский А.М. Повышение эффективности породоразрушающего инструмента при бурении скважин с продувкой воздухом на основе использования вихревой трубы // Горный журнал. – 2020. – №12. – С. 71-73.

Сведения об авторах:

Каюмов Умиджон Эркинович – старший преподаватель кафедры «Горная электромеханика»;
 Джураев Рустам Умарханович – д.т.н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»;
 Пардаева Шахло Сахибжановна – ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

ИЗНАШИВАНИЕ УЗЛА ТРЕНИЯ ОСЬ-ВТУЛКА ШКИВА КЛИНОРЕМЕННОГО ВАРИАТОРА

*Лукьянов А.С., Стариков А.И., Дмитриев Н.А.
Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: изнашивание, износ, износостойкие свойства, ось, втулка, вариатор.

Аннотация. В данной статье приведен пример расчета изнашивания узла трения ось-втулка шкива клиноременного вариатора. Износ втулки приводит к существенному изменению качественных показателей машины (вариатора). Необходимо учитывать процессы относительного движения и взаимодействия деталей, кинематику и динамику узла, формоизменение деталей при изнашивании. Приведены уравнения для расчета износа оси и втулки.

WEAR OF THE AXLE-BUSHING FRICTION UNIT OF THE V-BELT VARIATOR PULLEY

*Lukyanov A.S., Starikov A.I., Dmitriev N.A.
Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: wearing, wear, wear-resistant properties, axle, bushing, variator.

Abstract. This article provides an example of calculating the wear of the friction unit of the axle-bushing of the V-belt variator pulley. Wear of the bushing leads to a significant change in the quality indicators of the machine (variator). It is necessary to take into account the processes of relative movement and interaction of parts, the kinematics and dynamics of the unit, and the change in shape of parts during wear. Equations for calculating the wear of the axle and bushing are provided.

При проектировании вариатора выбирается оптимальный вариант конструкции узла, регламентируется режим его эксплуатации, ресурс, нагрузочная способность, техническое состояние узла во времени. Узел считается работоспособным, если параметры, отвечающие за его функциональное назначение, не вышли за регламентированные пределы [1].

Износ втулки приводит к существенному изменению качественных показателей машины (вариатора).

В зависимости от природы разрушения поверхностных слоев при трении имеются различные подходы к расчету узлов трения на износ.

Сопряжения ось-втулка в вариаторе можем отнести к сопряжениям с фиксированным направлением относительно направления сближения деталей. Трение осуществляется при возвратно-поступательном скольжении втулки 2 по оси 1 (деталь 2 по детали 1). На рисунке 1 представлена схема сопряжения узла трения ось-втулка [2].

Зададимся известными параметрами системы, характеризующей начальное состояние, т.е. вариатор работал незначительное время или еще не эксплуатировался. В расчете принимаем следующие допущения, детали абсолютно жесткие, нагрузка распределена равномерно по поверхности контакта, путь трения (l), пройденный точками поверхности контакта детали, одинаков для

всех точек ($l_2 \gg l_1$). l_1 – длина изнашивания детали 1, l_2 – длина изнашивания детали 2. Требуется определить износ деталей 1, 2 в любой момент времени и ресурс сопряжения, если предельное состояние задано предельной величиной сближения базовых поверхностей [S].

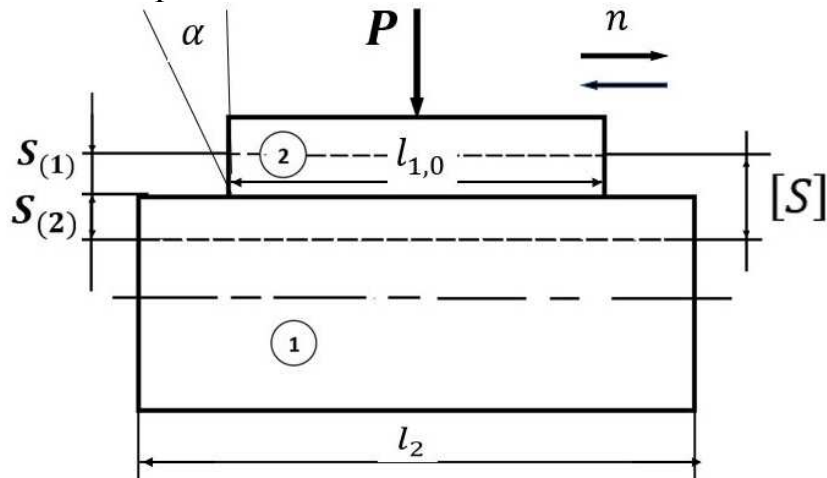


Рис. 1. Схема сопряжения узла трения ось-втулка

Начальные параметры трибосистемы полагают известными: α – угол контактирования, $l_{1,0}$ – длина, пройденного пути трения детали 1, b – ширина сопряжения; режим работы P – нагрузка, n – число взаимодействий в единицу времени, l_2 – длина изнашивания детали 2. Изначально, при неработающей системе $S_{(1)} = 0, S_{(2)} = 0$. $S_{(1)}$ – износ детали 1, $S_{(2)}$ – износ детали 2. Параметры, характеризующие износостойкие свойства материалов: $I_{(1)} = I_{(1)}(p)$, $I_{(2)} = I_{(2)}(p)$. $I_{(1)}$, $I_{(2)}$ – интенсивность изнашивания детали 1 и 2 в зависимости от нагрузки.

Согласно схеме на рисунке 1.

$$l_1 = l_{1,0} + 2S_{(1)}tg\alpha.$$

Обобщенный вектор изменения состояния системы выражается следующим образом:

$$\bar{\lambda} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{dS_{(1)}}{dt} \\ \frac{dS_{(2)}}{dt} \\ \frac{dP}{dt} \end{array} \right\}.$$

Процесс изменения состояния системы описывается системой уравнений [3]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_{(1)}}{dt} = I_{(1)}v_{(1)} = I(P)2nl_2, \\ \frac{dS_{(2)}}{dt} = I_{(2)}v_{(2)} = I(P)2nl_1, \\ \frac{dP}{dt} = \frac{P}{b(l_{1,0} + 2S_{(1)}tg\alpha)}, \end{array} \right.$$

$v_{(1)}$, $v_{(2)}$ – скорость интенсивности изнашивания детали 1 и 2.

При $I_{(1)} = A_1 P$; $I_{(2)} = A_2 P$; где A_1 , A_2 – площадь контакта деталей 1 и 2,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_{(1)}}{dt} = \frac{A_1 P 2 n l_2}{b(l_{1,0} + 2S_{(1)} \operatorname{tg} \alpha)}, \\ \frac{dS_{(2)}}{dt} = \frac{A_2 P 2 n}{b}. \end{array} \right.$$

Обозначив

$$c_1 = \frac{A_1 P 2 n}{b 2 \operatorname{tg} \alpha} \frac{l_2}{l_2}; \quad c_2 = \frac{l_{1,0}}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad c_3 = \frac{A_2 P 2 n}{b},$$

подставив c_1, c_2, c_3 , получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_{(1)}}{dt} = \frac{c_1}{c_2 + S_{(1)}}, \\ \frac{dS_{(2)}}{dt} = c_3. \end{array} \right.$$

В этом случае износ детали 2 – втулка, в любой момент времени определяется выражением

$$S_{(2)} = \int_0^t c_3 dt = c_3 t.$$

Износ детали 1 – оси

$$S_{(1)} = -c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - 2(c_1 t)}.$$

Точность решения задач изнашивания зависит от количества учитываемых взаимосвязанных процессов, протекающих при работе узла трения ось-втулка в шкивах клиноременных вариаторов. Необходимо учитывать процессы относительного движения и взаимодействия деталей, кинематику и динамику узла, формоизменение деталей при изнашивании, что влияет на работу машины (вариатора) в целом.

Список литературы

1. Пронин Б.А., Ревков Г.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы). – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.
2. Лукьянов А.С. Методы выбора и оценки характеристик вариатора транспортного средства: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2001. – 141 с.
3. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

Сведения об авторах:

Лукьянов Александр Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»;

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

Дмитриев Никита Андреевич – аспирант.

МЕХАНИКА ПРОТЕКТОРА ШИН

Стариков А.Н.

Владимирский государственный университет, Владимир

Ключевые слова: колесо, протектор, зацепление, самоторможение, клиновая пара, механизм, наклонная плоскость.

Аннотация. В работе рассмотрен принцип работы клиновых протекторов колёсной техники с позиций улучшения проходимости и торможения. Показаны основные виды рисунка протектора, области применения, ориентации при установке в колесо. Показаны разные схемы работы для режимов сцепления и пробуксовывания. Приведены схемы кинематических и силовых связей для обоих состояний. Дано описание качественной сцепки с позиций самоторможения. Предложены новые критерии по характеристике сцепных свойств автомобильных колёс с грунтом. Рассмотрены практические примеры авто, мото, вело техники.

TIRE TREAD MECHANICS

Starikov A.N.

Vladimir State University, Vladimir

Keywords: wheel, tread, engagement, self-braking, wedge pair, mechanism, inclined plane.

Abstract. The paper considers the principle of operation of wedge treads of wheeled vehicles from the standpoint of improving cross-country ability and braking. The main types of tread pattern, application areas, orientation when installed in the wheel are shown. Different operating schemes for clutch and slip modes are shown. The schemes of kinematic and force connections for both states are given. A description of the high-quality coupling from the position of self-braking is given. New criteria for the characteristics of the coupling properties of automobile wheels with soil are proposed. Practical examples of cars, motorcycles, and bicycle equipment are considered.

Современные покрышки колёс являются сложными технологическими изделиями. Протекторы шин должны соответствовать многим требованиям, порой взаимоисключающим друг друга, – бесшумность, износостойкость, мягкость, водоотведение, управляемость и др. К рассмотрению берётся один из ключевых параметров, – проходимость.

Механизм передачи движения строится на условии отсутствия взаимного проскальзывания его звеньев: *колесо-земля* (снег). По сути, ставится задача создания геометрии рисунка с самоторможением как в одну сторону движения колеса – проходимость, так и в другую, – торможение.

Вопросы самоторможения простых механизмов рассмотрены в работах как классиков, например, Р. Гука, Ж.О. Кулона [1, 2], так и современников, например В.Л. Вейца [3]. Однако, подходы В.И. Арнольда в [4], «новое видение и математическое понимание природы», – указывают на актуальность данного направления исследований.

Рассматривается модель формы и рисунка протектора, без дополнительных конструктивных элементов: шипов, цепей, мягких ламелей. Факторами для анти пробуксовки или самоторможения здесь выступают: глубина (высота) и угол расположения (рисунок) протектора.

На рисунке 1 представлены различные «рисунки» протектора шин повышенной проходимости. Все они имеют своей целью создать «сцепляемость» с дорогой. Это обеспечивается наклонными элементами, которые, по своей сути, вклиниваются в грунт. При этом, даже если грунт расходитя в стороны, колесо вклинивается ещё глубже и цепляется ещё сильнее, обеспечивая в итоге самоторможение в паре *колесо-грунт*.



Рис. 1. Протекторы шин: а) для грунта; б) зимние; в) для тракторов

Эффективность работы «клина» однонаправленная. Поэтому если требуется проходимость, то клиновые поверхности направлены в сторону вращения колеса (именно так и указывают инструкции и указатели на шине колеса автомобиля). Если нужно улучшенное торможение, то в обратную сторону. Иногда имеет место некоторое соотношение этих требования, например 70 на 30, или 90 на 10. Условию равного свойства *проходимость-торможение*, – 50 на 50 – соответствуют ромбы и их вариации в рисунке протектора.

Из опыта практического применения известно, что лучшей для проходимости по бездорожью является схема протектора колёсного трактора (рис. 1, в). Соотношение *проходимость-торможение* по критерию геометрии рисунка здесь 100 к 0. И именно проходимость для трактора (а не торможение!) – важнейшее из его свойств.

Клин протектора состоит из двух симметричных рёбер, как у *шевронных* шестерён. Направление движения клина протектора осуществляется таким образом, чтобы грунт раздвигается в стороны от направления движения колеса, а не внутрь. Данные покрышки однонаправленного движения.

По своей сути работа такого протектора есть аналог клинового механизма, с той разницей, что здесь требуется не обеспечить эффективность передачи движения, а исключить движение на прямом ходе, – раздвижение грунта.

Вопрос оптимальности угла наклона многофакторный и не имеет однозначного ответа. Тут важен учёт плотности, рыхлости и податливости грунта (снега), давления в шине, температуры, обледенелости, и др. Так, например, фирма «Denray Tire» (<http://denraytire.com/products/agriculture-tires/23-tread-design/>) выступает за вариант 23° (относительно оси вращения). В классическом варианте, применяемом на тракторах (рис. 1, в) угол клина составляет 45°.

Рисунки зимней резины делают с переменными углами клина, с набором отдельных клиновых поверхностей и разделяющимися линиями, с дроблением на отдельные ламели, и др.

На рисунке 2 показаны силовые взаимодействия и кинематика. Вариант на рисунке 2, а соответствует состоянию, когда условие самоторможения выполняется. Ламели колеса расклинивают грунт и останавливаются относительно него. Вариант на рисунке 2, б – схема проскальзывания грунта по рёбрам протектора.

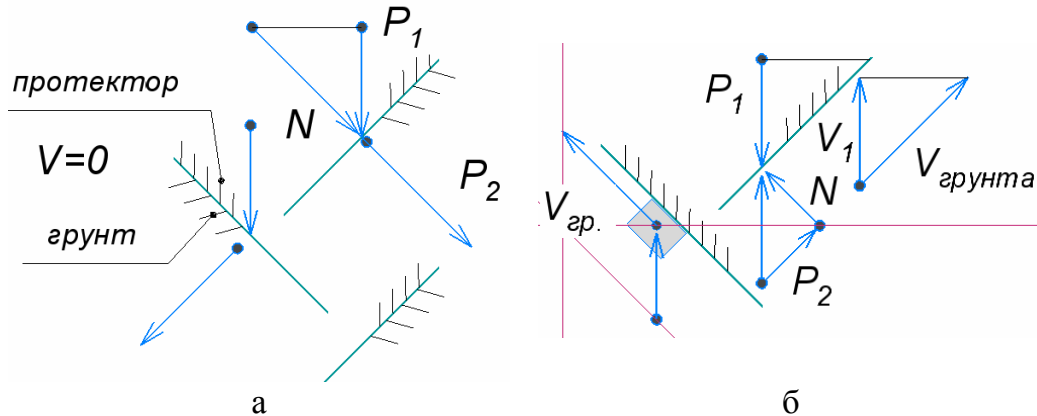


Рис. 2. Схема работы протектора шин: а) самоторможение; б) пробуксовывание

Если угол протектора является «острым», – более 45° относительно оси вращения колеса), *клиновая пара* является редуктором и разжимающее грунт усилие (выходная сила) становится больше касательной силы от момента вращения колеса. Но, с другой стороны, кинематика при редукции замедляет разжимную скорость и это даёт более мягкое, без резких толчков воздействие на грунт. Дополнительно здесь учувствует податливость пневматических шин. Известно, что колёса с ослабленным давлением имеют лучшую проходимость. Это обусловлено большим пятном контакта и плавностью зацепления.

Таким образом, моделируя угол наклона протектора (его элементов) шин, можно проектировать и определять оптимальную его величину для выполнения условия самоторможения. Что обеспечит лучшую сцепляемость с грунтом, и как следствие проходимость и манёвренность автомобиля, либо торможение.

Примером шин с клиновым эффектом являются зимние однонаправленные по вращению покрышки. Их положено устанавливать, как показано на рисунке 3. Для этого имеются специальные метки (стрелки) на боковой поверхности шины. «Стрелки» и «клинья» должны быть направлены в сторону вращения колеса, – для все четырех колес. Для полноприводных автомобилей это можно считать верным, так как это выигрышно влияет на проходимость (и на водоотведение, но в данном примере рассматривается только вопрос проходимости и торможения). Однако такая установка колёс снижает эффективность торможения, так как в этом случае отсутствует эффект вклинивания в грунт (как если бы трактору поставить ведущие колёса клином в обратную сторону, – не в сторону вращения – как бы упала его проходимость?).

Для переднеприводных автомобилей шины на задней оси выгодней ставить наоборот по отношению к рисунку 3, т.е. клином протектора в сторону, обратную вращению. Практически нужно поменять левое и правое колёса на задней оси.

Это улучшит эффективность торможения задних неведущих колёс и как следствие повысится курсовая устойчивость и анти занос.

Для заднеприводных авто ситуация выглядит аналогично. Нужно поменять передние колёса местами.



Рис. 3. Ориентация протектора зимних шин (перёд, зад)

На практике существуют примеры, в которых действительно направление протектора у переднего и заднего колеса имеет разное направление «клина». У мотоциклов (и у весьма именитых брэндов) клин ведущего (заднего) колеса направлен в сторону его вращения, – для лучшей сцепляемости при разгоне, а переднее колесо имеет направление клина в обратную сторону, – для лучшего торможения (рис. 4-6). Известно, что мотоциклы тормозят в основном передним колесом, и часто в наклонном положении. Поэтому требования по эффективности торможения здесь повышенные.

Даже с учётом аквапланирования такое направление переднего протектора полагается более выгодным (рис. 6).



Рис. 4. Схема протекторов спортивного мотоцикла



Рис. 5. Схема протектора на дрифтовых мотоциклах



Рис. 6. Схема протекторов на мокром покрытии

На рисунке 7 показано, что для мотоциклов и велосипедов штатно указывается (причём весьма нечасто) два варианта установки направления клиньев протектора. Для заднего (*Rear*) и переднего (*Front*) колеса — в разные стороны. При этом полагается, что заднее — это ведущее колесо, а переднее — тормозящее. Для автомобильных колёс найти двунаправленную ориентацию колёс найти не удалось.

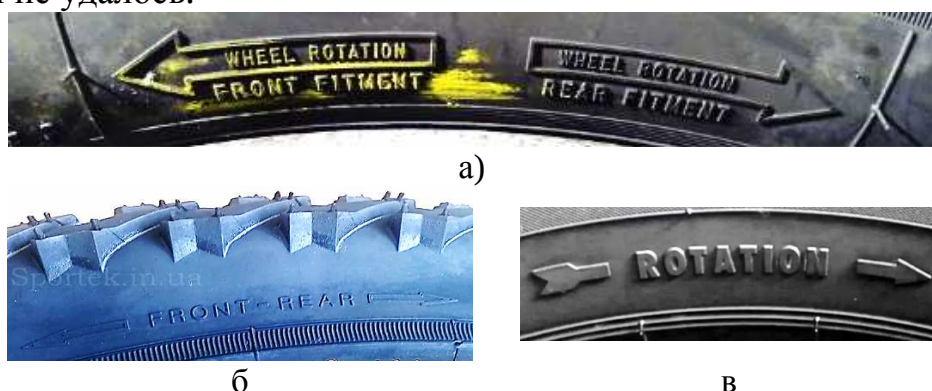


Рис. 7. Указание направления установки а) шина мотоцикла; б) велосипедная покрышка; в) автомобиля

Пример, когда оба колеса имеют «обратный клин», — для торможения, — в сторону, обратную вращению, представлен в маунтинбайках (скоростной спуск с горы по пересечённой местности) (рис. 8).



Рис. 8. Протекторы с усиленным торможением

Таким образом, геометрия рисунка протектора и направление клина для колёсной техники (автомобили, мотоциклы, велосипеды) определяется приоритетом требования: проходимость или торможение. Для ведущих колёс (для проходимости) требуется установка клина в сторону вращения колеса. Для лучшего торможения — в другую сторону.

Кроме того, перспективным может являться: указание соотношения направленности клиновых плоскостей, определение запаса по самоторможению по каждому из направлений, определение граничного значения коэффициента трения f для конкретного значения угла наклона профиля протектора α относительно оси вращения. Данные вопросы частично рассмотрены в работах [5, 6].

Сложность в применении для модели *проходимость-торможение* колеса будет состоять в определении адекватности данной модели, специфики факторов взаимодействия (лёд, вода, песок, асфальт, ...), определения реального значения (диапазона) коэффициента трения.

Необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Боголюбов А.Н. Роберт Гуг: 1635-1703. Забытый гений / Отв. ред. С.Н. Кожевников. – Изд. 2-е. – М.: Ленанд, 2017. – 240 с.
2. Coulomb C.A. Theorie des machines simples (en ay ont egard an froitement de leurs parties et a la roideur des cordages). – Paris, 1821. – 115 p.
3. Вейц В.Л., Гидаспов И.А., Царев Г.В. Динамика машинных агрегатов с самотормозящимися передачами. – Саранск: филиал Саратовского университета, 1989. – 193 с.
4. Арнольд В.И. Математическое понимание природы: Очерки удивительных физических явлений и их понимания математиками (с рисунками автора). – 3-е изд., стереотип. – М.: МЦНМО, 2011. – 144 с.
5. Патент №2730203 РФ. Способ механизма взаимодействия тел по плоскости узла затвора клиновой задвижки / А.Н. Стариков. – Заявка №2020111388 от 18.03.2020; опубл. 19.08.2020, Бюл. №23.
6. Стариков А.Н. Механизмы взаимодействия тел по плоскости // Вестник МГТУ им. Баумана Сер. Машиностроение. – 2020. – №2(131). – С. 128-145. – DOI: 10.18698/0236-3941 -2020-2-128-145.
7. Стариков А.Н. Механизмы, основанные на взаимодействии тел по плоскости // Теория механизмов и машин. – 2019. – Т. 1, №1. – С. 27-39.

Сведения об авторе:

Стариков Альберт Николаевич – к.т.н., доцент кафедры «Теплогазоснабжение вентиляция и гидравлика».

ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТИРУЮЩИЕ МАШИНЫ: ИХ ВИДЫ И ВЕДУЩИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ

Москвина Д.С., Кувшинкин С.Ю.

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

Ключевые слова: оборудование для открытых горных работ, выемочно-транспортирующая машина, бульдозер, скрепер, грейдер, автогрейдер.

Аннотация. Представлен обзор и систематизация основных типов выемочно-транспортирующих машин, которые являются необходимыми для эффективной работы в горнодобывающей промышленности и строительстве, их ключевые конструктивные особенности и области применения. Особо внимание уделено ведущим мировым и российским фирмам-производителям и тенденциям в разработке и производстве данного оборудования.

DREDGING AND TRANSPORTING MACHINES: THEIR TYPES AND LEADING MANUFACTURERS

Moskvina D.S., Kuvshinkin S.Yu.

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

Keywords: equipment for open-pit mining operations, excavating and transporting machines, bulldozers, scrapers, graders, motor graders.

Abstract. The review and systematization of the main types of excavating and transporting machines that are necessary for effective operation in the mining industry and construction, their key design features and applications are presented. Special attention is paid to the world's leading and Russian manufacturers and trends in the development and production of this equipment.

Выемочно-транспортирующие машины (ВТМ) играют важную роль в горнодобывающей промышленности, строительстве и других сферах, где требуется перемещение больших объемов материалов. Они позволяют механизировать выемку породы и повысить эффективность работы за счёт разрушения крепких слоев резанием.

Выемочно-транспортирующие машины представляют собой специализированные технические средства для отделения горной породы от массива и её транспортировки. В момент послойной разработки пород движение рабочего органа осуществляется перемещением всей машины [1, с. 154].

ВТМ можно разделить на два типа: ножевые (бульдозеры, рыхлители, грейдеры) и ковшовые (скреперы, одноковшовые фронтальные погрузчики) [1, с. 154]. Так как ВТМ, такие как бульдозеры, скреперы и грейдеры, специально разработаны для одновременной выемки породы и её перемещения, а рыхлители и погрузчики, напротив, предназначены для выполнения специализированных задач – разрыхление плотных грунтов и пород (рыхлители) и загрузка материала в транспортные средства или складирование в определенных местах (погрузчики), то последние исключены из дальнейшей классификации.

Наиболее широкую номенклатуру ВТМ для открытых горных и земляных работ выпускает компания Caterpillar, которая состоит из: колесных и гусеничных бульдозеров мощностью от 60 до 676 кВт и массой до 102 тонн, бульдозерно-рыхлительных агрегатов, самоходных скреперов 2-ух типоразмером с ковшами 33,6 и 38 м³ и семейств автогрейдеров эксплуатационной массой до 61,9 т и мощностью двигателя до 399 кВт.

ВТМ состоят из базовых тракторов, тягачей или специальных шасси и навесного, прицепного, полуприцепного рабочего оборудования. По рабочему оборудованию машины можно классифицировать следующим образом:

Бульдозеры. Бульдозер – это выемочно-транспортирующая машина, состоящая из базового трактора, оснащенного отвалом с ножом и системой управления отвалом. Процесс работы заключается в послойной срезке породы, её скапливании перед отвалом и последующем перемещении во время движения бульдозера. В ходе этого процесса осуществляется и разравнивание поверхности.

Бульдозеры предназначены для послойной разработки пород I-IV категории без предварительного рыхления и перемещения на расстояние не более 150 м, что обусловлено частичной потерей горной массы в результате высыпания по бокам отвала. Разработка скальных пород может осуществляться послойно после предварительного рыхления [1, с. 155].

По типу ходовой части бульдозеры подразделяют на: гусеничные и колесные. Отвалы можно разделить по типу конструкции: универсальные, наклонные и поворотные, а также по форме: сферические, полусферические и плоские. Помимо основного рабочего органа – отвала, на раму бульдозера могут быть навешены устройства для толкания скреперов, рыхлители и другое сменное оборудование, что значительно расширяет область применения бульдозеров.

Наибольшее число различных моделей бульдозеров производит японская компания Komatsu, 90% которых имеет гусеничную ходовую часть. Тенденция большей востребованности гусеничных бульдозеров обусловлена рядом преимуществ, таких как более высокая проходимость и устойчивость и низкое давление на почву.

В мире бульдозеры производят более 60-и компаний, однако на российском рынке представлена преимущественно продукция не более 15 из них, которая находит применение в горнодобывающей отрасли. Наиболее широкий ассортимент гусеничных бульдозеров предлагают такие производители, как: «Caterpillar», «Komatsu», «Промтрактор» (Четра), «Shantui», «Dressta», «Liebherr», «ЧТЗ-Уралтрак» [2].

Другие компании, специализирующиеся на выпуске бульдозерно-рыхлительных агрегатов, такие как «Mitsubishi», «New Holland», «Case» и другие, ограничиваются производством машин легкого и среднего классов.

Скреперы. Скрепер представляет собой выемочно-транспортирующую машину, предназначенную для послойного отделения породы I-IV категории от массива, её захвата, транспортировки и укладки в заданном месте. В условиях работы с плотными породами скреперы часто используются в комплексе с бульдозерами-толкачами и рыхлителями. Обычно самоходные однодвигательные

скреперы осуществляют транспортировку породы на расстояние не более 2-4 км, в то время как двухдвигательные модели способны преодолеть до 6 км [1, с. 155].

Основные компоненты скрепера включают ходовое оборудование, рабочее оборудование в виде ковша с ножом, а также механизмы управления ковшом и заслонкой [1, с. 199]. Движение скрепера может осуществляться с помощью одноосного или двухосного тягача либо собственных двигателей. В зависимости от конструкции, скреперы подразделяются на прицепные, полуприцепные и самоходные.

В конце прошлого века номенклатура отечественных скреперов включала по шесть моделей прицепных и самоходных машин. После распада СССР сократились объемы всех видов строительства. Это привело к прекращению производства скреперов. В конце 1990-х – начале 2000-х годов предпринимались попытки создать некоторые модели скреперов, но дальше изготовления макетных образцов дело не пошло. В настоящее время российское машиностроение не производит скреперного оборудования [3].

Производство скреперов сохранилось в Белоруссии на Могилёвском автозаводе. Предприятие производит единственную модель самоходного одномоторного скрепера с пассивным способом загрузки ковша МоА3-6014 грузоподъемностью 16 т.

Существенное сокращение производства скреперов, а точнее полное его прекращение произошло и среди ведущих зарубежных производителей Komatsu, Terex, Case Construction Equipment, Michigan, Hancoc.

В настоящее время самую широкую гамму самоходных скреперов производит компания Caterpillar. Её типоразмерный ряд включает всего две модели с вместимостью ковша («с шапкой») 33,6 и 38 м³.

Автогрейдеры. Автогрейдеры представляют собой специализированную технику, предназначенную для выполнения земляных работ при строительстве автомобильных дорог и других объектов. Они способны послойно разрабатывать породы I-IV категории, а также осуществлять эксплуатационное содержание дорог, включая очистку от снега и выравнивание грунта, профилирование земляного полотна, возведения насыпей высотой до 0,6 м, перемещения и разравнивания грунта, а также планировки площадок [1, с. 156].

В настоящее время прицепные грейдеры постепенно уступают место самоходным моделям (автогрейдером), что обусловлено их более высокой эффективностью и мобильностью [4].

Рабочий орган автогрейдера – отвал, устанавливается под углом в плане к оси машины и с подъемом к оси дороги, что позволяет ему срезать грунт и перемещать его к середине дорожного полотна. После выполнения определённого прохода, длина которого варьируется в пределах 200-1500 м в зависимости от профиля дороги и условий работы, автогрейдер перемещается на другую сторону дороги для разработки грунта в обратном направлении.

Современные модели автогрейдеров не ограничиваются выполнением чистовой планировки поверхностей и могут использоваться на всех этапах строительных работ – от точного распределения материалов по площадке до

чистой планировки на завершающей стадии проекта. Это способствует повышению рентабельности эксплуатации автогрейдеров.

Международный концерн CNH Industrial занимает значительную долю рынка грейдеров. Компания, являющаяся одним из мировых лидеров в производстве коммерческого транспорта, сельскохозяйственной техники и спецтехники, осуществляет поставки автогрейдеров под брендом Case на российский рынок на протяжении нескольких лет.

Производители автогрейдеров из США традиционно занимают лидирующие позиции среди импортеров данной техники в нашу страну. В прошлом году их доля в общем объеме импортных поставок составила около 40%. Компания Caterpillar Inc. предлагает наиболее широкий ассортимент грейдеров.

Наибольший вклад в насыщение рынка российской техникой внесли завод «Брянский арсенал» и компания «Челябинские строительно-дорожные машины», входящие в состав компании «РМ-Терекс», которая является частью концерна «Русские Машины» [4].

Таким образом, выемочно-транспортирующие машины являются неотъемлемой частью горнодобывающей промышленности. В ходе обзора были рассмотрены различные виды машин, каждая из которых обладает своими уникальными характеристиками. Современное состояние рынка ВТМ демонстрирует устойчивый рост, производители продолжают совершенствовать свою продукцию, внедряя новые технологии и отказываясь от устаревших и малоэффективных, которыми на сегодняшний день считаются и скреперы.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: Учебное пособие. В 2 т. Т. 2. – 4-е изд., стер. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 2001. – 332 с.
2. Луняшин П.Д. Бульдозеры изменяют мир, Часть 1 // Золотодобыча [Электронный ресурс]. – URL: <https://zolotodb.ru/article/11351>.
3. Ковригин В. Редущие ряды. Мировое производство скреперов // Основные средства [Электронный ресурс]. – URL: <https://os1.ru/article/6980-mirovloe-proizvodstvo-skreperov-redeyushchie-ryady>.
4. Шляховой В. Автогрейдеры: вчера, сегодня и всегда // Основные средства [Электронный ресурс]. – URL: <https://os1.ru/article/19351-avtogreydery-vchera-segodnya-i-vsegda-ch-1-noveyshie-usovershenstvovaniya-i-tendentsii-v-konstruktsii-avtogreyderov>.

Сведения об авторах:

Москвина Даяна Сергеевна – студент.

Кувшинкин Сергей Юрьевич – научный руководитель, к.т.н., доцент, доцент кафедры машиностроения.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОЙ ТЕХНИКИ В МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ОБЛАСТЯХ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Туманян Х.А.

*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина, Москва*

Ключевые слова: междисциплинарное исследование, эжектор, сопловой аппарат, вектор тяги, компьютерное моделирование.

Аннотация. В лабораториях РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина развернуты научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы для решения одной из наиболее актуальных задач – повышение эффективности процесса при формировании потока текучей среды с расширением возможностей для управления параметрами этого потока. Разработана принципиальная схема для перспективной струйной установки. Созданы трехмерные модели с использованием CAD-системы и выполнено компьютерное моделирование. Расчетами (CFD) подтверждена работоспособность эжектора-имитатора при управлении вектором тяги с поворотом на угол 90° и с поворотом на угол 180° . С использованием аддитивных технологий изготовлены физические микромодели, позволяющие проводить имитационное моделирование в лабораторных условиях. Раскрыты новые возможности для экстремального управления вектором тяги, в пределах полной геометрической сферы. Результаты исследований могут быть использованы в энергетике и в области беспилотных аппаратов различного назначения.

RESEARCH OF JET TECHNOLOGY IN INTERDISCIPLINARY FIELDS BY MEANS OF COMPUTER MODELING

Tumanyan Kh.A.

Gubkin University of Oil and Gas, Moscow

Keywords: interdisciplinary research, ejector, nozzle unit, thrust vector, computer modeling.

Abstract. In the laboratories of the Gubkin University, research and development work has been launched to solve one of the most pressing problems – increasing the efficiency of the process of forming a fluid flow with expanding the possibilities for controlling the parameters of this flow. A basic diagram for a promising jet installation has been developed. A version of the basic diagram for a promising jet installation has been developed. Three-dimensional models have been created using a CAD system and computer modeling has been performed. Calculations (CFD) have confirmed the operability of the ejector-simulator when controlling the thrust vector with a rotation of 90° and with a rotation of 180° . Using additive technologies, physical micromodels have been manufactured, allowing for simulation modeling in laboratory conditions. New possibilities for extreme thrust vector control within a full geometric sphere have been revealed. The research results can be used in energy and in the field of unmanned vehicles for various purposes.

В настоящее время в аэрокосмической и энергетической инженерии видны многочисленные значительные междисциплинарные технологические достижения [1]. Главная цель проводимых междисциплинарных исследований заключается в поиске методов для компьютеризированного решения инновационных изобретательских задач в рамках обучения людей, и в перспективе для решения инновационных научных и практических задач в

рамках обучения и активного использования искусственного интеллекта. Для проведения исследований используется междисциплинарный подход [2], в сочетании с имитационным моделированием.

В технологиях преобразования энергии наиболее перспективными являются эжекторы, оснащенные регулируемыми соплами. Продолжают разрабатывать варианты единой теории, обобщающей результаты изучения процессов в эжекторах [3]. За последние три года сформировалось новое направление [4, 5] для проведения научных исследований в области струйной техники (в целом) и в области эжекторов (в частности). Это направление связано с раскрытыми новыми возможностями для экстремального управления вектором тяги, в пределах полной геометрической сферы (при этом диапазон изменения угла поворота для вектора тяги составляет $\pm 180^\circ$ в любом направлении). Здесь просматриваются перспективы для появления патентоспособных инновационных решений в области генерации и распределения энергии (в целом) и в области маневренных беспилотных аппаратов (в частности).

В лабораториях РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина выполняется серия научно-исследовательских работ, на основе накопленного научного задела разработан вариант принципиальной схемы, в рамках исследования перспективных струйных установок. Вариант схемы представлен на рисунке 1. В отмеченный научный задел вошли технические решения по патентам на изобретения РФ (№2781455, №2802351) и по патентам на полезные модели РФ (№214452, №209663, №203833, №192513).

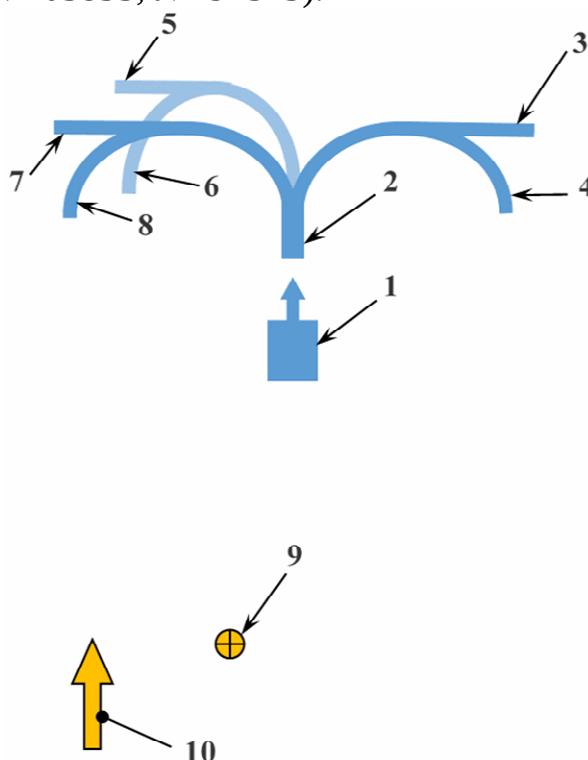


Рис. 1. Принципиальная схема струйной установки: 1 – управляемый сопловой аппарат; 2 – вход в многопоточную камеру смешения; 3-8 выходы из многопоточной камеры смешения; 9 – характерная точка (центр масс); 10 – вектор внешней силы [6]

Вариант струйной установки (рисунок 1) следует рассматривать в привязке к трехмерному пространству, и этот вариант частично соответствует той модели,

которая была представлена в патенте РФ №214452. Каналы 4, 6 и 8, в данном примере направляют потоки преимущественно вдоль цилиндрической поверхности. Каналы 3, 5 и 7, в данном примере направляют потоки преимущественно вдоль одной плоской поверхности. Через вход 2 в камеру смешения может поступать среда из окружающего пространства. В данном случае предусмотрено несколько основных режимов работы:

- 1) поток рабочей среды из управляемого соплового аппарата 1 может быть распределен (равномерно или неравномерно) по всем выходным каналам 3-8;
- 2) поток рабочей среды из управляемого соплового аппарата 1 может быть распределен (равномерно или неравномерно) только по выходным каналам 3, 5 и 7;
- 3) поток рабочей среды из управляемого соплового аппарата 1 может быть распределен (равномерно или неравномерно) только по выходным каналам 4, 6 и 8;
- 4) поток рабочей среды из соплового аппарата 1 может быть направлен в один из выходных каналов 3-8.

Внешняя сила 10 может воздействовать на элементы струйного аппарата. Характерная точка 9 может занимать различные положения относительно струйного аппарата, с учетом решаемой технической задачи. Для подвижного струйного аппарата в качестве характерной точки 9 может быть выбран центр массы изделия в целом, с учетом решаемой технической задачи. При использовании вращающихся элементов в качестве характерной точки 9 может быть выбрана точка на оси вращения. Можно предположить, что подобная струйная установка может быть использована при решении широкого круга практических задач.

Разработанная схема (рис. 1) также может быть использована в стационарных условиях для распределения потоков газа или жидкости, в различных отраслях производства. К примеру, рассматриваются струйные энергетические системы для задач, решаемых при разработке нефтяных и газовых месторождений.

В рамках патентования новых технических решений, проводится компьютерное моделирование с целью подтверждения работоспособности разрабатываемой конструкции и её отдельных элементов. Более подробные расчеты и решение оптимизационных задач планируется проводить позже – на этапе разработки эскизного проекта. Для проведения компьютерного моделирования и расчетного исследования (CFD) был использован программный пакет Flow Simulation. Создание 3D-модели осуществлялось с использованием CAD-системы SolidWorks. Расчетами подтверждена работоспособность эжектора при управлении вектором тяги в примере с поворотом на угол 90° и с поворотом на угол 180° [6].

Таким образом, результатами имитационного компьютерного моделирования подтверждена возможность использования эжектора с двумя криволинейными камерами смешения для создания струйных установок, подобных той, что представлена на принципиальной схеме по рисунку 1.

С использованием аддитивных технологий изготовлены физические микромодели, позволяющие проводить имитационное моделирование струйной установки в лабораторных условиях. Микромодель представлена на рисунке 2.

Для более наглядной визуализации рабочего процесса были проведены гидравлические испытания изготовленной микромоделли. Здесь же отметим, что аналогичные результаты были получены и в ходе пневматических испытаний [6].

Выполненное имитационное компьютерное моделирование, в сочетании с имитационным физическим моделированием, показывает то, что принципиальная схема по рисунку 1 может быть взята за основу для продолжения и развития научных и конструкторских работ.



Рис. 2. Результаты гидравлических испытаний физической микромоделли струйной установки [6]

Раскрыты новые возможности для экстремального управления вектором тяги, в пределах полной геометрической сферы (при этом диапазон изменения угла поворота для вектора тяги составляет $\pm 180^\circ$ в любом направлении в рамках полной геометрической сферы). Результаты исследований могут быть использованы в энергетике и в области беспилотных аппаратов различного назначения. Подразумевается рассмотрение все более сложных систем, в том числе с использованием искусственного интеллекта и решением инновационных (изобретательских) задач.

Финансирование. Работы проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках государственного задания в сфере научной деятельности, номер темы FSZE-2023-0004.

Список литературы

1. Svorcan J., Andrić J., Čantrak Đ., Ivanov T. Special Collection on advanced practices in aerospace and energy engineering // *Advances in Mechanical Engineering*. 2022, vol. 14(10). DOI: 10.1177/16878132221125578.
2. Сазонов Ю.А. Основы расчета и конструирования насосно-эжекторных установок. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. – 305 с.
3. Lysak I.A., Lysak G.V., Konyukhov V.Y., Stupina A.A., Gozbenko V.E., Yamshchikov A.S. Efficiency Optimization of an Annular-Nozzle Air Ejector under the Influence of Structural and Operating Parameters // *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 3039.
4. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Frankov M.A., Balaka N.N. Development and Prototyping of Jet Systems for Advanced Turbomachinery with Mesh Rotor // *Emerging Science Journal*. 2021, vol. 5, no 5, pp. 775-801. DOI: 10.28991/esj-2021-01311.
5. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Frankov M.A., Balaka N.N. Designing Mesh Turbomachinery with the Development of Euler's Ideas and Investigating Flow Distribution Characteristics // *Civil Engineering Journal (C.E.J)*. 2022, vol. 8, no. 11, pp. 2598-2627. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-11-017.
6. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Bondarenko A.V., Voronova V.V., Tumanyan Kh.A., Konyushkov E.I. Interdisciplinary studies of jet systems using Euler methodology and computational fluid dynamics technologies // *HighTech and Innovation Journal*. 2023, vol. 4, no. 4, pp. 703-719. doi.org/10.28991/HIJ-2023-04-04-01.

Сведения об авторе:

Туманян Хорен Артурович – младший научный сотрудник НИИ физики горных пород.

ПОПАРНАЯ ГРУППИРОВКА ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Коровкин Н.В.¹, Железняк В.Н.², Бекузин В.И.²

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;*

²*АО «Силовые машины», Санкт-Петербург*

Ключевые слова: целевая функция, электрическая машина, фронт Парето, генетические алгоритмы, оптимизация, попарная группировка.

Аннотация. В данной работе представлен метод попарной группировки целевых функций. Его использование совместно с методом сужения множества Парето на основе взаимозависимой информации с использованием нелинейных функций позволило быстро и математически точно сузить область Парето при решении задач многокритериальной оптимизации электрических машин.

PAIRWISE GROUPING OF OBJECTIVE FUNCTIONS FOR SOLVING PROBLEMS OF MULTICRITERIAL OPTIMIZATION OF ELECTRICAL MACHINES

Korovkin N.V.¹, Zheleznyak V.N.², Bekuzin V.I.²

¹*Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnical University,*

²*Power Machines group, Saint-Petersburg*

Keywords: objective function, electric machine, Pareto front, genetic algorithms, optimization, pairwise grouping.

Abstract. This paper presents a method of pairwise grouping of objective functions. Its use together with the method of narrowing the Pareto set based on interdependent information using nonlinear functions allowed us to quickly and mathematically accurately narrow the Pareto region when solving problems of multicriterial optimization of electrical machines.

Процесс проектирования электрической машины – весьма сложная и многогранная задача, требующая внимания как к техническим аспектам выбора и применения алгоритма проектирования, так и к концептуальному обоснованию, включающему формулирование целей и критериев проектирования [1]. Этот процесс подразумевает необходимость учета множества факторов, взаимодействующих между собой, а также выработку решений, соответствующих одновременно нескольким целям. При этом неизбежно необходимо учитывать компромисс между различными, зачастую конфликтующими, целями. Особое значение приобретает оптимизационный подход к проектированию, позволяющий добиться сбалансированного решения. В данной статье основное внимание уделено применению генетического алгоритма (ГА) ввиду его высокой универсальности и способности эффективно решать многокритериальные задачи. Применение ГА позволяет реализовать комплексный подход к решению задачи проектирования электрических машин, обеспечивая учет широкого спектра факторов [2].

Важная подзадача многокритериальной оптимизации – построение фронта Парето, позволяющего определить набор решений, наиболее эффективных с точки зрения достижения нескольких целевых функций (ЦФ). В случаях, когда число ЦФ ограничивается двумя или тремя, построение фронта Парето является относительно простой задачей, и его визуализация не вызывает существенных трудностей. По мере увеличения числа ЦФ до 4 и более возникают проблемы, связанные с интерпретацией и представлением результатов в удобной форме.

Для решения этой проблемы предлагается метод попарной группировки ЦФ, позволяющий упростить анализ и визуализацию многомерного фронта Парето. Например, при наличии 3 ЦФ возможно формирование 3 попарных групп, две из которых могут образовывать фронт Парето, в то время как третья не обладает таким свойством. В случае 4 и более целевых функций количество возможных пар значительно возрастает: для 4 ЦФ формируется 6 пар, из которых 4 или 3 пары могут образовывать фронт Парето, а оставшиеся характеризуются линейной зависимостью и не входят в данный фронт. Этот подход демонстрирует свою эффективность при обработке большого числа целевых функций. Попарная группировка способствует выявлению зависимостей и взаимосвязей между функциями. В таблице 1 представлена структура попарной группировки для различных количеств ЦФ: 2, 4 и 6. При идеальном соотношении пар ЦФ максимальное количество пар образуют Фронт Парето, а минимальное количество пар – не образуют Фронт Парето.

Табл. 1. Попарная группировка целевых функций (ЦФ)

Количество ЦФ	Количество пар ЦФ	Количество возможных пар	
		не образуют фронт Парето	образуют фронт Парето
2	1	0	1
4	6	2,3	4,3
6	15	4,5,6,7,8	11,10,9,8,7

Для дальнейшего сужения множества Парето необходимо выбрать главную оптимизационную пару, образующую фронт Парето, а затем произвести разбивку ЦФ на две группы. Первая группа состоит из ЦФ, которые необходимо минимизировать, а вторая – из ЦФ, которые можно увеличивать для уменьшения значений ЦФ первой группы.

Условия разбивки ЦФ на группы: главная оптимизационная пара образует фронт Парето; ЦФ главной оптимизационной пары – в разных группах; ЦФ одной группы образуют фронт Парето; ЦФ главной оптимизационной пары не образуют фронт Парето с ЦФ других групп; ЦФ (кроме главной оптимизационной пары) могут образовывать, а могут и не образовывать фронт Парето с ЦФ другой группы.

Для нахождения оптимальных параметров электрической машины используется теорема Сужения множества Парето на основе взаимозависимой информации [3], то есть решается задача многокритериального выбора с введением двух групп взаимозависимых критериев, при этом первая важнее второй, а вторая важнее первой.

Для демонстрации работы данных методов был произведен оптимизационный расчет асинхронного генератора (АГ). На рисунке 1 показаны полученные функции потерь от массы активной части. Из проведенного расчета следует, что АГ может иметь множество вариантов исполнения: с различными вариантами габаритных размеров активной части, количеством пазов статора и ротора, геометрией пазов статора и ротора и т.д. В результате работы было получено 180 рабочих вариантов конструкции АГ, среди них были выбраны 3 оптимальные, которые по своим параметрам и характеристикам существенно превосходят референсный АГ, выделено маркером (1; 1).

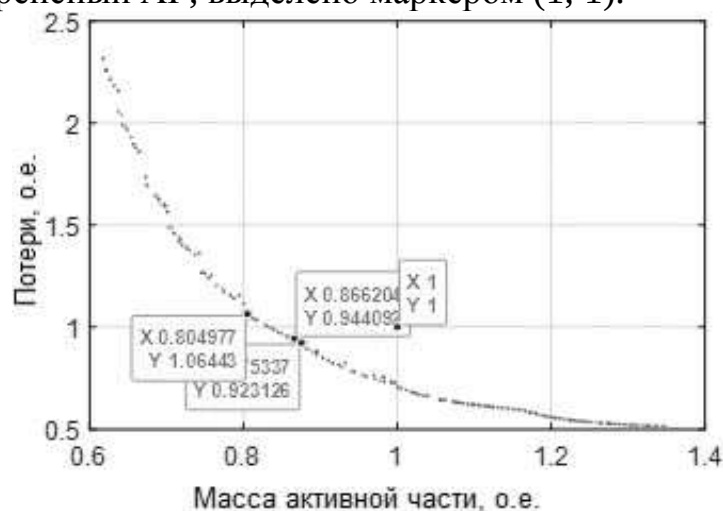


Рис. 1. Функции магнитной индукции в воздушном зазоре и внутреннего диаметра статора от активной длины АГ

Таким образом, проделанная работа показала, что с помощью представленных методов решена задача многокритериальной оптимизации асинхронного генератора. Кроме того, использование предлагаемого подхода по попарной группировки ЦФ позволяет не только упростить построение фронта Парето, но и выявить ключевые зависимости, что, в свою очередь, способствует улучшению процесса принятия решений.

Список литературы

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Т. 1. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.
2. Kwon M.-S., Lim D.-K. A Study on the Optimal Design of PMA-SynRM for Electric Vehicles Combining Random Forest and Genetic Algorithm // IEEE Access. 2023, vol. 11, pp. 52357-52369. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3279126.
3. Климова О.Н. Сужение множества Парето на основе взаимозависимой информации с использованием нелинейных функций // Экономика. Информатика. – 2009. – №9(64). – С. 152-159.

Сведения об авторах:

Коровкин Николай Владимирович – д.т.н., профессор Высшей школы высоковольтной энергетики;

Железняк Владимир Николаевич – начальник отдела расчетов СКБ ПТ;

Бекузин Владимир Игоревич – главный специалист.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИПЛИКАТОРА

Новоженин А.Ю.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Ключевые слова: зубчатое зацепление, мультипликатор, остаточный ресурс, метод конечных элементов, ANSYS.

Аннотация. В статье предложен способ прогнозирования остаточного ресурса зубчатой передачи мультипликатора турбодетандерного агрегата по твердости на поверхности зубьев в местах локальных концентраций напряжений. Для определения мест локальных концентраций напряжений проведен анализ методом конечных элементов в программной среде ANSYS и модуле Static Structural-Mechanical. В результате получены картины распределения эквивалентных напряжений на поверхностях ведомого колеса, контролируя которые можно составить прогноз наступления предельного состояния зубчатой передачи и скорректировать стратегию технического обслуживания.

FORECASTING THE RESIDUAL LIFE OF THE MULTIPLIER GEAR TRAIN

Novozhenin A.Yu.

Ufa University of Science and Technology, Ufa

Keywords: gearing, multiplier, remaining resource, finite element method, ANSYS.

Abstract. The article proposes a method for predicting the residual life of the gear train of the multiplier of a turbodetander unit by hardness on the surface of the teeth in places of local stress concentrations. To determine the locations of local stress concentrations, a finite element analysis was performed in the ANSYS software environment and the Static Structural-Mechanical module. As a result, patterns of the distribution of equivalent stresses on the surfaces of the driven wheel are obtained, controlling which it is possible to make a forecast of the onset of the limit state of the gear and adjust the maintenance strategy.

Введение. Природный газ является наиболее перспективным видом ископаемого топлива в связи со своими уникальными свойствами. Рост спроса на рынке полезных ископаемых увеличивается с каждым годом, а развитие технологий и промышленности позволяет модернизировать технологический и транспортный сегменты отрасли. Так, с появлением и развитием технологии сжижения природного газа значительно снизилась стоимость транспортировки и хранения продукции за счет снижения объема газа примерно в 600 раз. Появление сжиженного природного газа открыло новые рынки сбыта, что привело к росту спроса на продукцию в целом.

Технология сжижения природного газа состоит из нескольких этапов и подразумевает применение специального оборудования. Одним из важнейших этапов является сжатие газа до давления, требуемого для дальнейшей переработки. Сжатие производится при помощи компрессоров и турбодетандерных агрегатов, которые имеют возможность охлаждения газа за счет понижения давления, при этом выводя энергию за счет механической работы.

В состав турбодетандерного агрегата входит компрессор, ротор, электродвигатель и мультипликатор для обеспечения высокой частоты вращения вала компрессора. Мультипликатор применяется одноступенчатый и двуступенчатый, в зависимости от необходимого передаточного числа. В процессе эксплуатации зубчатые колеса мультипликатора испытывают значительные нагрузки, что может привести к выходу из строя всего механизма. Для обеспечения бесперебойной работы всей системы необходимо проводить работы на всех этапах, согласно регламенту, установленному производителем. Так, важными этапами является: монтаж оборудования, его подготовка и ввод в эксплуатацию, своевременный контроль состояния элементов системы, соответствующие обслуживание и ремонт.

Основная часть. В настоящее время на предприятиях при техническом обслуживании и ремонте в большинстве случаев применяется стратегия планово-предупредительных ремонтов согласно заранее созданному графику обслуживания. Основным недостатком этой стратегии является то, что в процессе обслуживания не учитывается реальное состояние элементов системы. Совершенствование подхода к системе технического обслуживания и ремонта позволит в долгосрочной перспективе сократить расходы предприятия, обеспечить бесперебойную работу технологической системы и повысить ее надежность. Одной из наиболее современных и прогрессивных стратегий является обслуживание техники по фактическому техническому состоянию (Condition-Based-Maintenance (CBM)). Основным критерием обслуживания здесь является действительное состояние элементов машины, их фактический физический износ, оценка и предупреждение факторов, влияющих на старение элементов системы. Достижение поставленных целей достигается путем диагностики фактического состояния элементов в момент работы, а также возможность прогнозирования проведения ремонтных работ или замены элемента на основе анализа изменения контролируемых параметров. Применение данной стратегии позволяет ремонтировать только те элементы системы, которые нуждаются в ремонте в конкретный отрезок времени.

Для прогнозирования остаточного ресурса зубчатой передачи мультипликатора необходимо учитывать параметры, оказывающее наибольшее влияние на процесс деградации. Высокие нагрузки на зубчатые передачи, возникающие при работе мультипликатора, приводят к поверхностному износу и усталостному контактному разрушению рабочих поверхностей зубьев, повышению изгибных напряжений зубьев [1].

Существуют исследования [2], обосновывающие связь повышения поверхностной твердости зубьев колес в местах локальных концентраций напряжений. Согласно проведенным исследованиям можно сделать вывод, что повышение твердости наблюдается на тех поверхностях, на которых возникают наибольшие напряжения. Механизм повышения твердости объясняется изменением прочностных свойств металла в результате искажения кристаллической решетки под воздействием пластических и упругих деформаций [3]. В процессе изнашивания перед разрушением материала наблюдается наибольший наклеп. При оценке изнашивания по энергетическим моделям износ

пропорционален нагрузке и обратно пропорционален твердости изнашиваемого материала [4-6].

Наиболее точную оценку ресурса зубчатой передачи можно получить в совокупности натурного подхода и определением физических процессов повреждений зубчатых колес, учитывающих напряженность работы.

Для определения локальных концентраций напряжений проведен анализ методом конечных элементов в программной среде ANSYS в модуле Static Structural-Mechanical. Анализ методом конечных элементов является математическим представлением физической системы, состоящей из детали и узла, в которой задается свойства материала и граничные условия. Число элементов исследуемой модели составило 371564. Минимальная длина стороны треугольника составляет 1,1 мм. Элементы имеют общие узловые точки, которые аппроксимируют форму области. Число узлов элементов, в которых рассчитываются напряжения, составляет 619742.

Ведущему колесу задан крутящий момент, полученный согласно расчетам для исследуемого мультипликатора – 37,44 кН·м. Согласно проведенному анализу методом конечных элементов получены картины распределения эквивалентных нагрузок по поверхностям зубьев колес. Ведомое колесо испытывает наиболее высокие эквивалентные напряжения при работе (рис. 1).

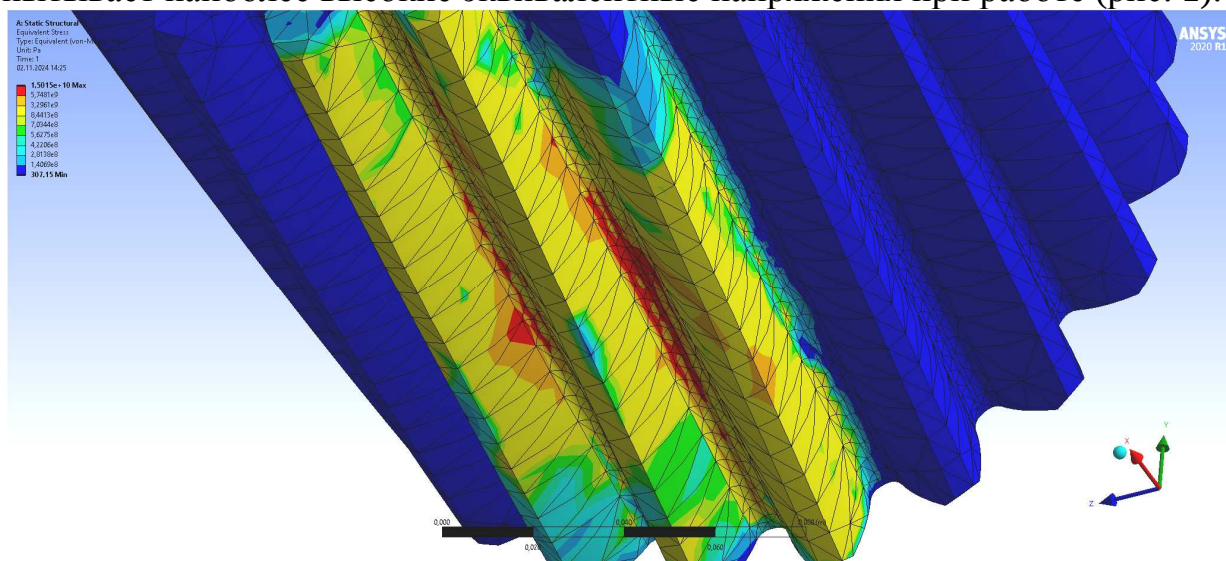


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений на ведомом колесе мультипликатора

Согласно полученным результатам можно сделать вывод о том, что в процессе эксплуатации мультипликатора турбодетандерного агрегата напряжение на поверхностях зубьев распределяется неоднородно. Локальные концентрации напряжений возникают у основания зубьев и на поверхности профиля.

Заключение. Построенная модель позволяет получить картину распределения напряжений, выявить поверхности, контролируя твердость которых, можно сделать вывод о состоянии зубчатой передачи в целом. Статистическая обработка результатов контроля твердости поверхности в местах локальных концентраций напряжений при проведении технического обслуживания позволит спрогнозировать наступление предельного состояния зубьев и скорректировать подход к техническому обслуживанию и ремонту в дальнейшем.

Список литературы

1. Chiu Y. The mechanism of bearing surface fatigue: experiments and theories // Tribology Transactions. 1997, vol. 40, pp. 658-666.
2. Глобин В.А., Пустовой А.А. Анализ прочности зубьев эвольвентных передач со смещением исходного контура // Машинопроизводство: Материалы 10-ой региональной научно-методической конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2008 – С. 14-16.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
4. Moder J., Grün F., Summer F., Gasperlmaier T., Andritschky M. Effect of temperature on wear and tribofilm formation in highly loaded DLC-steel line contacts // Tribol. Int. 2018, vol. 123, pp. 120-129.
5. Yang W., Tavner P.J., Crabtree C.J., Feng Y., Qiu Y. Wind turbine condition monitoring: Technical and commercial challenges // Wind Energy. 2014, vol. 17, pp. 673-693.
6. Yang Z., Baraldi P., Zio E. A novel method for maintenance record clustering and its application to a case study of maintenance optimization // Reliability Engineering & System Safety. 2020, vol. 203, pp. 103-107.

Сведения об авторе:

Новоженкин Алексей Юрьевич – магистрант.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СЕПАРАТОРА ЖИДКОЙ СМЕСИ, ВОСПРОИЗВОДИМОЙ ЭТАЛОНОМ РАСХОДА

Кудусов Д.И.

*Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал
Всероссийского научно-исследовательского института метрологии
им. Д.И. Менделеева, Казань*

Ключевые слова: нефтеводная смесь, сепаратор, коалесцирующие устройства, эталонная установка.

Аннотация. Объектом исследования работы является усовершенствованный способ сепарации нефтеводной смеси, циркулирующей в эталонной установке воспроизведения расхода газожидкостных смесей. Целью исследований являлось создание сепарационной установки, эффективно разделяющей водонефтяную смесь (вода + деароматизированный нефтяной растворитель Exxsol D100) до исходных компонентов в диапазоне воспроизведения массового расхода смеси от 0,01 до 300 т/ч, требуемых при разработке единичного экземпляра эталонной расходомерной установки в составе государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE LIQUID MIXTURE SEPARATOR, REPRODUCED BY THE FLOW STANDARD

Kudusov D.I.

VNIIR – Affiliated Branch of D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan

Keywords: oil-water mixture, separator, coalescing devices, reference installation.

Abstract. The object of the study is an improved method of separation of an oil-water mixture circulating in a reference installation for reproducing the flow rate of gas-liquid mixtures. The purpose of the research was to create a separation unit that effectively separates the oil-water mixture (water + dearomatized petroleum solvent Exxsol D100) to the initial components in the range of reproducing the mass flow rate of the mixture from 0,01 to 300 t/h required for the development of a single copy of the reference flow meter as part of the state primary special standard of the unit of mass flow of gas-liquid mixtures GET 195-2011.

Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 [1] был создан для обеспечения единства измерений в области измерений расхода многофазных потоков, в том числе с помощью многофазных расходомеров, при измерениях дебита углеводородных скважин. В процессе его применения возникла необходимость расширения диапазона воспроизведения расхода в сторону его увеличения до 300 т/ч жидкой нефтеводной смеси [2]. Кроме того, для снижения затрат и времени на создание заданного содержания компонентов в смеси, принято решение о их отдельной подаче в смеситель перед измерительным участком. Тем самым появилась задача разделения газожидкостной смеси до исходного состояния, представляющая значительную трудность при её максимальных расходах, особенно для жидкой фазы. Для создания сепаратора был проведен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований и испытаний на

натуральных средах в моделях и установках, выполненных в уменьшенном масштабе.

Сепаратор жидких компонентов предназначен для разделения жидких компонентов газожидкостной смеси, поступающей от центробежного газового сепаратора. Вид бака-сепаратора с условно снятой обечайкой показан на рисунке 1.

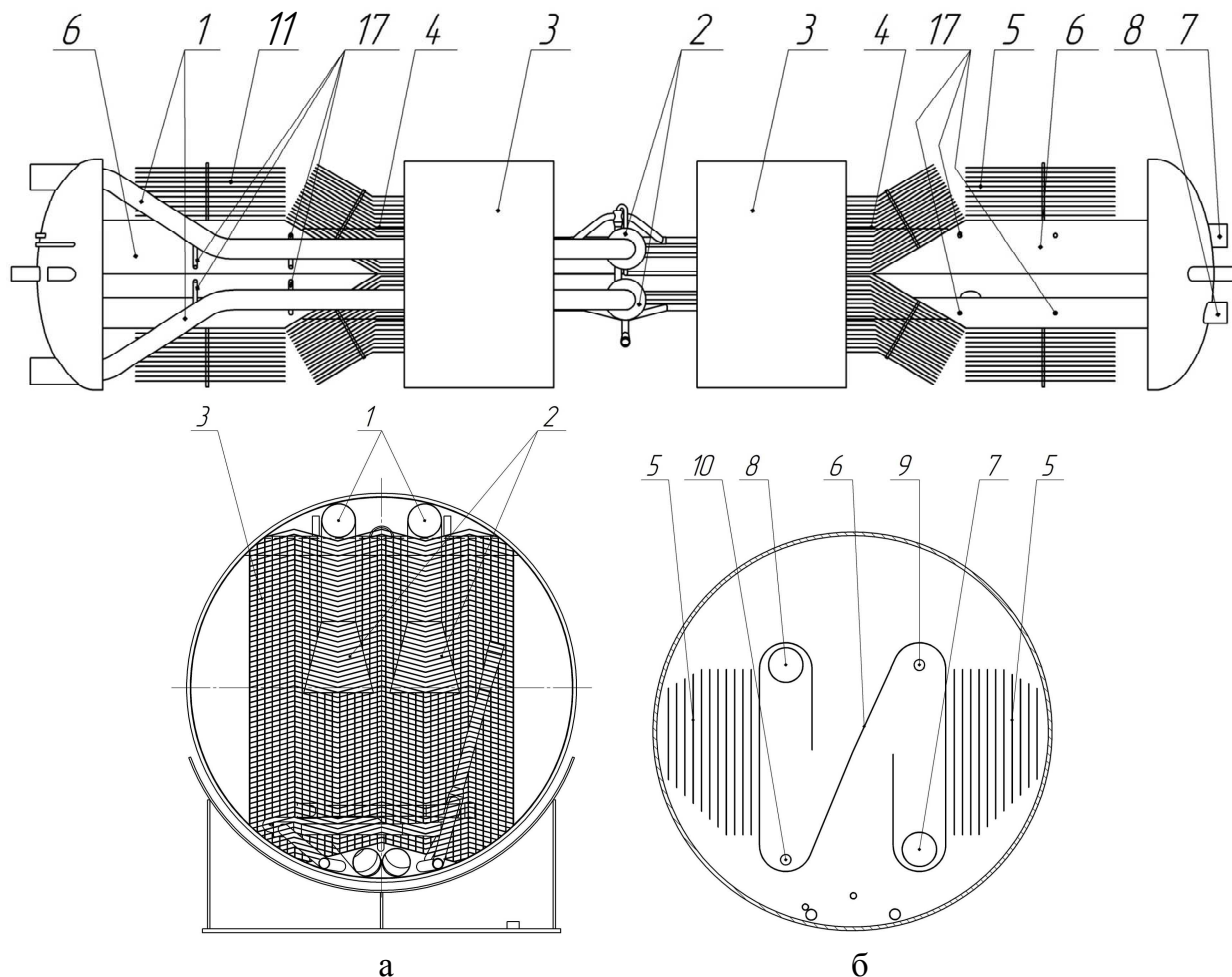


Рис.1. Схема бака-сепаратора: 1 – трубы подвода смеси; 2 – выходные диффузоры труб подвода смеси; 3 – коалесцирующие устройства; 4 – успокоители потока смеси; 5 – успокоители потоков компонентов; 6 – заборные устройства компонентов; 7 – труба забора воды; 8 – труба забора Еххsol; 9 – вторая ступень очистки воды; 10 – вторая ступень очистки Еххsol; 11 – трубки связи полостей заборного устройства с газовой подушкой

Бак-сепаратор выполнен в виде ёмкости цилиндрической формы с эллиптическими днищами, имеет длину 9815 мм внутренний диаметр 1891 мм и вместимость 26,68 м³, толщина стенок бака составляет 18 мм.

Процесс сепарации происходит следующим образом. Смесь жидких компонентов через два трубопровода 1 с диффузорными выходами 2 поступает в центральный отсек бака-сепаратора. На диффузорах устанавливаются решетки для обеспечения безотрывного режима течения и уменьшения гидравлических потерь. Из центральной части бака смесь двумя потоками направляется в два коалесцирующих устройства 3 (рис. 1, а), которые представляют собой щелевые каналы «елочного» вида в поперечном сечении, на гребнях которых под

действием архимедовых сил собираются струи E_{xxsol} , а во впадинах – струи воды. Поток смеси по мере движения в элементах сепаратора расслаивается, компоненты поступают в заборные устройства, находящиеся в торцах бака, и откачиваются насосами.

После выхода из коалесцирующих устройств потоки попадают в соответствующие успокоители потоков смеси 4, где происходит всплывание струй E_{xxsol} и осаждение струй воды. Успокоители представляют собой вертикальные щелевые каналы по высоте уровня жидкости в баке ширина которых обеспечивает режимы течения смеси и компонентов даже при максимальных расходах оставаться ламинарными. Успокоители потоков компонентов 5 (рис. 1, б), расположенные вдоль заборных устройств, предотвращают турбулизацию потоков компонентов смеси вдоль поверхности их раздела. Непосредственно за успокоителями 4, 5 отсепарированные компоненты смеси E_{xxsol} и вода поступают в два заборных устройства 6. Заборные устройства имеют И-образную форму, в верхние изгибы которых поступает более легкий компонент смеси E_{xxsol} , а в нижние – вода. Из нижней части по трубе 7, проходящей через оба устройства, вода откачивается насосом, находящимся вне сепаратора. Труба 7 в пределах заборных устройств имеет ряд отверстий вдоль нижней образующей для равномерного забора воды. Аналогичным образом по трубе 8 из верхних полостей соответствующим насосом забирается E_{xxsol} . Забор E_{xxsol} из заборного устройства производится через ряд отверстий вдоль верхней образующей трубы 8.

В результате последующих экспериментальных исследований сепаратора подтверждены его расходные характеристики, показатели качества сепарации во всем диапазоне расхода газожидкостной смеси [3] соответствуют требованиям, предусмотренным техническим заданием.

Список литературы

1. Соловьев В.Г., Варсегов В.Л., Малышев С.Л., Петров В.Н. Разработка и создание Государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 3. – С. 32-38.
2. Кудусов Д.И., Малышев С.Л. Совершенствование государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 3. – С. 55-58.
3. Кудусов Д.И., Левин К.А., Малышев С.Л. Эффективный способ воспроизведения потока газожидкостной смеси эталоном расхода // Эталоны. Стандартные образцы. – 2024. – №3. – С. 13-22.

Сведения об авторе:

Кудусов Дамир Исавилевич – ведущий инженер НИО-9.

ВЫБОР ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОИЗВОДСТВА ЕС И КНР, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ, НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Каткова Е.Д., Терентьева З.С.

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

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые материалы, гранулометрический анализ, морфология частиц, селективное лазерное сплавление, статистика распределения частиц.

Аннотация. В работе рассматривается проблема выбора новых поставщиков расходных материалов для технологии селективного лазерного сплавления. Отечественной промышленности сегодня крайне необходима диверсификация производства, расширение коммерческих связей со странами, не присоединившимися к так называемым санкциям. Учитывая высокий научно-технический и инновационный потенциал КНР, в работе было обращено внимание на изготавливаемые порошки различных металлов в данной стране. Показано, что порошки производства КНР могут быть вполне конкурентоспособны на внутреннем рынке и имеют все шансы быть использованными при производстве изделий методом СЛС. Полученные в работе материалы, касающиеся вопросов гранулометрического анализа порошков, могут стать основой для заполнения базы данных порошковых материалов, используемых в аддитивном производстве, а методика анализа порошков может использоваться при процедурах системы сертификации данных материалов. Полученные данные показали, на примере сравнения базовых информационных параметров, схожесть гранулометрических и морфологических особенностей порошков, иллюстрируя возможность их обоюдного использования при селективном лазерном сплавлении.

SELECTION OF POWDER MATERIALS MANUFACTURED IN THE EU AND PRC USED IN SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY BASED ON GRANULOMETRIC ANALYSIS

Katkova E. D., Terentieva Z.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: additive technologies, powder materials, granulometric analysis, particle morphology, selective laser melting, particle distribution statistics.

Abstract. The paper discusses the problem of choosing new suppliers of consumables for selective laser melting technology. Domestic industry today urgently needs diversification of production and expansion of commercial ties with countries that have not joined the so-called sanctions. Considering the high scientific, technical, and innovative potential of the People's Republic of China (PRC), the work pays attention to the powders of various metals produced in this country. A very successful attempt has been made to show that powders produced in PRC can be quite competitive in the domestic market and have every chance of being used in the production of products using the selective laser melting method. The materials obtained in the paper concerning the issues of granulometric analysis of powders may become the basis for filling out a database of powder materials used in additive manufacturing, and the powder analysis technique can be used in the procedures of the certification system for these materials. The obtained data show, through the example of the comparison of basic information parameters, the similarity of granulometric and morphological features of the powders, illustrating the possibility of their mutual use in selective laser melting.

Сегодня главным поставщиком оборудования и материалов для аддитивных технологий и, в особенности, селективного лазерного сплавления (СЛС) являются страны ЕС и США, поставки которых ограничены.

В рамках импортозамещения активно ведутся разработки по созданию не только самого оборудования для СЛС, но и материалов. Однако создание новых порошков занимает большое количество времени. Одним из вариантов решения проблемы становится закупка порошка производителей КНР. Но если для порошков, поставляемых ЕС уже имелись данные гранулометрии и морфологии, то для порошков производства КНР такой информации до сих пор очень мало и она требует проверки.

Целью работы является сравнительно-сопоставительный анализ информативных критериев, позволяющих оценить пригодность порошков производства КНР в установках западного, прежде всего европейского, производства, работающих по методу СЛС. Результаты данной работы позволят принять решение о переходе на другой расходный материал производства КНР.

К параметрам, представляющим интерес для сравнения и оценки возможности использования порошка, относятся: размер и форма элементов дисперсной фазы, содержание в порошке частиц минимального и максимального размера (полидисперсность), распределение частиц по размерам, морфология частиц.

Для определения среднего размера частиц порошков применялся лазерный анализатор частиц Microtrac Bluewave S3500. В основу работы прибора положен метод лазерной дифракции при реализации которого удалось также определить распределение частиц по размерам.

Для сравнительного анализа использовались порошки одного и того же химического состава, но разных производителей Electro Optical Systems (EOS), Германия, и Intelligence Manufacturing Technology (IMT), Китай. Состав порошков представлен в таблице 1.

Результаты измерений по определению среднего размера частиц порошков IMT и EOS приведены в таблице 2.

Табл. 1. Перечень порошков для гранулометрического анализа

Наименование образца	Описание образца (IMT)	Описание образца (EOS)
Порошок № 1	Алюминиевый сплав AlSi10Mg-0403 (аналог Ак9ч)	AlSi10Mg-0403
Порошок № 2	Титановый сплав Ti6Al4V ELI	Ti6Al4V
Порошок № 3	Нержавеющая сталь REN-316L	316L
Порошок № 4	Полиамид	Полиамид

Помимо полученных данных на анализаторе частиц был выполнен анализ морфологии поверхности, рассчитаны значения коэффициента несферичности, в ходе которых за основную размерную характеристику был принят эквивалентный диаметр:

$$d_{ЭКВ} = \frac{2_a + 2_b}{2},$$

где a – большая полуось эквивалентного эллипса; b – малая полуось эквивалентного эллипса [1, 2].

Табл. 2. Средние значения размеров частиц исследуемых порошков

Наименование образца	Средний размер частиц порошка производства IMT (объемное распределение), мкм	Средний размер частиц производства EOS (объемное распределение), мкм
Порошок № 1	48,62	42,96
Порошок № 2	34,86	38,54
Порошок № 3	36,19	38,09
Порошок № 4	56,69	59,33

Для структурирования перечня исследуемых данных был проведен подсчет значений гранулометрических характеристик (площадь поверхности, площадь проекции, разница значение осей эквивалентного эллипса) по небольшим выборкам гранул из каждого исследуемого образца.

Для удобства сравнения полученных данных были рассчитаны коэффициенты корреляции площадей поверхностей порошков производства IMT и EOS, приведенные в таблице 3.

Табл. 3. Коэффициенты корреляции площадей поверхностей исследуемых порошков

Наименование образца	Значение коэффициента корреляции
Порошок № 1	0,99
Порошок № 2	0,94
Порошок № 3	0,95
Порошок № 4	0,93

Следующим этапом анализа было получение микрофотографий частиц порошков с целью формирования представлений о форме частиц, строении их граней, блеске, пористости, особенностях структуры и др. Для проведения микроскопических исследований использовался микроскоп марки Leica S9I.

Несмотря на высокие значения корреляции площади проекции можно отметить, что число дефектных частиц (с сильным отклонением от сферичности, очевидно, слипшиеся частицы) в порошке производства EOS более высокое [3, 4].

Очевидно, что порошки европейского производителя склонны к агломерации, нет стабильности формы, а это может снизить показатель его сыпучести, и увеличивает вероятность появления дефектов в виде пор при сплавлении. В качестве примера на рисунке 1 дефектные частицы отмечены кругами [5-7].

Аналогичные исследования были проведены и для других марок порошков.

Подводя итог полученным результатам сравнительно-сопоставительных исследований, можно высказать предположение о возможности замены расходных материалов производства компании Electro Optical Systems на аналогичные порошки, произведенные в Intelligence Manufacturing Technology.

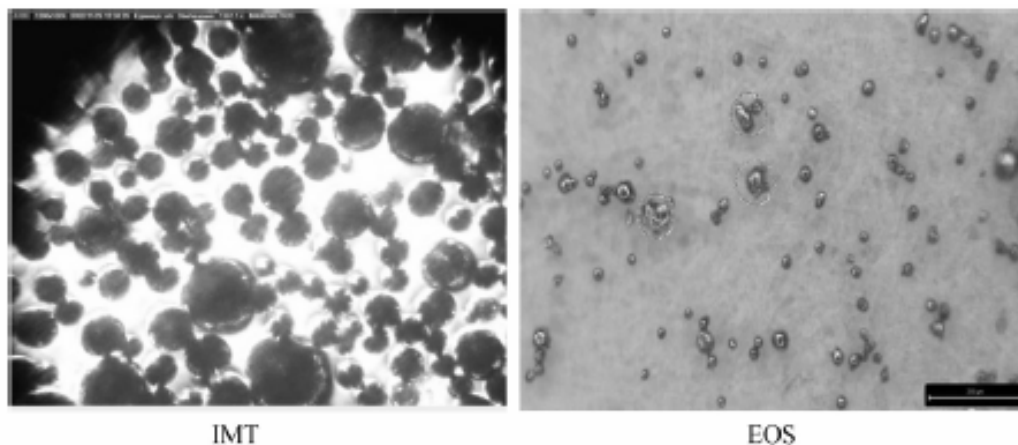


Рис. 1. Микроскопия гранул порошка № 1 (AlSi10Mg)

Тем не менее, окончательная оценка может быть дана только в случае успешных результатов прямых экспериментов при изготовлении образцов методом СЛС. Также необходимо провести и анализ химического состава порошка на предмет соответствия заявленному химическому составу. Следует запланировать изготовление опытной партии образцов, изготовленных по ГОСТ для последующих испытаний на определение физико-механических, химических, технологических свойств.

Финансирование. Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Список литературы

1. Галиновский А.Л., Мартысюк Д.А., Каткова Е.Д., Кожус О.Г., Долгих А.И. Сопоставительный анализ результатов гранулометрического анализа порошковых материалов производства ЕС и КНР, применяемых в технологии селективного лазерного плавления // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2023. – № 7. – С. 20-26.
2. Тарасова Т.В., Подрабинник П.А., Филатова А.А. Гранулометрический анализ порошковых материалов для аддитивного производства. – М.: Изд-во МГТУ (СТАНКИН), 2017. – 44 с.
3. Кубанова А.Н., Сергеев А.Н., Добровольский Н.М., Гвоздев А.Е., Медведев П.Н., Малий Д.В. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий // Чебышевский сборник. – 2019. – № 3 (71). – С. 453-477.
4. Malashin I., Martysyuk D., Tynchenko V., Evsyukov D., Nelyub V., Borodulin A., Gantimurov A., Galinovsky A. Predicting defects in SLM-produced parts based on melt pools clustering analysis // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024, vol. 134, pp. 1169-1178. DOI: 10.1007/s00170-024-14134-1.
5. Esparza Y., Ngo T., Frascini C. et al. Effects of additives on the particle morphology and aqueous dispersibility of foam-spray dried cellulose nanocrystal suspensions // Cellulose. 2019, vol. 26, pp. 8611-8623. DOI: 10.1007/s10570-019-02675-8.
6. Kapłonek W., Nadolny K. Review of the Advanced Microscopy Techniques used for Diagnostics of Grinding Wheels with Ceramic Bond // Journal of Machine Engineering. 2012, vol. 12, no. 4, pp. 81-98.
7. Malashin I., Martysyuk D., Tynchenko V., Nelyub V., Borodulin A., Gantimurov A., Nisan A., Novozhilov N., Zelentsov V., Filimonov A. et al. Controlled Porosity of Selective Laser Melting-

Produced Thermal Pipes: Experimental Analysis and Machine Learning Approach for Pore Recognition on Pipes Surfaces // Sensors. 2024, vol. 24, p. 4959. doi.org/10.3390/s24154959.

Сведения об авторах:

Каткова Елизавета Дмитриевна – студент;

Терентьева Зинаида Сергеевна – к.т.н., доцент, заведующая лабораторией порошковых материалов и наноматериалов Центра НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества».

ИНТЕГРАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ БИОНИКИ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Огородников А.И., Аль.Коаерджи Мозан А.М.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Ключевые слова: бионика, биомиметика, аддитивные технологии, оптимальное проектирование, генеративный дизайн.

Аннотация. Рассмотрены концептуальные вопросы о влиянии новых возможностей формообразования, предоставляемых аддитивными технологиями, на современные подходы к проектированию и расчетному обоснованию биоподобных конструкций. Принципы конструкционной бионики применены в конструировании корпусных деталей для прибора технического зрения. С учетом компонентов прибора технического зрения, которые должны иметь выход на поверхность, в качестве природного прототипа для защитного корпуса выбран панцирь головоногого моллюска. Используемые при проектировании принципы конструкционной бионики соответствуют перспективной концепции генеративного дизайна.

INTEGRATION OF STRUCTURAL BIONICS AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF HOUSING PARTS

Ogorodnikov A.I., Al.Koaerji Mozan A.M.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,

Ekaterinburg

Keywords: bionics, biomimetics, additive technologies, optimal design, generative design.

Abstract. The paper considers the influence of new shaping capabilities provided by additive technologies on modern approaches to designing and modeling bioinspired structures. Bionic principles are applied in the design of housing parts for computer vision devices. Taking into account that some components of the vision device must be located on the surface, the shell of a cephalopod mollusk was chosen as a natural prototype for the housing. Bionic principles used to create a part for 3D printing correspond to the promising concept of generative design.

В классических подходах к конструированию деталей приходится учитывать стандарты ЕСКД [1] и технологии изготовления заготовок, а также технологии последующей механической обработки на станках с ЧПУ [2]. При этом требования технологичности и регламентированные возможности традиционных технологий механической обработки накладывают достаточно жесткие ограничения на геометрию деталей, в частности, запрещают закрытые внутренние полости. Применение аддитивных технологий снимает ряд ограничений по формообразованию и открывает доступ к новым способам построения геометрии и проектирования деталей [3], изготовление которых ранее было невозможным.

Аддитивные технологии имитируют естественный природный процесс постепенного выращивания микро- и макроструктуры и могут использовать интеллектуальные системы управления процессом пространственного формирования геометрии. Поэтому перспективным направлением развития

новых способов конструирования деталей становится бионический дизайн, который позволит с учетом открывающихся технологических возможностей реализовать структурное многообразие и преимущество живых структур в обеспечении оптимальной прочности и уникальной функциональности «выращенных» деталей. Следует подчеркнуть, что в полной мере модели, закономерности и методы конструирования деталей с учетом новых сложно-структурированных материалов и аддитивных технологий не разработаны. Разработка таких методов создаст условия для внедрения в технику ряда новых и старых идей из области бионики и биомиметики, практическая реализация которых ранее не рассматривалась из-за технологических ограничений.

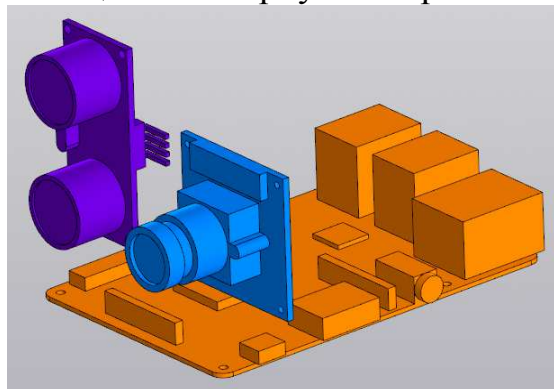
Применение бионических принципов позволяет переносить в технические системы закономерности построения и функционирования живых систем. Вместе с тем, бионические принципы мало применяются в повседневной практике машиностроительного конструирования, поскольку их внедрение в проектную деятельность не обеспечено соответствующими методами и программными средствами автоматизированного проектирования.

Бионические принципы следуют из основных биологических принципов, то есть исходных положений, объединяющих различные по методологии науки о живых организмах и системах. В свою очередь, основные биологические принципы разворачиваются в современные теории от пяти ключевых понятий, определяющих отличительные признаки живых организмов: клетка, гомеостаз и метаболизм, ген и эволюция. В соответствии с бионическими принципами технические системы могут быть подобными живым организмам по ряду признаков, характеризующих структуру материалов, геометрию конструкции, динамику движений, сенсорику, алгоритмы принятия решений, а также источники энергии. Некоторые показатели эффективности живых систем в технике пока недостижимы, в частности, низкое удельное энергопотребление, способность самовосстанавливать поврежденные участки, компактная передача инструкции по сборке.

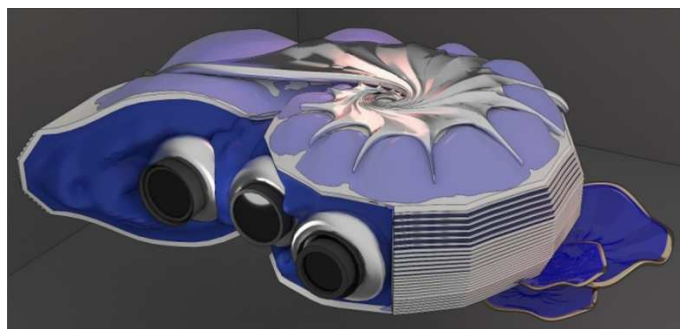
В данной работе выполнен анализ процесса проектирования применительно к равнопрочному корпусу прибора. Прибор предназначен для распознавания спелых фруктов [4] и содержит аппаратные компоненты технического зрения: камеру, ультразвуковой датчик, микроконтроллер, разъемы и порты ввода-вывода. На рисунке 1, а показано размещение компонентов прибора в геометрической модели. Традиционные подходы к конструированию корпусной детали предполагают защиту функциональных компонентов от внешних воздействий и основаны прежде всего на свойствах конструкционного материала, который должен обеспечить необходимую прочность.

В концепции бионического дизайна и биомиметики, как методологии создания биоподобных технических систем, проектирование корпуса начинается с поиска природных аналогов, выполняющих схожие функции. В качестве защитного корпуса с функциями несущей конструкции интерес представляют такие природные экзоскелеты, как панцири черепах или ракообразных, а также раковины моллюсков. С учетом компонентов прибора технического зрения,

которые должны иметь выход на поверхность, в качестве природного прототипа для защитного корпуса выбран панцирь головоногого моллюска (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Исходное пространственное расположение компонентов прибора технического зрения (а) и общий вид прибора в бионическом корпусе (б)

В заключение следует подчеркнуть, что в живой природе не существует сборных конструкций с возможностью заменить износившиеся детали. Весь организм оптимально вырабатывается из одной исходной клетки по генетически определенной программе и полностью выходит из строя в случае разрушения каких-либо жизненно важных компонентов. В этом направлении можно предположить развитие способов совместной печати несущих деталей и системы управления в аддитивном производстве, что технически осуществимо. Следует отметить и другую особенность компонентов живой системы: каждый орган защищен собственной оболочкой и наделен внутренним каркасом для обеспечения прочности и податливости. Последний бионический принцип активно применяется в аддитивных технологиях.

Список литературы

1. Огородникова О.М., Ваганов К.А., Юшков И.В. Адаптация стандартов ЕСКД для проектирования промышленных роботов в интегрированной программной среде // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 2. – С. 49-55.
2. Огородников А.И., Власов В.Н., Огородникова О.М. Компьютерная оценка ожидаемого качества в системе управления технологическими процессами механической обработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – №1. – С. 123-127.
3. Stupin S.A., Ogorodnikova O.M. Topology optimization in designing of anthropomorphic gripper for a robot // AIP Conference Proceedings. 2020, vol. 2313, p. 040011.
4. Ogorodnikova O.M., Ali W. Method of ripe tomato detecting for a harvesting robot // AIP Conference Proceedings. 2019, vol. 2274, p. 020146.

Сведения об авторах:

Огородников Алексей Игоревич – к.т.н., доцент кафедры электронного машиностроения;
Аль.Коаерджи Али Мохаммед Мозан – аспирант.

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ WAAM И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Александрова Е.П., Наплавкова К.С., Сергеева В.М.

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

Ключевые слова: WAAM, аддитивное производство, гибридные технологии, прокатка, штамповка, пластичность, механические свойства.

Аннотация. В статье исследуются гибридные технологии производства, объединяющие WAAM и процессы формообразования для повышения механических свойств и эффективности изготовления металлических деталей. Рассмотрены преимущества совмещения WAAM с методами прокатки, штамповки и обработки листовых материалов, а также их влияние на остаточные напряжения, пластичность и прочность. Проведённый анализ демонстрирует перспективы применения данных технологий в высокотехнологичных отраслях.

THE EFFECT OF COMBINED WAAM AND SHAPING PROCESSES ON THE STRENGTH AND DUCTILITY OF METAL PARTS

Aleksandrova E.P., Naplavkova K.S., Sergeeva V.M.

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

Keywords: WAAM, additive manufacturing, hybrid technologies, rolling, stamping, plasticity, mechanical properties.

Abstract. The article explores hybrid manufacturing technologies that combine WAAM and shaping processes to improve the mechanical properties and efficiency of manufacturing metal parts. The advantages of combining WAAM with the methods of rolling, stamping and processing of sheet materials, as well as their effect on residual stresses, ductility and strength, are considered. The analysis demonstrates the prospects for the application of these technologies in high-tech industries.

Введение

Гибридные технологии производства объединяют различные методы обработки материалов, позволяя компенсировать недостатки каждого из них и повышать общую эффективность процессов. Среди них технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) выделяется как перспективный метод аддитивного производства крупных металлических деталей, отличающийся высокой скоростью изготовления и экономичностью. Однако, несмотря на очевидные преимущества, использование WAAM сопровождается проблемами, такими как остаточные напряжения, деформации и неравномерность микроструктуры [1]. Для решения данных задач внедряются комбинированные процессы, которые включают в себя формообразование: прокатку, штамповку, гибку и иные методы. Настоящее исследование посвящено анализу влияния комбинированного использования WAAM и процессов формообразования на прочность и пластичность металлических деталей. Рассматриваются механические свойства полученных материалов и перспективы их применения в промышленном производстве.

Технология WAAM

Это аддитивная технология, использующая металлическую проволоку в качестве материала, который плавится электрической дугой, как в сварке, для создания изделий слоями. Роботизированное управление обеспечивает точное формирование геометрии, а инертный газ защищает металл от окисления. Технология применяется для производства новых деталей и ремонта существующих.

Преимущества WAAM:

1. Широкий выбор материалов, включая титан, нержавеющую сталь и никелевые сплавы [2].
2. Высокая производительность, особенно при создании крупных компонентов.
3. Экономия ресурсов за счёт сокращения отходов и снижения затрат на сырьё.
4. Доступность оборудования и гибкость в изготовлении сложных форм.

Объединение WAAM с процессами формообразования

Разделим способы совмещения аддитивной технологии с процессами формообразования на три группы и дадим оценку каждому.

Объединение WAAM с процессами улучшения свойств металлов

Гибридные технологии, объединяющие WAAM с методами упрочнения материалов, позволяют улучшать механические свойства и качество наплавленных металлов. Одним из таких подходов является **прокатывание наплавленных слоев** (рис. 1), которое минимизирует остаточные напряжения и деформации за счет пластической деформации поверхности. Применение прокатки, показало снижение остаточных напряжений, уменьшение размеров зерен и повышение механических характеристик наплавленного материала благодаря динамической рекристаллизации [3]. Этот метод также успешно применяется для создания биметаллических листов, как продемонстрировано в патенте Зайцева А.И. и коллег [4].

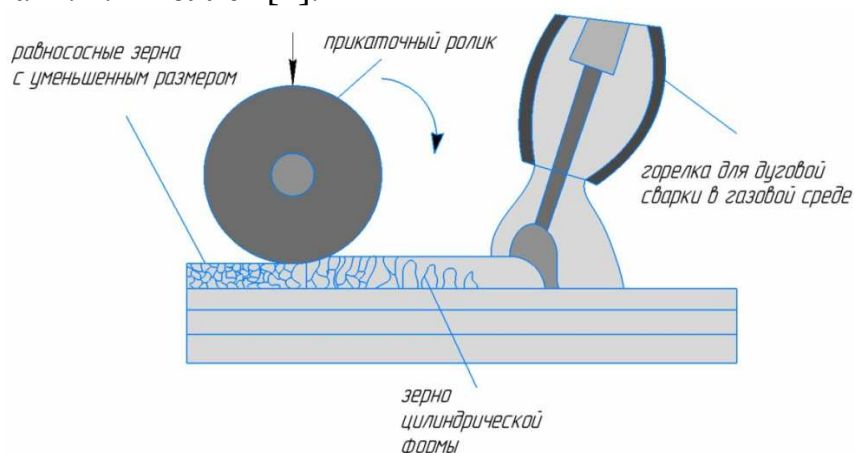


Рис. 1. Схема гибридного процесса WAAM с последующей прокаткой

Дробеструйная обработка – другой эффективный метод упрочнения. Воздействие твердых частиц вызывает сжимающие напряжения, снижая деформации, но не изменяя геометрию слоя. Были предложены комбинации аддитивной технологии с дробеструйной обработкой (рис. 2, а), и

ультразвуковым или лазерным ударным упрочнением (рис. 2, б), которые повышают усталостную прочность металлов, замедляя развитие трещин [5].

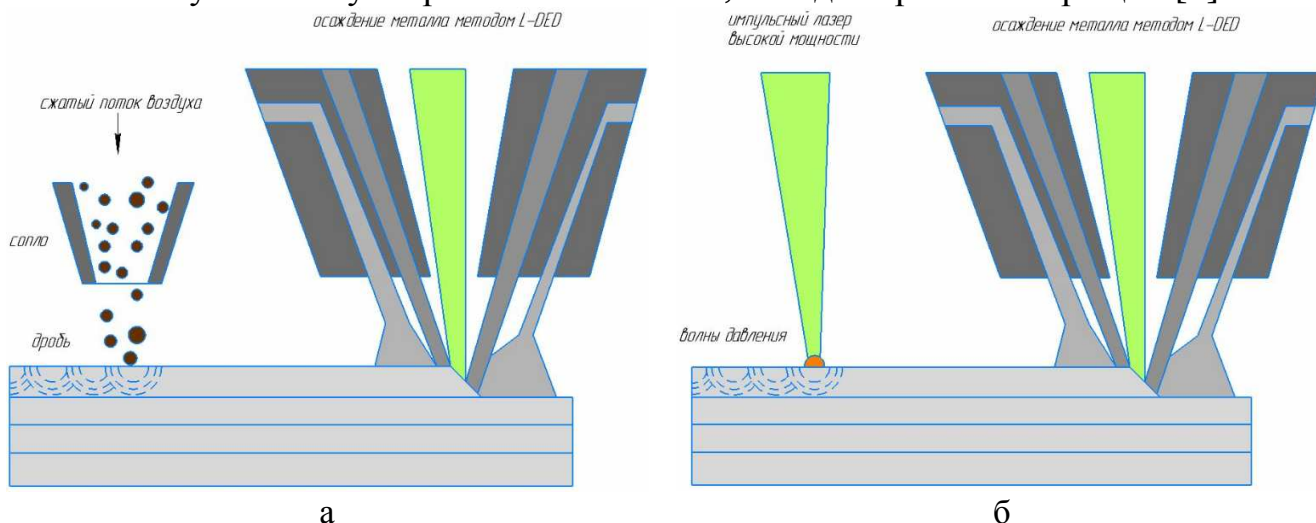


Рис. 2. Комбинированный процесс: а – с дробеструйной обработкой; б – с лазерным упрочнением

Объединение WAAM с процессами объемной штамповки

Использование объёмной штамповки в аддитивных технологиях позволяет значительно улучшить механические свойства синтезированных материалов. Так, исследования пластичности алюминиевого сплава AA5083, нанесённого методом WAAM, подтвердили его высокую пластичность [6]. Экспериментальный анализ холодной штамповки показал, что сжимающие напряжения способствуют закрытию пор, увеличивая плотность и упрочняя материал за счёт деформационного упрочнения. Для титановых и алюминиевых сплавов комбинирование аддитивного производства с изотермической ковкой и термообработкой улучшает микроструктуру и пластичность [7]. Методы WAAM и L-DED эффективно интегрируются с производством функциональных элементов на штампованных заготовках, сокращая время обработки

Объединение WAAM с процессами формования из листовых материалов

Объединение WAAM с методами гибки, вытяжки и листовой штамповки открывает новые возможности гибридного производства. Например, нанесение 3D-элементов на листы до или после гибки позволяет создавать сложные изделия с высокой точностью. Однако исследователи отметили, что операция гибки может снижать пластичность материала, поэтому требуется оптимизация технологии.

Глубокая вытяжка в сочетании с WAAM позволяет локально усиливать вытянутые листы, что повышает их жесткость при минимальном увеличении веса. Однако необходимо учитывать возможные дефекты, такие как несплавленные области, влияющие на прочность соединений.

Инкрементальная штамповка и WAAM также успешно применяются для формирования листов сложной формы, хотя анизотропные свойства материалов, полученных аддитивным методом, требуют дополнительной проработки.

Заключение

Гибридные технологии, объединяющие WAAM с различными методами формообразования, демонстрируют высокий потенциал для улучшения механических свойств и оптимизации производственных процессов. Комбинированные подходы позволяют минимизировать недостатки аддитивного производства, такие как остаточные напряжения и деформации, обеспечивая при этом экономичность и гибкость. Дальнейшее развитие таких технологий открывает перспективы их широкого применения в машиностроении и других высокотехнологичных отраслях.

Список литературы

1. Разин Д.А. Гибридная технология аддитивного производства как основа развития его будущего // Синергия наук. – 2020. – №54. – С. 843-850.
2. Должникова А.О., Неверов В.В. WAAM-процесс как один из ведущих методов аддитивных технологий в машиностроении // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 78-82.
3. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Kashoob T., Filomeno M., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // Journal of Materials Processing Technology. 2013, no. 10, pp. 1782-1791.
4. Патент №2501628 РФ. Способ получения биметаллических листов с износостойким наплавленным слоем / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, А.А. Павлов, А.В. Амежнов, О.Н. Бакланова, А.В. Гришин, А.В. Голованов, Е.И. Заркова, Д.Л. Костин. – Заявка №2012147922 от 20.12.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
5. Patent WO 2012/152259 A1. Verfahren zum herstellen, reparieren oder austauschen eines bauteils mit verfestigen mittels druckbeaufschlagung / Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W. – Appl. from 10.05.2012; publ. 15.11.2012.
6. Петров П.А., Петров М.А., Фомин В.С., Роберов И.Г. Разработка гибридной технологии производства изделий из алюминиевых сплавов на основе совмещения аддитивной технологии и технологии изотермической штамповки // Сборник материалов VII Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (1-5 октября 2018г., г.Суздаль). – М.: ИМЕТ РАН, 2018. – С. 481-483.
7. Bambach M., Sizova I., Sydow B., Hemes S., Meiners F. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing // Journal of Materials Processing Technology. 2020, vol. 282, pp. 116-689.

Сведения об авторах:

Александрова Елизавета Петровна – студентка;

Наплавкова Ксения Сергеевна – студентка;

Сергеева Валерия Михайловна – студентка.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ5

Щапов Г.В.¹, Казанцева Н.В.¹, Царьков А.В.²

¹*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург;*

²*Калужский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана, Калуга*

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, Al-Mg сплав, дефекты, микротвердость, оптическая микроскопия, режимы сварки.

Аннотация. Сварка трением с перемешиванием (СТП) представляет собой процесс соединения металлов в твердом состоянии, который находит широкое применение в промышленности, особенно в аэрокосмической, морской, автомобильной. Выделение тепла и пластической деформации при СТП вызывают значительные изменения микроструктуры и механических свойств сварных соединений. Понимание физики процесса СТП позволит подбирать оптимальные режимы сварки для получения бездефектных сварных швов с механическими свойствами, не уступающими основному металлу. В работе были исследованы образцы из Al-Mg сплава, полученных с помощью сварки трением с перемешиванием с различными режимами.

INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS ON THE STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND DEFECT FORMATION IN WELDED JOINTS OF ALUMINUM ALLOY AMG5

Schapov G.V.¹, Kazantseva N.V.¹, Tsarkov A.V.²

¹*Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg;*

²*Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga*

Keywords: friction stir welding, Al-Mg alloy, defects, microhardness, optical microscopy, welding modes.

Abstract. Friction stir welding (FSW) is a solid-state metal joining process that is widely used in industry, especially in aerospace, marine, automotive industries. The heat and plastic deformation generated during FSW cause significant changes in the microstructure and mechanical properties of welded joints. Understanding the physics of the FSW process will allow selecting the optimal welding conditions to obtain defect-free welds with mechanical properties that are not inferior to the base metal. In this work, samples of Al-Mg alloy obtained using friction stir welding with different modes were investigated.

Новая технология сварки – сварка трением с перемешиванием (СТП) появилась в конце XX века. Этот вид сварки имеет преимущество перед традиционными способами сварки тем, что не использует никакой защитной атмосферы и не требует дополнительной подготовки поверхностей деталей. Метод СТП позволяет соединять как термически упрочняемые, так и термически

неупрочняемые сплавы, а также материалы трудносвариваемые, или совсем не свариваемые, традиционными видами сварки, благодаря твердофазному характеру процесса сварки [1,2].

В работе были исследованы образцы из Al-Mg сплава, полученных с помощью сварки трением с перемешиванием. Технологические параметры процесса представлены в таблице 1.

На рисунке 1 представлен оптический снимок микроструктуры поперечного сечения сварного соединения.

Табл. 1. Технологические параметры процесса СТП

Номер образца	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки (продольная подача инструмента), мм/мин	Угол наклона инструмента к вертикали	Глубина внедрения пина инструмента в образец, мм
E01	710	50	2°	4,75
E02	560	40	2°	4,65
E03	900	63	2°	4,60

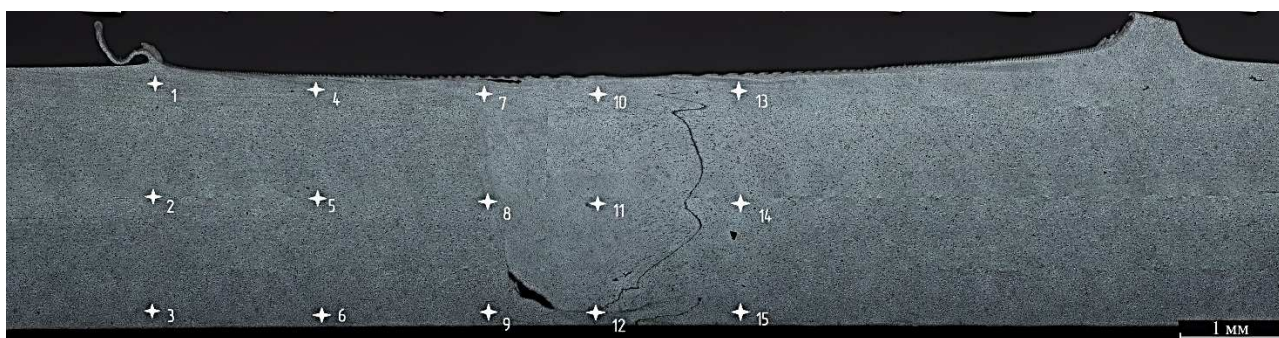


Рис. 1. Микроструктура сварного шва, поперечное сечение, оптика, образец E03

Анализ микроструктуры показал наличие в сварном соединении нескольких зон: зону ядра, зону термомеханического воздействия и зону термического воздействия, что согласуется со многими литературными источниками [3, 4]. Ядро сварного шва имеет мелкозернистую рекристаллизованную структуру. В зоне термомеханического воздействия наблюдается интенсивное течение материала. Во всех 3 образцах, полученных по разным режимам, наблюдался дефект, называемый в литературе “kissing bond”, когда два свариваемых материала контактируют с небольшим металлическим соединением или вообще не контактируют [5]. Также в образце E03 наблюдается пустотный дефект («непровар»), связанный с увеличением скорости сварки и частоты вращения инструмента. Анализ микротвердости в зоне сварного шва показал присутствие неоднородных участков с повышенной микротвердостью, что может быть связано с давлением инструмента на материал. Физические параметры СТП (давление, температура) обсуждаются.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Аддитивность», № 121102900049-1).

Список литературы

1. Guo Y., Ma Y., Wang F. Dynamic fracture properties of 2024-T3 and 7075-T6 aluminum friction stir welded joints with different welding parameters // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019, vol.104, p. 102372. DOI: 10.16/j.tafmec.2019.102372.

2. Chhangani S., Masa S.K., Mathew R.T., M. J. N. V. Prasad, Sujata M.. Microstructural evolution in Al-Mg-Sc alloy (AA5024): Effect of thermal treatment, compression deformation and friction stir welding // Materials Science Engineering A. 2020, vol. 772, p. 138790. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138790.
3. Krishnan K.N. On the formation of onion rings in friction stir welds. Materials Science and Engineering: A. 2002, vol. 327, no. 2, pp. 246-251. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01474-5.
4. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2005, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
5. Tongne A., Desrayaud C., Jahazi M., Feulvarch E. On material flow in Friction Stir Welded Al alloys // Journal of Materials Processing Technology. 2017, vol. 239, pp. 284-296. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.030.

Сведения об авторах:

Щапов Геннадий Валерьевич – аспирант, м.н.с.;

Казанцева Наталия Васильевна – д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник;

Царьков Андрей Васильевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

ФОРМИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ТЕХНОЛОГА В СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Ураскин Е.А., Хаймович И.Н., Гречников Ф.А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара*

Ключевые слова: информационные системы, технологическая подготовка производства, модель, SADT-технологии, жизненный цикл, информационное пространство.

Аннотация. В данной работе рассматривается процесс формирования автоматизированного рабочего места технолога в контексте системы технологической подготовки производства. Основное внимание уделяется необходимым функциональным требованиям, а также возможностям интеграции современных информационных технологий и программного обеспечения для оптимизации работы технологов. Автоматизированное рабочее место должно обеспечивать удобный доступ к данным о материалах, технологиях, а также предлагать инструменты для мониторинга и управления производственными процессами.

FORMATION OF AN AUTOMATED WORKPLACE OF A TECHNOLOGIST IN THE SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION

Uraskin E.A., Khaimovich I.N., Grechnikov F.A.

Samara National Research University n.a. acad. S.P. Kororlev, Samara

Keywords: information systems, technological preparation of production, model, SADT technologies, life cycle, information space.

Abstract. This paper examines the process of forming an automated workplace of a technologist in the context of a system of technological preparation of production. The main attention is paid to the necessary functional requirements, as well as the possibilities of integrating modern information technologies and software to optimize the work of technologists. An automated workplace should provide convenient access to data on materials and technologies, as well as offer tools for monitoring and managing production processes.

В качестве примера рассмотрим функциональную модель процесса технологической подготовки производства, построенную с использованием средств IDEF0, «КАК ЕСТЬ».

Главная задача методологии IDEF0 – определить, что требуется сделать для выполнения миссии объекта, обозначенного в контекстной диаграмме, имея в виду цель моделирования и точку зрения на объект.

Техническая подготовка производства является бизнес-процессом верхнего уровня управления предприятием. Бизнес-процессы верхнего уровня представлены на диаграмме А-0 (представлена на рисунке 1).

«Проектирование ТП (технологического процесса)» (диаграмма А212, представлена на рисунке 2) – основной и самый трудоемкий процесс в «Проектировании ТД (технологической документации)», поэтому некоторые его этапы требуют более детальной декомпозиции.

На основании месячного плана ТО (технического отдела) и имея задание на разработку ТД и утвержденную КД (конструкторскую документацию) технологи ТО разрабатывают маршрутную карту, операционную карту, карту контроля, ведомость заказа оснастки и ведомости по трудоемкости.

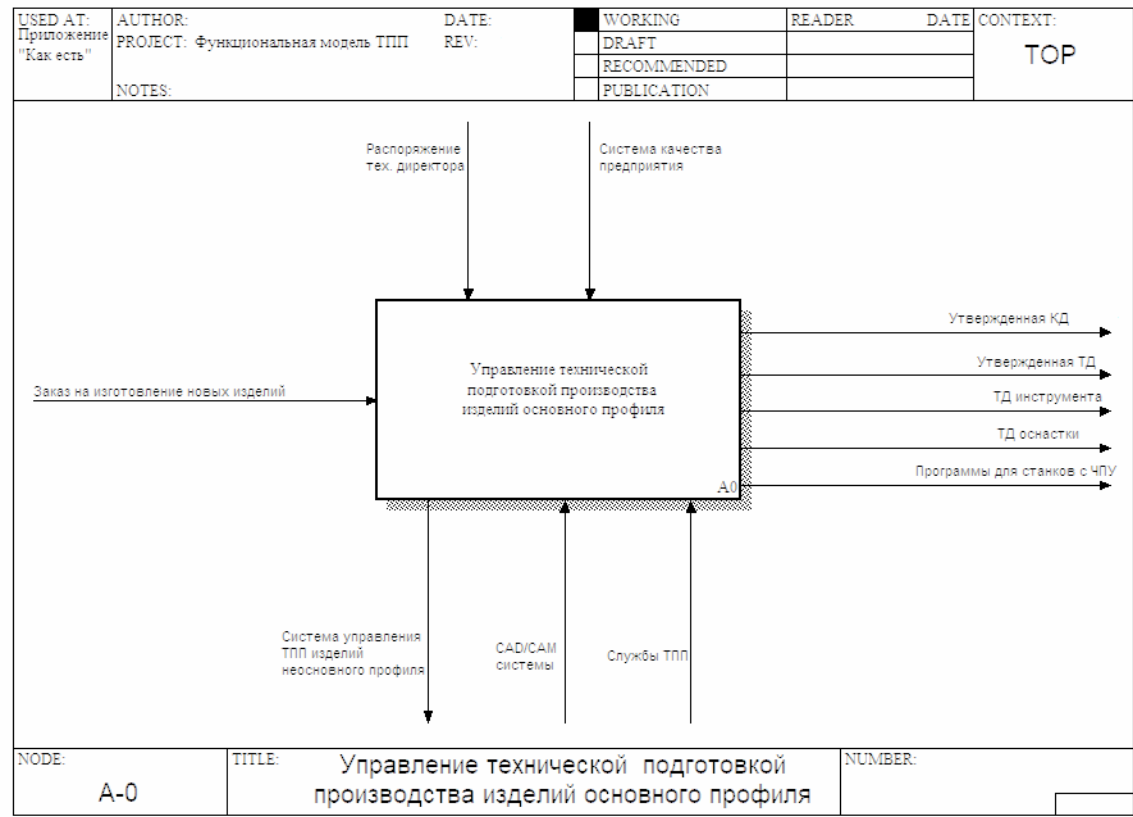


Рис. 1. Диаграмма A-0

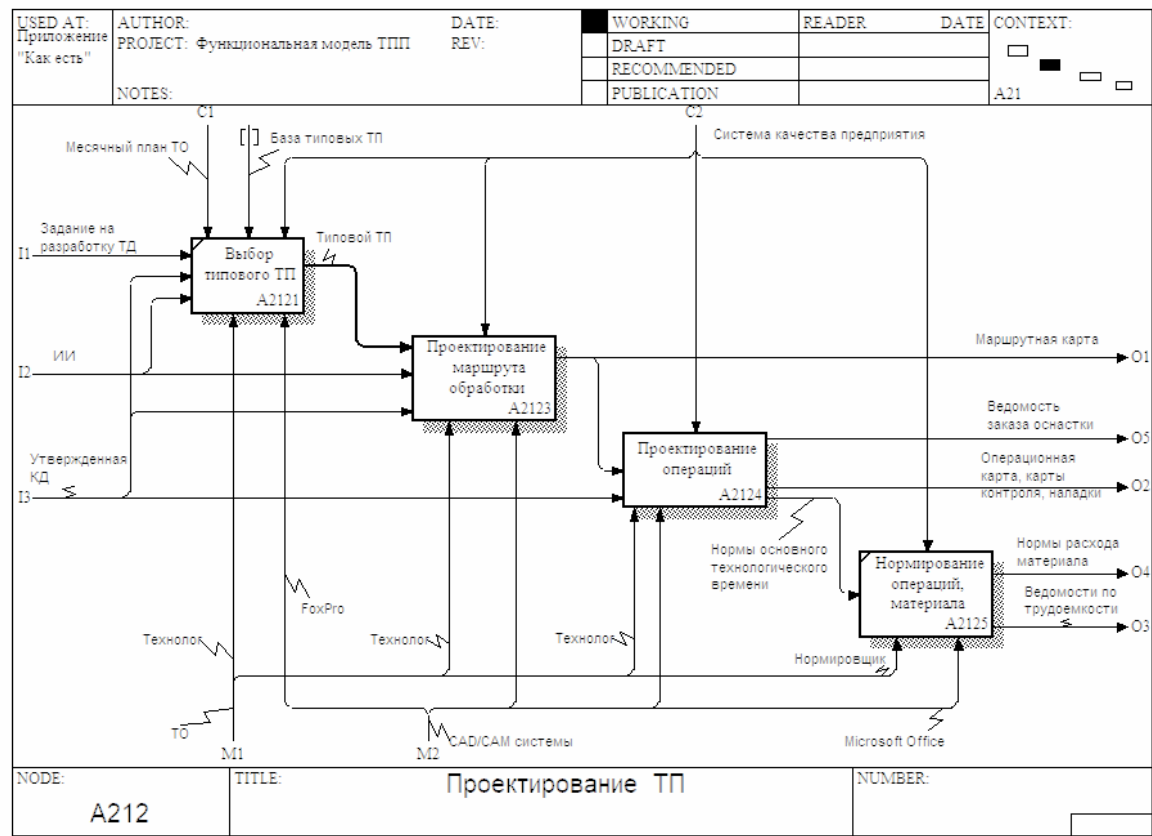


Рис. 2. Диаграмма 212

Модели «КАК ДОЛЖНО БЫТЬ» интегрируют перспективные предложения руководства и сотрудников, экспертов и системных аналитиков и позволяют сформировать видение новых рациональных технологий работы подразделения предприятия.

В результате анализа было установлено, что большинство затрат на технологическую подготовку производства относится на этап «Проектирование технологической документации», и, в частности, на процесс «Проектирование технологического процесса». Был сделан вывод, что для улучшения механизма реализации проектирования, целесообразно было бы внедрить PDM (Product Data Management)-систему.

Изменения коснулись уровня «Управление технической подготовкой производства изделий основного профиля» (обновленная диаграмма A0, представлена на рисунке 3). Помимо существующих этапов: “Конструкторская подготовка производства” и “Технологическая подготовка производства” появился новый этап – “Администрирование проектов”.

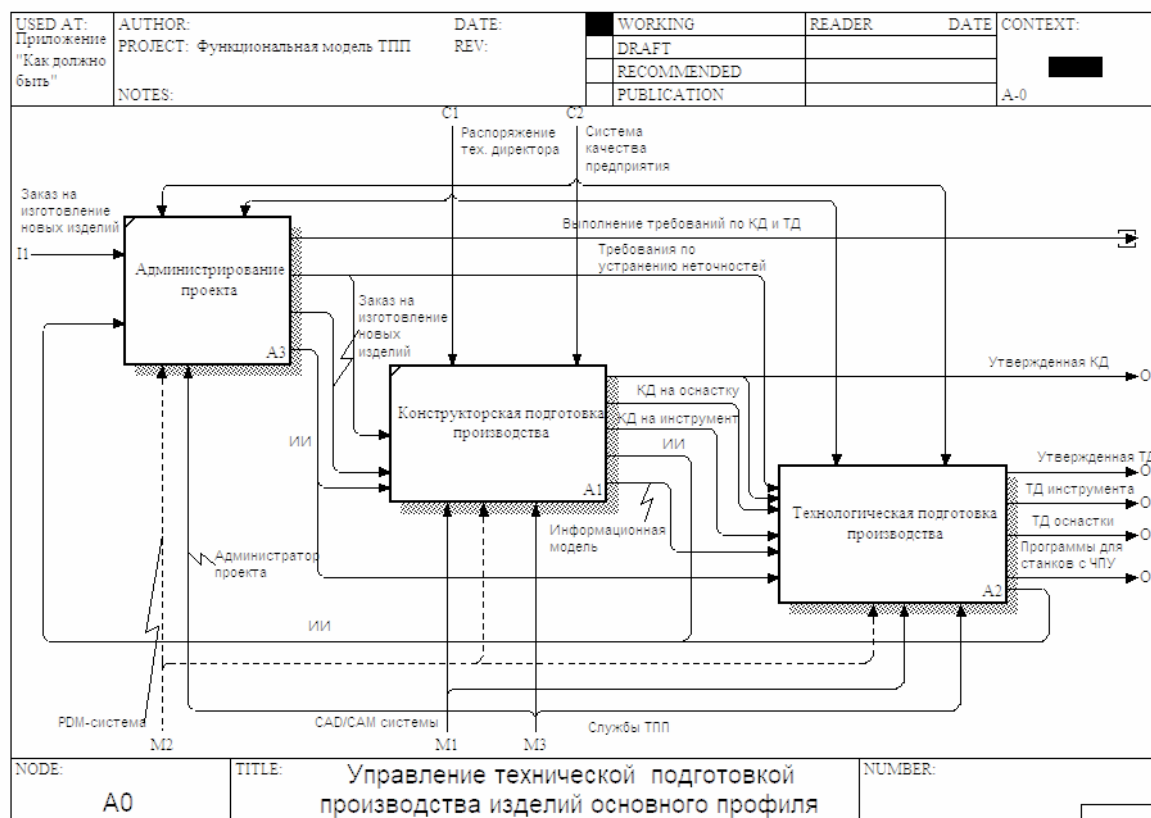


Рис. 3. Обновленная диаграмма A0

Для реализации этого этапа вводим новую должность – администратор проекта. Его задачей будет координация действий конструкторов и технологов в едином информационном пространстве, созданном внедрением PDM-системы [1, 2]. Благодаря созданию единого информационного пространства, администратор будет видеть текущую реальную картину технической подготовки производства и сможет проследить за выполнением требований по конструкторской и технологической документации [3, 4].

Список литературы

1. Дударева О.В., Аракчеев Д.В., Дударев Д.Н. Концептуальные аспекты перехода к умному производству в условиях цифровизации // Организатор производства. – 2020. – №4(28). – С. 7-15.
2. Хаймович И.Н. Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва, 2009. – 35 с.
3. Ковалькова Е.А., Хаймович И.Н. Автоматизация проектирования документоориентированных процессов конструкторско-технологической подготовки производства // Вестник Международного института рынка. – 2016. – № 1. – С. 199-205.
4. Хаймович И.Н. Применение методологии SADT при моделировании бизнес-процессов технологической подготовки производства машиностроительного предприятия // Известия Самарского научного центра РАН. – 2008. – №1. – С. 21-25.

Сведения об авторах:

Ураскин Евгений Александрович – аспирант;

Хаймович Ирина Николаевна – д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением;

Гречников Федор Александрович – аспирант.

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ГИДРО-, ПНЕВМОМОЛОТАМИ

Азимов А.М., Храпенкова Е.С.

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

Ключевые слова: горная порода, негабарит, дробление, гидромолот, пневмомолот, боек, ударный импульс.

Аннотация. Дробление негабаритов горных пород осуществляется машинами с навесным оборудованием, оснащенным пневматическим или гидравлическим молотом. Авторы ставят и решают задачу повышения эффективности дробления породы путем подбора рациональной формы поршня-бойка. По результатам экспериментального исследования установлено, что применение бойка, выполненного в форме псевдосферы, позволяет в сравнении с традиционным цилиндрическим бойком уменьшить энергию удара на 56%, что вносит значительный вклад в развитие горного машиностроения.

TO THE PROBLEM OF INCREASING THE EFFICIENCY OF CRUSHING ROCK WITH HYDRO-, PNEUMATIC HAMMERS

Azimov A.M., Khrapenkova E.S.

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

Keywords: rock, oversized, crushing, hydraulic hammer, pneumatic hammer, anvil-block, impact pulse.

Abstract. Crushing of oversized rocks is carried out by machines with attachments equipped with a pneumatic or hydraulic hammer. The authors set and solve the task of increasing the efficiency of rock crushing by selecting a rational shape of anvil-block. According to the results of an experimental research, it was found that the use of the anvil-block made in the form of a pseudosphere allows, in comparison with a traditional cylindrical anvil-block, to reduce the impact energy by 56%, which makes a significant contribution to the development of mining engineering.

Большинство технологических процессов добывающей, металлургической и строительной промышленности производятся с применением специализированных горных машин и механизмов со сменным навесным оборудованием.

Гидро-, пневмомолоты как сменное оборудование горной техники применяются в подземных и открытых разработках при буровых и вскрышных работах, активно применяются в дорожно-строительных и демонтажных работах, при строительстве зданий и сооружений, таких как мосты и тоннели. Гидро-, пневмомолоты применяются для разрушения твердых материалов в результате формирования в рабочем инструменте ударного импульса, образуемого путём нанесения удара по инструменту поршнем-бойком, который приводится в движение под воздействием давления жидкости или воздуха [1].

В условиях стремительно меняющегося миропорядка особенно актуальна задача создания новых и совершенствования существующих технологических машин и оборудования. Энергоэффективное применение машин ударного

действия при дроблении негабаритов горной породы возможно при обеспечении оптимального закона изменения амплитуды ударного импульса, который в свою очередь определяется формой ударяющего тела [2]. Именно с этой точки зрения рассматривается вопрос повышения эффективности машин ударного действия, применяемых для дробления пород высокой крепости.

Оценка эффективности бойков различных форм проводилась по результатам физического эксперимента на специально созданном стенде по принципу действия вертикального ударного копра (рис. 1).

В качестве опытных образцов (рис. 2) использовались:

- мраморные плиты размером 100x100x20 мм;
- пика-зубило гидромолота с шириной клина 40 мм;
- три ударника, выполненные в форме цилиндра постоянного поперечного сечения, конуса, псевдосферы (тело вращения трактрисы) [3], с одинаковой массой 2 кг.

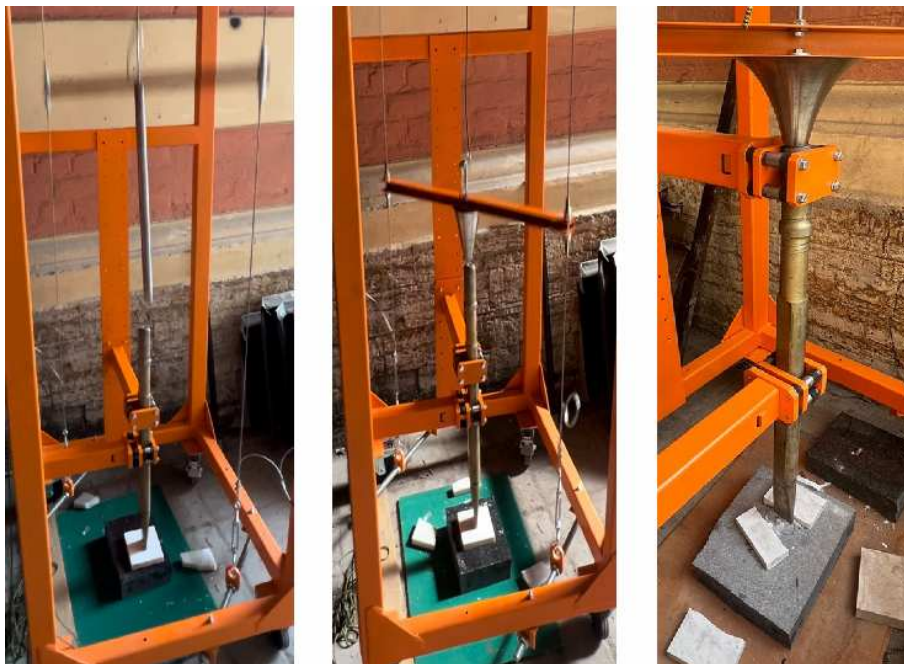


Рис. 1. Экспериментальный стенд

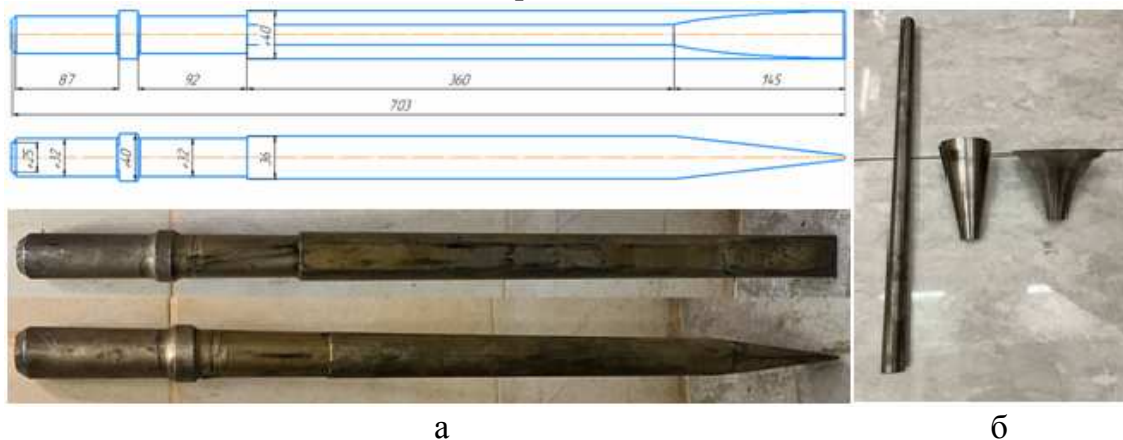


Рис. 2. Опытные образцы

В ходе эксперимента пика устанавливалась в упор к мраморной плите, за счет свободного падения бойком наносился удар по торцу пика. При этом изменялась высота сброса бойков, и фиксировался факт разрушения плиты.

Табл. 2. Результаты раскалывания опытных образцов горной породы в зависимости от высоты сброса бойков

Высота сброса, мм	Боек №1 (цилиндр)	Боек №2 (конус)	Боек №3 (трактриса)
1100	+	+	+
1050	+	+	+
1000	+	+	+
950	-	+	+
900	-	+	+
850	-	+	+
800	-	-	+
750	-	-	+
700	-	-	+
650	-	-	+
600	-	-	+
550	-	-	+
500	-	-	+
450	-	-	+
440	-	-	+
430	-	-	-
420	-	-	-

Примечание. Знак «+» означает, что исследуемый образец горной породы раскололся, знак «-» означает что образец не раскололся.

Кинетическая энергия, развиваемая бойком перед ударом:

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса ударника, кг, v – скорость ударника в момент удара, м/с.

Предударная скорость бойка определяется в зависимости от высоты сброса

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с², h – высота сброса, м.

Согласно результатам эксперимента оптимальной высотой сброса бойка является минимальная высота, при которой опытные образцы плит горной породы раскалываются:

- для цилиндрического бойка – 1000 мм;
- для конического – 850 мм,
- для бойка, образованного трактрисой, – 440 мм.

По результатам вычислений найдена величина энергии удара при оптимальной высоте сброса бойка (рис. 3):

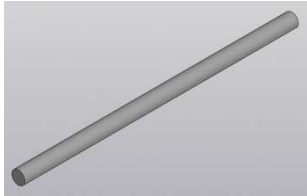
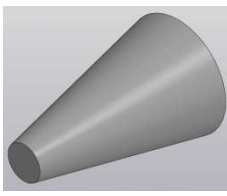
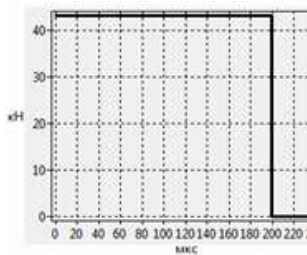
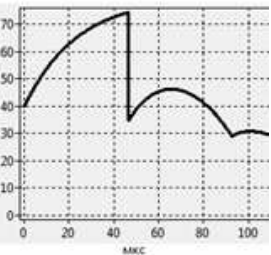
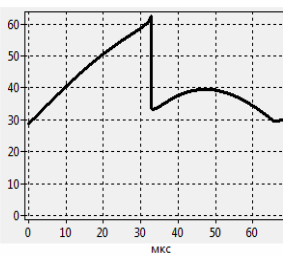
- для цилиндрического бойка – 19,62 Дж;
- для конического – 16,68 Дж;
- для бойка, образованного трактрисой, – 8,63 Дж;

В программном комплексе «Удар бойком сложной геометрической формы» (Свидетельство ПВМ №2019619495 от 18.07.2019, авторы: Тимофеев Е.Г., Жуков И.А.) были рассчитаны ударные импульсы, генерируемые опытными образцами бойков при оптимальной величине высоты сброса, параметры которых приведены в таблице 2.



Рис. 3. Энергия удара бойками: 1 – цилиндрическим, 2 – коническим, 3 – псевдосферическим

Табл. 2. Сравнительная характеристика ударных импульсов

Тип бойка	Боек №1 (цилиндр)	Боек №2 (конус)	Боек №3 (трактриса)
3D-модель			
Оптимальная высота сброса, м	1,0	0,85	0,44
Предударная скорость, м/с	4,43	4,08	2,94
Затрачиваемая энергия удара, Дж	19,62	16,68	8,63
Форма ударного импульса, $F = f(t)$			
Время первой волны, мкс	198,8	46,4	32,7
Максимальное значение силы удара, кН	43,29	74,46	62,50
$F_{\max} / F_0$	1,0	1,863	2,173

Сравнительный анализ полученных теоретических и экспериментальных данных подтверждает тот факт, что применение цилиндрического ударника заведомо ведет к увеличению энергоемкости процесса дробления горной породы. Выполнение ударника в форме конуса позволяет снизить энергию удара в сравнении с цилиндрическим бойком на 15%. А практическая реализация бойка с образующей боковой поверхности, представляющей собой трактрису в сравнении

с цилиндрическим бойком позволяет сократить энергию удара на 56%. При этом из таблицы 2 очевидно, что дробление мраморной плиты в ходе эксперимента происходило при использовании псевдосферического бойка при максимальной величине силы удара на 16% меньше, чем при ударе коническим бойком. Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность машин ударного действия определяется не только массой и скоростью ударяющего тела, т.е. кинетической энергией удара, но формой ударного импульса, зависящей от формы бойка. Следовательно, для дробления негабаритов горной породы наиболее оптимальным является линейный закон изменения амплитуды ударного импульса, который в частности реализуется путем выполнения бойка в виде тела вращения трактрисы.

Список литературы

1. Султаналиев Б.С., Еремьянц В.Э. К исследованию динамики горных и строительных машин с навесными молотами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №17-2. – С. 221-229.
2. Тимофеев Е.Г., Теплякова А.В., Жуков И.А., Голиков Н.С. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №12-2 – С. 259-271. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_257.
3. А.с. №1265038 СССР. Боек / Л.Т. Дворников, Г.В. Федотов. – Заявка №3888177 от 23.04.1985; опубл. 23.10.1986, Бюл. №39.

Сведения об авторах:

Азимов Амирхон Махмудалиевич – аспирант;
Храпенкова Екатерина Сергеевна – студент.

К РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ИНДЕНТОРА БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Алиева Л., Удальцова А.В.

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

Ключевые слова: бурение, буровой инструмент, буровая коронка, твердосплавная вставка, индентор, трактриса.

Аннотация. Твердосплавные вставки являются неотъемлемой частью бурового инструмента, применяемого для разрушения горных пород средней и высокой крепости. Их эффективность зависит от геометрической формы, которая задает распределение нагрузок и характер взаимодействия инструмента с породой. Современные разработки предполагают различные геометрические решения для повышения производительности и долговечности элементов безлезвийных буровых коронок. Данная статья содержит перечень известных запатентованных твердосплавных вставок штыревого типа. Результатом критического анализа конструкций инденторов стало новое техническое решение конструкции твердосплавной вставки, рабочая поверхность которой образована вращением плоской кривой трактрисы.

TO DEVELOP A NEW TECHNICAL SOLUTION FOR THE INDENTER OF A BLADELESS DRILLING TOOL

Alieva L., Udaltsova A.V.

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

Keywords: drilling, drilling tool, drill bit, hard-alloy pin, indenter, tractrix.

Abstract. Hard-alloy pin are an integral part of drilling tools used for the destruction of rocks of medium and high strength. Their effectiveness depends on the geometric shape, which determines the distribution of loads and the nature of the interaction of the tool with the rock. Modern developments involve various geometric solutions to increase the productivity and durability of the elements of bladeless drill bits. This article contains a list of well-known patented hard-alloy pin. The result of a critical analysis of the indenter designs was a new technical solution for the construction of a hard-alloy pin, the working surface of which is formed by rotating a flat curve of the tractrix.

Механический способ бурения шпуров и скважин, несмотря появление и постепенное развитие других способов разрушения горных пород, остается наиболее часто применяемым в практике горного дела. Это естественно обуславливает актуальность проблемы повышения эффективности бурильных машин и их элементов, в основе решения которой лежит апробация и внедрение результатов интеллектуальной деятельности.

Машины, предназначенные для бурения горных пород средней и высокой крепости, например, выносные или погружные пневмоударники, перфораторы, работают по принципу ударного или ударно-поворотного воздействия на разрушаемый объект, вследствие чего их оснащают инструментом, имеющим острых краев – безлезвийным, который чаще всего называют штыревым.

Многообразие конструктивных исполнений безлезвийных буровых коронок (рис. 1) обусловлено их областью назначения – машиной и свойствами

горной породы. Однако в любом случае рабочий элемент такого инструмента представлен вставкой (штырем, индентором), выполненным из высокопрочного твердого сплава (например, ВК-8), которые также обладают различной геометрической формой (рис. 2).



Рис. 1. Безлезвийные буровые коронки



Рис. 1. Инденторы различной формы: а – сферический, б – баллистическая, в – полубаллистическая, г – параболическая (катенид [1]), д – сферическая выпукло-вогнутая [2]

Производительность и энергоемкость процесса бурения шпуров и скважин зависят от формы рабочей поверхности коронки, формы твердосплавных вставок, их количества и схемы размещения [3]. Однако, замечено, что при проведении буровых работ наибольшее распространение получил инструмент со вставками сферической или полубаллистической формы. Тем не менее, анализ литературных источников и открытых реестров результатов интеллектуальной деятельности показывает о наличии более двух десятков уникальных технических решений (табл. 1), которые могут обрести практическое применение в ближайшей перспективе.

Анализ приведенных запатентованных технических решений позволяет ввести градацию (классификацию) геометрических параметров твердосплавных вставок, предназначенных для армирования безлезвийного бурового инструмента, по признакам, приведенным на рисунке 3.

Каждая из представленных в таблице 1 вставок по существу имеет две составляющие – это посадочный участок и рабочий участок. Посадочный участок предназначен для того, чтобы непосредственно соединить вставку с корпусом коронки. В связи этим во всех вставках, как правило, этот участок имеет цилиндрическую форму. Но в некоторых патентах она коническая, это обусловлено тем, что вставка прижимается к коронке соединительным элементом без применения операции пайки. Так вставка применяется в коронках,

обеспечивающих оперативный ремонт в результате поломки отдельных вставок, а не всей коронки.

Табл. 1. Избранные результаты патентного поиска

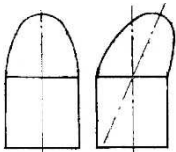
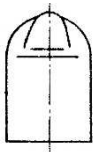
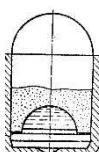
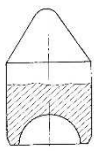
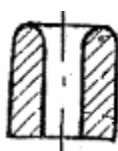
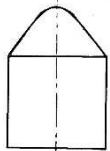
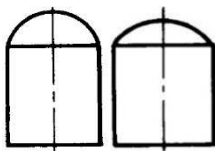
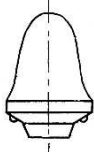
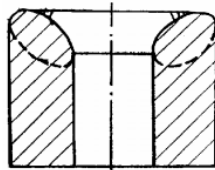
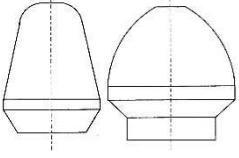
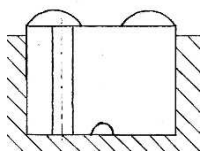
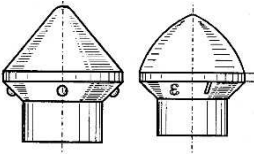
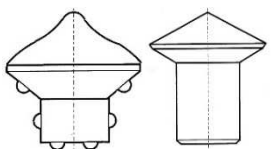
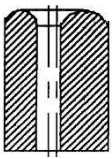
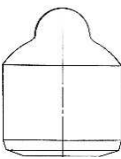
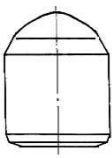
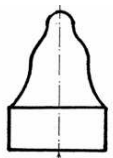
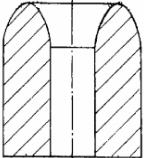
Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№1		№2	
№99401, Зубок из твердого сплава для буровых шарошек/ Клубничкин К.Ф., Ривкин Г.М., 01.01.1954.		№205743 Зуб шарошки к установке для бурения стволовых шахт/ Швец В.В., 02.12.1967.	
№3		№4	
№327326, Породоразрушающая цилиндрическая вставка/ Зыкин В. Т., Вольхин Э.А., Боярских Г.А., Сулов А.А., Нем В.Ф., Рейман Н.Н., Золотарев Г.Д., 26.01.1972.		№723118, Породоразрушающая цилиндрическая вставка/ Авдонин Ю.Ф., 25.03.1980	
№5		№6	
№977681, Породоразрушающая твердосплавная вставка / Зубарев А.В., Саркисянц Т.Х., Матвеев Г.И., Линдо Г.В., Рыжиков Ю.В., 30.11.1982		№1174553, Твердосплавный зубок для бурового инструмента/ Богомолов Р.М., Михайлин Ю.Г., Чувиллин А.М., Злобин Г.П., Бутаков Л.Г., Заварухин В.И., Волков Б.Н., 23.08.1985	
№7		№8	
№1353885, Породоразрушающая вставка/ Евсеев П.П., Иванов Р.А., Якимчук У.Н., 23.11.1987		№1778265 Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Куклин С.А., Дворников Л.Т., 30.11.1992	
№9		№10	
№1765349, Породоразрушающий инструмент/ Леванковский И.А., Глатман Л.Б., Трубицын Е.Д., Яшина Л.С., Евстешин М.П., Кантор С.И., Мелько Б.М., Осадчий В.А., Билозир Р.М., 30.09.1992		№2039192, Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Береснев А.Н., Куклин С.А., 09.07.1995	
№11		№12	
№2055189, Твердосплавная вставка для режущего инструмента/ Леванковский И.А., Гриневский Ю.А., Шульц В.Д., Александров Ю.А., 27.02.1996		№2090735, Твердосплавная вставка Дворникова-Вечужанина для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Вечужанин Д.С., 20.09.1997	

Табл. 1. Продолжение

Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема	Номер патента или авторского свидетельства, название/ авторы, дата опубликования	Схема
№13		№14	
№2098624, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента/ Бешенков Г.И., Глатман Л.Б., Гриневицкий Ю.А., Козлов Ю.Н., Леванковский И.А., Мультанов С.И., Середняков Г.П., Толстов А.В., 10.12.1997		№2105124, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента и способ ее крепления/ Прядко Ю.А., Тон В.В., Прокушенко С.И., Мельников Б.В., 20.02.1998.	
№15		№16	
№2120034, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента/ Леванковский И.А., Мультанов С.И., Шульц В.Д., Толстов А.В., Глатман Л.Б., Козлов Ю.Н., 10.10.1998		№2124126, Твердосплавная вставка для породоразрушающего инструмента горной машины/ Леванковский И.А., Козлов Ю.Н., Глатман Л.Б., Мультанов С.И., Шульц В.Д., 27.12.1998	
№17		№18	
№2160816, Твердосплавная вставка/ Бойков В.В., Дворников Л.Т., Куклин С.А., 20.12.2000		№2161685, Породоразрушающий зубок бурового долота/ Богомолов Р.М., Микроусов В.П., 10.01.2001.	
№19		№20	
№2166609, Твердосплавный породоразрушающий зубок бурового шарошечного долота/ Богомолов Р.М., Микроусов В.П., 10.05.2001		№2167993, Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф., 27.05.2001	
№21		№22	
№2200819, Вставка для породоразрушающего инструмента/ Котерев И.А., Бычков А.А., Зотов В.Е., Лузан Ю.В., Аленин Р.А., 20.03.2003		№2202030, Твердосплавная вставка для буровых коронок/ Дворников Л.Т., Вечужанин Д.С., 10.04.2003	
№23		№24	
№2462581, Породоразрушающий зубок/ Будюков Ю.Е., Кремлев В.И., Чувиллин А.М., Панин Н.М., Комаров Е.И., 27.09.2012		№225501, Продоразрушающая твердосплавная вставка/ Жуков И.А., Алиева Л., Боева А.Е., 23.04.2024	

Рабочий участок вставки, как правило, представляет собой тело вращения какой-либо плоской кривой. По результатам анализа представленных

конструкций установлено, что в качестве такой кривой используют дугу окружности, цепную линию, синусоиду, параболу, эллипсоид и др. Целесообразность использования различных кривых обуславливается тем, что при воздействии рабочим участком на породу площадь контакта непосредственно зависит от радиуса кривизны боковой поверхности этого участка в каждой точке.



Рис. 3. Классификация по результатам патентного поиска

Среди представленных в таблице 1 имеются такие вставки, у которых рабочий участок снабжен приливом, расположенным на боковой поверхности рабочего участка. Использование таких вставок позволяет увеличить износостойкость инструмента при калибровании стенок скважины. При этом, следует отметить, что такое исполнение влечет за собой необходимость контроля ориентации установки каждой вставки в корпус коронки, что естественным образом усложняет процесс технологической сборки.

Отдельно необходимо выделить вставки, которые являются полыми. Они имеют тороидальную рабочую поверхность. Однако при воздействии такой вставкой на породу площадь контакта оказывается достаточно большая. Тем не менее, особым преимуществом такого конструктивного исполнения является улучшение качества удаления буровой мелочи из шпуров, т.к. воздух или жидкость можно подавать в том числе и через сквозное отверстие вставки.

Следующий вид твердосплавных вставок используемых для армирования бурового инструмента – это инденторы с отклонением геометрической оси рабочего участка. Такие вставки чаще всего используются для оснащения периферийной части буровой коронки. Однако такое исполнение требует контролирования ориентации вставки во время сборки инструмента.

Несмотря на представленное широкое многообразие технических решений безлезвийных инденторов, повторим, что самым распространенным в реальной практике бурения вариантом вставки, является цилиндросферический (Г26, ГОСТ 880-75), в котором рабочая поверхность выполнена по участку сферы. Обладая простотой исполнения и изготовления, такие вставки имеют существенный недостаток – притуплённость рабочей поверхности. Постоянная кривизна дуги окружности в продольном сечении вставки приводит к необходимости приложения значительных контактных нагрузок для внедрения инструмента в горную породу. Это напрямую сказывается на эффективности процесса бурения и сроке службы инструмента. В связи с этим, в технологии ударного бурения распространены также твердосплавные вставки с полубаллистической рабочей поверхностью – более острой по сравнению со сферической. Однако, из-за абразивного износа и ударных нагрузок, рабочий участок такой вставки

неизбежно приобретает полусферическую форму, что резко снижает скорость бурения и увеличивает энергозатраты.

Таким образом, оптимизация геометрии твердосплавных вставок играет ключевую роль в повышении эффективности буровых инструментов и снижении затрат на их эксплуатацию.

С целью решения поставленной проблемы авторами разработано и запатентовано новое конструктивное решение твердосплавной породоразрушающей вставки (Патент РФ №225501, опубл. 23.04.2024). Рабочий участок вставки представлен телом вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через ее вершину параллельно асимптоте. Выбор именно трактрисы обусловлен её уникальными геометрическими свойствами. Трактриса – это кривая, обладающая постоянной длиной касательной от любой точки до асимптоты [4]. В отличие от полубаллистического профиля, тело вращения трактрисы при тех же габаритных размерах обладает значительно большей остротой, т.е. меньшими радиусами кривизны на рабочем участке. Это обеспечивает более эффективное разрушение породы при меньших контактных нагрузках.

Однако, острая вершина индентора является концентратором напряжений, что может привести к быстрому разрушению вставки. Для предотвращения преждевременного разрушения вставки, в её вершине выполнено скругление по дуге окружности с радиусом R , величина которого находится в диапазоне от $1/2,9$ до $1/4,5$ от диаметра индентора (d_H). Заданный интервал обусловлен предотвращением возникновения острых кромок на ранних стадиях износа, что позволяет обеспечить длительный срок службы инструмента.

Свойство постоянства длины касательной к трактрисе означает, что величина силы, действующей на рабочую поверхность вставки по касательной, остаётся неизменной вне зависимости от положения точки контакта. Следовательно, износ происходит равномерно по всей площади поверхности, изменяя форму вставки эквидистантно, что увеличивает срок службы инструмента при одновременном сохранении высокой производительности бурения.

На рисунке 4 изображена вставка, содержащая цилиндрический участок 1 и рабочий участок 2, выполненный в виде тела вращения трактрисы вокруг оси, проходящей через вершину трактрисы параллельно её асимптоте. Геометрические параметры рабочего участка вставки задаются величинами диаметра d , длины рабочего участка l_p и высоты трактрисы a . Согласно схеме (рис. 4) в выбранной системе координат можно выделить две характерные точки $A(0; a)$ – вершина трактрисы, $B(l_p; a-d/2)$ – точка пересечения образующих рабочего и посадочного цилиндрических участков вставки.

Известно уравнение трактрисы [4]:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \varphi + a \cdot \ln \tan \frac{\varphi}{2}, \\ y = a \cdot \sin \varphi; \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол между касательной к трактрисе и положительным направлением оси абсцисс ($0 < \varphi < \pi$).

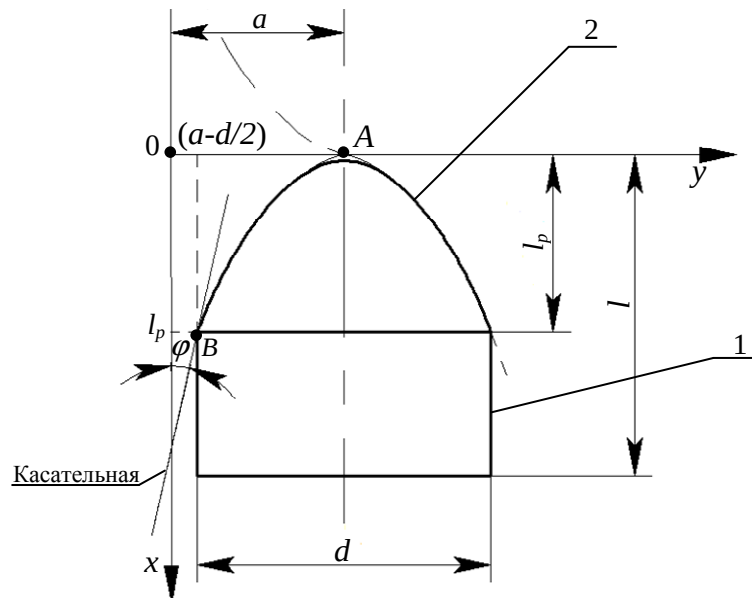


Рис. 4. Твердосплавная вставка

В зависимости от исходных данных геометрические параметры вставки могут быть найдены по результатам решения трех задач.

1. Заданы диаметр d и высота трактрисы a . Необходимо определить длину рабочего участка l_p .

С учетом координат точки $B(l_p; a-d/2)$ система уравнений (1) приобретает следующий вид

$$\begin{cases} l_p = a \cdot \cos \varphi + a \cdot \ln \tan \frac{\varphi}{2}, \\ a - \frac{d}{2} = a \cdot \sin \varphi; \end{cases} \quad (2)$$

из второго уравнения которой:

$$\varphi = \arcsin\left(1 - \frac{d}{2a}\right). \quad (3)$$

Тогда

$$l_p = a \cdot \arcsin\left(1 - \frac{d}{2a}\right) \cdot \ln \tan\left(\frac{1}{2}(\arcsin(1 - \frac{d}{2a}))\right). \quad (4)$$

2. Заданы длина рабочего участка l_p и высота трактрисы a . Необходимо определить диаметр d .

Из второго уравнения системы (2) выражаем

$$d = 2a \cdot (1 - \sin \varphi), \quad (5)$$

где расчетное значение угла φ определяется из первого уравнения системы (2).

При этом необходимо отметить, что поставленная задача может быть решена только в численном виде посредством применения программ математических пакетов, например, Maple.

3. Заданы диаметр d и длина рабочего участка l_p . Необходимо определить высоту трактрисы a .

Из второго уравнения системы (2) имеем

$$a = \frac{d}{2(1 - \sin \varphi)}. \quad (6)$$

подставляя которое в первое уравнение системы (2) получаем

$$l_p = \frac{d \cdot \cos \varphi}{2(1 - \sin \varphi)} + \frac{d \cdot \ln \tan \varphi}{2(1 - \sin \varphi)}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) в численном виде определяется расчетная величина угла φ , подставляемая в уравнение (6).

Таким образом, новая вставка может быть сконструирована из трех различных исходных условий.

Экспериментальными исследованиями установлено, что применение вставок, выполненных по трактрисе, обеспечивает увеличение объема разрушения породы в среднем на 40% в сравнении с традиционными полусферическими, однако глубина внедрения за один удар при этом увеличивается лишь на 10%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что новое техническое решение безлезвийного инструмента позволяет не только повысить производительность ударно-поворотного бурения и увеличить срок службы инструмента, но и сократить расход твердого сплава, уменьшив тем самым себестоимость инструмента.

Список литературы

1. Патент №2347885 РФ. Твердосплавная вставка – катенид / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков. – Заявка №2007123865 от 25.06.2007; опубл. 27.02.2009; Бюл. №6.
2. Патент №2167993 РФ. Твердосплавная вставка для буровых коронок / Л.Т. Дворников, Е.Ф. Губанов. – Заявка №99123820 от 10.11.1999; опубл. 27.05.2001; Бюл. №15.
3. Алиева Л., Жуков И.А. Анализ конструкций безлезвийного бурового инструмента и постановка проблем его совершенствования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 157-170. – doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-157-170.
4. Бойко В.С. Трактриса в науке и технике // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: НИЦ МС, 2021. – №4. – С. 27-31.

Сведения об авторах:

Алиева Лейла – аспирант;

Удальцова Алина Валерьевна – студент.

АВТОМОБИЛЬ БЕЗ КОРОБКИ СКОРОСТЕЙ И МЕХАНИЗМА СЦЕПЛЕНИЯ

Хадеев Р.Г.

Обнинск

Ключевые слова: планетарный дифференциал, машина двойного вращения, передаточное отношение, крутящий момент.

Аннотация. В статье рассматривается конструкция электромеханической трансмиссии, в которой принцип согласования скорости движения и оборотов мотора отличается от применяемых в настоящее время. Предлагаемый механизм, а в широких пределах, автоматически изменяет передаточное отношение от мотора к ведомому валу, что позволяет мотору в процессе всей эксплуатации работать на оптимальных режимах. При этом происходит сравнение силы потребной для движения транспортного средства с силой Ампера, возникающей при работе генератора.

CAR WITHOUT A GEARBOX AND CLUTCH MECHANISM

Khadeev R.G.

Obninsk

Keywords: planetary differential, double-rotation machine, gear ratio, torque.

Abstract. The article examines the design of an electromechanical transmission in which the principle of matching the speed of movement and engine speed differs from those currently used. The proposed mechanism, in a wide range, automatically changes the gear ratio from the motor to the driven shaft, which allows the motor to operate in optimal modes throughout its operation. In this case, a comparison is made of the force required to move the vehicle with the Ampere force that occurs when the generator is running.

Схема трансмиссии проста и надежна. Она позволяет использовать энергию двигателя в полной мере с момента старта на экономичном режиме и на оптимальных оборотах работы двигателя. Её схема настораживает, нет коробки скоростей и стартера, не требуется и механизм сцепления [1]. Её передаточное отношение изменяется в очень широких пределах, в момент старта двигатель работает на оптимальных оборотах, а на ведомом валу действует максимальный крутящий момент. При этом не растут потери. КПД выше наиболее технологичных, применяемых в настоящее время трансмиссий, и не сильно уменьшается в процессе эксплуатации. Также такую трансмиссию легко и без усложнения можно использовать как одноканальную антиблокировочную и антипробуксовочную систему. На рисунке 1 показана её схема.

Вал привода 1 соединен с установленными на нем ротором электродвигателя 2, ротором генератора 5 и центральной шестерней планетарного дифференциала 10. Один выход дифференциала, его водило 9 с сателлитами 8, соединен с ведомым валом 11 и передает на вал вращение, а второй выход дифференциала, его венец 7 свободно вращается на валу привода и соединен со статором генератора 6. Статор генератора 6 и его ротор 5 образуют машину двойного вращения. При необходимости второй выход дифференциала и

соединенный с ним статор, могут фиксироваться муфтой 4, соединяющей его с корпусом. Статор электродвигателя 3 установлен на корпусе и соединен с ним. При вращении вала привода 1, водило 9 вращается в ту же сторону, но увеличивает крутящий момент и уменьшает обороты ведомого вала 11 пропорционально передаточному отношению планетарного дифференциала. Второй выход дифференциала, его венец 7, стремится вращаться в обратную сторону, но если в цепи генератора есть электрическая нагрузка, то возникает электроиндукционная сила, увлекающая статор 6 за ротором 5 и частично блокирует дифференциал, увеличивая скорость вращения ведомого вала 11. При увеличении нагрузки на ведомом валу, он тормозится, скольжение между ротором и статором увеличивается.

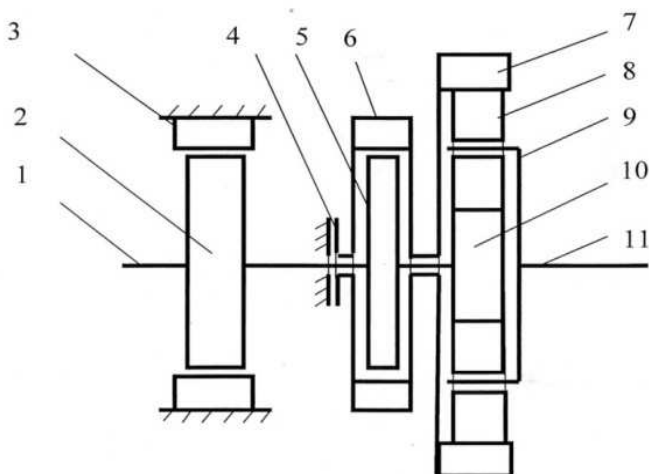


Рис. 1. Схема трансмиссии: 1 – вал привода; 2 – ротор электродвигателя; 3 – статор электродвигателя; 4 – муфта; 5 – ротор генератора; 6 – статор генератора; 7 – венец планетарного дифференциала; 8 – сателлиты; 9 – водило; 10 – центральное колесо; 11 – ведомый вал

Нет коробки скоростей. На современных транспортных средствах используется сложное устройство с переключением зацеплений, изменяющих крутящий момент и передаточное отношение. Выполняется это в столь ограниченных пределах, что согласовывать скорость движения и работу мотора приходится при помощи изменения скорости его вращения, что приводит к работе на не экономичных режимах. О проблемах работы трансмиссии с вариатором также можно долго говорить.

Предлагаемая конструкция, при работе двигателя на оптимальных оборотах изменяет передаточное отношение в пределах всего диапазона без потерь. Когда автомобиль неподвижен, после пуска двигателя, статор генератора, соединенный с одним из плеч планетарного дифференциала, свободно вращается в обратную сторону, а второе его плечо, связанное с ведомым валом неподвижно. В электрической цепи генератора нет тока, поэтому сцепления ротора и статора генератора нет. Мощность на ведомый вал от двигателя не передается. Для начала движения генератор подключается к электрической нагрузке. При этом возникающая сила Ампера создает силу сцепления статора и ротора частично блокирует дифференциал, и второе плечо дифференциала передает вращение на ведомый вал. Механизм сцепления не требуется. Планетарный дифференциал асимметричен, сила, которая передается вторым плечом дифференциала на

ведомый вал, значительно превышает силу сцепления между статором и ротором, действующую на первое плечо дифференциала, соединенное с генератором. Изменяя электрическую нагрузку в цепи генератора, изменяя силу сцепления в генераторе, можно изменять силу, действующую во втором плече дифференциала, которое приводит автомобиль в движение. При этом в зависимости от соотношения силы сцепления между статором и ротором генератора, и силы, необходимой для осуществления движения автомобиля, автоматически происходит регулирование передаточного отношения. При постоянной электрической нагрузке в цепи генератора, но при увеличении потребной нагрузки на ведомом валу, он тормозится, тормозится плечо дифференциала, а скорость вращения второго плеча увеличивается, происходит увеличение передаточного отношения от двигателя к ведомому валу, скорость автомобиля уменьшается, а при уменьшении сопротивления движению, передаточное отношение автоматически уменьшается и автомобиль разгоняется. Изменяя электрическую нагрузку в цепи генератора можно изменять соотношение сил в плечах дифференциала и, таким образом управлять разгоном или уменьшением скорости движения.

Потери в такой трансмиссии в основном состоят из потерь в электрической цепи генератора, которые для генераторов такой мощности в настоящее время составляют восемьдесят пять процентов. Только пятнадцать процентов от той доли мощности двигателя, которая потребляется генератором, что составляет максимально пять с половиной процентов. Если добавить потери в планетарном дифференциале и уплотнениях, то это всё равно меньше, чем тратится в современных трансмиссиях. Это без учета того, что в процессе эксплуатации её КПД достаточно быстро падает.

Электрический ток от генератора поступает на потребители транспортного средства, в том числе на ротор электродвигателя 2, который совместно с мотором вращает вал привода 1, компенсируя его затраты на производство электрического тока, вырабатываемого при работе трансмиссии. Этот электродвигатель также может использоваться для пуска мотора, так что стартер такому автомобилю не нужен. При энергичном старте или разгоне электрический ток может быть использован для питания электродвигателей, установленных на колесах, которые не подключены к этой трансмиссии. Достаточное количество вырабатываемого электричества позволит перевести на электрический привод турбонагнетатель, что оптимизирует работу двигателя после его пуска, а также другие потребители.

Так как двигатель работает на оптимальном режиме от старта, и нет механизма сцепления, то крутящий момент на ведомом валу необходимо ограничивать, чтобы не допустить поломки трансмиссии. Оптимальная величина передаточного отношения в планетарном дифференциале равна 2,6 что подробно описано в [2]. Это позволяет при отсутствии механизма сцепления и оптимальном режиме работы производить динамичный старт и разгон автомобиля. Конструктивно такая трансмиссия может быть исполнена иначе. Например, в конструкцию может быть добавлен планетарный ряд для включения заднего хода. Можно применить схему, показанную в [2]. Подробное описание такой трансмиссии представлено в [3].

Управляя током в цепи генератора, можно использовать такую трансмиссию как одноканальную, связанную с обоими ведущими колесами, антиблокировочную и антипробуксовочную систему. Реагирование электрического сигнала на порядок выше гидравлического, поэтому её работа будет более точной и правильной, при этом не потребуется никаких устройств, только блок электрического реагирования на сигнал датчиков. Для этого нужно предусмотреть возможность кратковременного отключения генератора от электрической нагрузки в его цепи по сигналу от датчика.

Такая трансмиссия вполне может быть установлена и на транспортное средство, не считающееся гибридным, для упрощения конструкции и повышения экономичности, с мотором любого типа. Ещё нужно учесть то, что в настоящее время усложнился процесс покупки запасных частей на транспорт иностранного производства, особенно транспорт коммерческий. Можно заменить большую часть трансмиссии таким механизмом.

Список литературы

1. Патент №2788457 РФ. Электромеханическая трансмиссия для гибридного транспорта / Р.Г. Хадеев. – Заявка №2022123763 от 05.09.2022; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2.
2. Хадеев Р.Г. Гибридный автомобиль // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб.: НИЦ МС, 2023. – № 6. – С. 37-41.
3. Патент №2806767 РФ. Электромеханическая трансмиссия для гибридного транспорта / Р.Г. Хадеев. – Заявка №2023102910 от 08.02.2023; опубл. 07.11.2023, Бюл. №30.

Сведения об авторе:

Хадеев Равиль Гафиевич – к.т.н.

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ

Андрейчук Н.А.

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

Ключевые слова: станки с числовым программным управлением, волоконно-оптические датчики на Брэгговских решётках, температурные погрешности станков, автоматизация технологических процессов, математические модели прогнозирования.

Аннотация. В данной работе приводится описание метода контроля температуры станков с помощью оптоволоконных датчиков, рассмотрены конкретные примеры использования данного метода и его проблемы и предложены направления для дальнейших исследований. Целью данного исследования является разработка автоматизированной системы для мониторинга температурных погрешностей станков. Актуальность работы связана с важностью автоматизации производства и рассмотрения температурных значений как отдельных параметров погрешностей.

MONITORING OF TEMPERATURE ERRORS OF NUMERICALLY CONTROLLED MACHINES USING FIBER-OPTIC SENSORS ON BRAGG GRATINGS

Andreichuk N.A.

Empress Catherine II Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg

Keywords: computer numerical control machines, fiber-optic sensors on Bragg gratings, temperature errors of machines, process automation system, mathematical forecasting models.

Abstract. This paper describes a method for controlling machine temperature using fiber-optic sensors, discusses specific examples of using this method and its problems, and suggests directions for further research. The purpose of this study is to develop an automated system for monitoring machine temperature errors. The relevance of the work is related to the importance of automation of production and consideration of temperature values as separate error parameters.

Тепловая деформация конструкционных элементов станков с числовым программным управлением (ЧПУ) значительно влияет на качество изготавливаемых деталей. Около 40%-70% всех неточностей при обработке приходится на тепловые погрешности [1]. Однако существующие системы обратной связи и мониторинга состояния станков зачастую не измеряют температурные показатели как отдельные составляющие. Таким образом, актуальной задачей является разработка системы, позволяющей измерять температурные показатели во время работы станка и на основе этих данных нивелировать температурные погрешности. Это, в свою очередь, открывает новые возможности в проектировании автоматизированных систем.

На данный момент существует довольно много методов контроля температуры поверхности элементов станков, которые можно разделить на

контактные и бесконтактные. К бесконтактным можно отнести измерения с помощью тепловизоров, а к контактным — использование термопар и других электронных датчиков, которые крепятся на различных поверхностях станка.

Однако у данных методов имеются значительные недостатки. У тепловизионного контроля — сложная реализация по отношению к автоматизации довольно высокая стоимость необходимого оборудования и наличие высокой квалификации у работников для правильного анализа полученных данных. У термопар в свою очередь — высокие требования к безопасности, низкая устойчивость к электромагнитным помехам и сложность в установке из-за большого количества самих датчиков и проводов к ним. Особенно остро все описанные выше проблемы влияют на сложность реализации системы контроля на тяжелых станках ЧПУ.

Одной из альтернатив являются волоконно-оптические датчики температуры на Брэгговских решётках (ВБР). В отличие от электрических датчиков, они являются более компактными, надёжными и имеют широкий диапазон измеряемых температур. Кроме того, область применения датчиков на ВБР не ограничивается измерением температуры. Данные датчики могут измерять не только температурные деформации. Примером может послужить опыт Бозетти и др. в 2012 году [2]. Учёные применили систему измерения сетчатого смещения, основанную на датчиках ВБР, для реализации мониторинга деформации участка тяжёлого станка.

Если говорить об исследованиях, которые уже проводились в области мониторинга температуры станков, то стоит упомянуть опыт Хуанга и его коллег, которые измерили температурное поле на поверхности тяжёлого станка с помощью датчиков ВБР [3]. Объектом контроля являлся тяжёлый станок, и в результате были представлены данные, описывающие зависимости отклонений режущей кромки инструмента по трём осям координат и температурных показателей как внешней среды, так и поверхностей станка.

Другое исследование демонстрирует возможности контроля температур с помощью волоконно-оптических датчиков ВБР внутри конструкции станка с ЧПУ. Донг и др. встроили шесть оптоволоконных датчиков, соединённых в одно волокно, в корпус станка [4]. Эти датчики были установлены на поверхности внешнего кольца переднего подшипника шпинделя. Таким образом, при работе станка можно определить потери на трение, равномерность распределения температурного поля внешнего кольца и зависимость между нагрузкой элемента и его температурой.

Однако для разработки автоматизированной системы недостаточно измерить показатели температуры. Необходимо учесть все значимые погрешности измерений и построить достоверную и информативную математическую модель, позволяющую проводить обработку информации в реальном времени.

Для реализации такой системы прогнозирования и нивелирования погрешностей, в данном случае, необходимы модели на нечеткой логике, так как зависимость между температурами станка из различных точек и отклонениями по осям чётко не выражена. Модели множественной линейной регрессии,

генетического алгоритма и искусственной нейронной сети и т. д. могут подойти для решения данной задачи. Любая из данных моделей требует проведения многократных измерений для получения исходных данных с высокой достоверностью.

Для проведения исследования на данную тематику составляется план эксперимента, определяются подходящие методы составления математических моделей для работы в условиях неопределённости, определяются элементы станков, находящихся в учебной лаборатории кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, измерения температуры которых послужат источником исходных данных, и, совместно с Лабораторией записи волоконных Брэгговских решёток университета ИТМО, обсуждается использование отечественных датчиков ВБР. На данный момент получены данные об аппаратуре, которая используется сотрудниками ИТМО и рассматривается ее применение в потенциальном эксперименте.

Таким образом, мониторинг температурных погрешностей станков с числовым программным управлением с помощью волоконно-оптических датчиков на Брэгговских решётках представляет собой перспективное направление для исследований не только в качестве нового физического метода получения данных, но и в качестве обработки этих самых данных и построения различных математических моделей. Всё это, в условиях стремительно развивающегося производства, повышения требований к качеству изготавливаемых деталей и автоматизации технологических процессов, имеет большое значение в индустрии 4.0

Список литературы

1. Bryan J. International status of thermal error research // CIRP Annals–Manufacturing Technology. 1990, vol. 39, no. 2, pp. 645-656.
2. Bosetti P., Bruschi S. Enhancing positioning accuracy of CNC machine tools by means of direct measurement of deformation // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012, vol. 58, no. 5-8, pp. 651-662.
3. Huang J., Zhou Z. D., Liu M. Y. et al. Real-time measurement of temperature field in heavy-duty machine tools using fiber Bragg grating sensors and analysis of thermal shift errors // Mechatronics. 2015, vol. 31, pp. 16-21.
4. Dong Y.F., Zhou Z.D., Liu Z.C. et al. Temperature field measurement of spindle ball bearing under radial force based on fiber Bragg grating sensors // Advances in Mechanical Engineering. 2015, vol. 7, no. 12, pp. 1-6.

Сведения об авторе:

Андрейчук Никита Александрович – студент.

РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА В МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ: ИННОВАЦИИ И ПРАКТИКА

Злотников Е.Г., Гильвитинов М.О., Дзюба А.А.

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

Ключевые слова: металлообработка, режущая керамика, структура керамики, износостойкость, трещиностойкость, ударная прочность.

Аннотация. Целью данной работы является обзор современных достижений в области инструментальной режущей керамики, включая её преимущества перед традиционными материалами, классификацию и новые разработки, включая слоистую композиционную керамику, которая демонстрирует улучшенные механические свойства. Анализируются практические аспекты применения, основные проблемы и перспективы развития данного направления.

CUTTING CERAMICS IN METALWORKING: INNOVATIONS AND PRACTICE

Zlotnikov E.G., Gilvitinov M.O., Dzyuba A.A.

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

Keywords: metalworking, cutting ceramics, ceramic structure, wear resistance, crack resistance, impact strength.

Abstract. The purpose of this work is to review modern advances in the field of tool cutting ceramics, including its advantages over traditional materials, classification and new developments, including layered composite ceramics, which demonstrate improved mechanical properties. The practical aspects of the application, the main problems and prospects for the development of this area are analyzed.

Рост требований к точности и производительности в машиностроении диктует необходимость внедрения высокоэффективных инструментальных материалов, способных выдерживать повышенные нагрузки, сложные условия резания и работать с труднообрабатываемыми материалами. Режущая керамика занимает ключевое место в этом процессе благодаря её уникальным свойствам.

Современное машиностроение сталкивается с необходимостью обрабатывать высокопрочные, закалённые стали, титановые и никелевые сплавы, особенно в таких отраслях, как авиация, автомобилестроение и энергетика. Эти материалы характеризуются высокой твёрдостью, низкими теплопроводностью и химической активностью, что приводит к быстрому износу традиционных инструментов, изготовленных из быстрорежущей стали или твёрдых сплавов [1].

Режущая керамика обладает рядом преимуществ, которые делают её перспективным материалом для инструментов металлообработки. В отличие от традиционных материалов, таких как быстрорежущая сталь и твёрдые сплавы (карбиды), керамика демонстрирует: высокую твёрдость (до 96 HRA), что обеспечивает устойчивость к абразивному износу даже при обработке твёрдых и закалённых материалов, теплостойкость (керамика сохраняет свои свойства при температурах до 1200-1400°C), что позволяет использовать её в сухой обработке,

давая возможность производить резание без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), химическую инертность, которая предотвращает адгезионный износ, особенно при обработке никелевых и титановых сплавов [2].

Режущая керамика классифицируется по своему составу, что определяет её механические свойства и области применения. Оксидная керамика (белая керамика) применяется при точении нетермообработанных сталей и чугунов методом однолезвийной обработки на высоких скоростях без вибраций. Характеризуется высокой твёрдостью (до 86 HRA) и устойчивостью к окислению. На производстве распространены марки: BO-13, BШ-75, HC1 и CC650.

Нитридная керамика (Si_3N_4) представляет собой основу на нитриде кремния с добавлением оксидов различных металлов. Данная керамика применяется для чистовой и получистовой обработки чугунов, сплавов на основе никеля и кобальта и алюминиевых сплавов. Отличается высокой вязкостью разрушения, термостойкостью и стойкостью. Обладает еще большей твердостью (91-93 HRA), чем керамика на основе оксида алюминия. На производстве распространены марки: РК-30 (силинит-Р), ТВИН-200, SN300, SN400, SN800, AS10.

Оксидно-карбидную керамику (черная керамика) отличает чрезвычайно высокая твёрдость (до 96 HRA) и стойкость к износу. Применяется в условиях работы с жаропрочными, реактивными материалами (титановые сплавы) и для прерывистой обработки ковких, высокопрочных, отбеленных, модифицированных чугунов, сталей, закаленных до 30-65 HRC. На производстве распространены марки: В-3, ВОК-63, ВОК-71, HC2, HC4, ST100, ST300, SZ300.

Область применения белой, черной керамики ограничена низкими прочностью на изгиб и трещиностойкостью. При резании с чередующимися механическими и термическими нагрузками может произойти образование микротрещин, рост которых может привести к полному разрушению инструмента [3]. Поэтому разработка материала в виде слоистого композита, предназначенного для объединения свойств карбидов, керамики и нанопокровов в одном и том же режущем инструменте, является актуальной. Слоистая композиционная керамика представляет собой сочетание прочной твердосплавной подложки и одного или нескольких слоёв керамического режущего материала. Высокая ударная вязкость (за счёт добавления армирующих фаз, например, оксида циркония), высокая износостойкость, термостойкость и устойчивость к химическим реакциям положительно выделяют слоистую керамику. На данный момент в российской промышленности уже применяется инструмент марки ВОКС-300 с указанной технологией для обработки жаропрочных, труднообрабатываемых материалов, а также для прерывистой обработки закаленной стали. Стоит отметить, что в данный момент идут активные разработки новых слоистых материалов с применением нанотехнологий. Одним из таких покрытий является материал на основе комбинированных слоев нитридов хрома, алюминия, кремния ($\text{Cr,Al,Si} \text{N}$) со слоем алмазоподобного покрытия (АПП) [4]. В зависимости от содержания кремния в процентном соотношении в слое АПП меняются физико-механические свойств. В таблице 1 представлен сравнительный анализ физико-механических свойств инструментальных материалов.

Табл. 1. Физико-механические свойства материалов

Материал	Трещиностойкость (МПа·м ^{1/2})	Коэффициент трения	Износостойкость	Ударная прочность
ВО-13	5-6	-	Очень высокая	Низкая
РК-30	6-7	-	Очень высокая	Низкая
ВОКС-300	7-8	0,3-0,4	Очень высокая	Средняя
(Cr,Al,Si)N-АПП (Si 35%)	8-9	0,15	Высокая	Высокая

Покрытие на основе комбинированных слоев нитридов хрома, алюминия, кремния и слоем АПП имеет очень высокую твердость относительно других материалов. Также покрытие имеет сравнительно низкий модуль упругости и склонен к поглощению энергии удара, что снижает вероятность трещинообразования. Силиконовая модификация (АПП-Si) улучшает эластичность АПП-слоя, что положительно сказывается на способности покрытия воспринимать динамические нагрузки. Многослойная структура позволяет равномерно распределять напряжения между слоями. Это уменьшает вероятность появления крупных трещин и продлевает срок службы покрытия. Прочные межслойные связи между (Cr,Al,Si)N и АПП -Si слоями предотвращают их отслаивание, даже при ударных нагрузках.

В заключение следует отметить, что, материалы типа (Cr,Al,Si)N-(АПП-Si) показали превосходство в трещиностойкости, снижении коэффициента трения и устойчивости к динамическим нагрузкам по сравнению с традиционными керамическими инструментами, включая ВОКС-300. Успешная интеграция новых технологий многослойных покрытий, позволит продлить срок службы инструмента и повысить его надежность в экстремальных условиях обработки, а также планомерно вытеснить устаревшие материалы.

Список литературы

1. Максаров В.В., Халимоненко А.Д., Горшков И.В. Влияние структурных параметров режущей керамики на качество обработки при селективном формировании инструментального оснащения // Металлообработка. – 2020. – №115. – С. 54-62. – <https://polytechnics.ru/shop/product-details/495-metallroobrabotka-1-115-2020.html>.
2. Максаров В.В., Халимоненко А.Д., Ольт Ю., Лаатсит Т. Управление работоспособностью режущего инструмента, оснащенного сменными пластинами из режущей керамики // Металлообработка. – 2008. – №6 (48). – С. 50-58. – <https://doi.org/10.25960/mo.2020.1.54>.
3. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Volosova M.A. et al. Nano-scale multi-layered coatings for improved efficiency of ceramic cutting tools // Int J Adv Manuf Technol. 2017, 90, pp.27-43. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9353-2>.
4. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Vereschaka A.A., Sitnikov N.N., Milovich F., Bublikov J.I., Fyodorov S.V., Seleznev A.E. Properties of (Cr,Al,Si)N-(DLC-Si) composite coatings deposited on a cutting ceramic substrate // Ceramics International. 2020, vol. 46, Iss. 11, part A, pp. 18241-18255. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.147>.

Сведения об авторах:

Злотников Евгений Глебович – к.т.н., доцент кафедры машиностроения;

Гильвитинов Михаил Олегович – студент;

Дзюба Александр Александрович – студент.

Научное периодическое издание

Механика и машиностроение. Наука и практика:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№7

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 10,23.

Подписано в печать 27.11.2024г. Заказ №24-25.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/mimnip.html>
<https://doi.org/10.26160/2658-6185-2024-7>

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

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

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

E-mail: info@srcms.ru