

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Орловский государственный аграрный университет

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

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Кыргызский национальный университет им. Жусупа Баласагына

ISSN 2618-6810

МАШИНОСТРОЕНИЕ: ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№7

Санкт-Петербург, 2024

УДК 62 : 001.8895

ББК 34.41

М38

М38 **Машиностроение: инновационные аспекты развития:**
Материалы международной научно-практической конференции.
– Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – № 7. – 98 с. – DOI:
10.26160/2618-6810-2024-7.

Представлены материалы VII международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (29 марта 2024г.). Направления работы конференции: 1) Машиноведение; 2) Тяжелое машиностроение; 3) Общее машиностроение; 4) Среднее машиностроение; 5) Точное машиностроение; 6) Ремонт машин и оборудования; 7) Смежные вопросы развития машиностроения; 8) Современные проблемы инженерного образования.

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

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/miar.html>
<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2024-7>

ISSN 2618-6810

© Авторы, 2024
© НИЦ МС, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Машиноведение

- Хакимов У.А., Юлдашева Ш.А.** Расчет крутящего момента на ведущем валу микроГЭС.....5
- Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В., Ерошков В.Ю.** Проектирование редуктора планетарно-дифференциального9

Тяжелое машиностроение

- Кайгородов С.Ю., Руменко Д.Н., Харахордина А.Ю.** Вихревые диоды..... 13
- Мележик Р.С., Власенко Д.А.** Экспериментальные исследования динамики четырехвалковой дробилки в производственных условиях..... 18
- Андрианов И.К., Чепурнова Е.К., Чернышова Д.В., Солецкий В.В.** Оценка напряженного состояния турбинной лопатки при наклонном расположении капсул в системе обнаружения повреждений методом конечных элементов 22
- Власенко Д.А.** Модернизация роторной зубчатой дробилки в условиях агломерационного производства АМК ООО «ЮГМК» 25
- Астапенко Э.С., Кахиев Р.Н.** Усилия, действующие на электрод дуговой сталеплавильной печи, при его упоре в шихту..... 29

Общее машиностроение

- Князев А.В., Бородин Н.А., Ткачев В.В., Поздняков Е.В., Доманин К.А.** Аналитические исследования конструктивных параметров многоступенчатого вальцового сепаратора для сортирования лесных семян..... 34
- Семенов Д.А., Воронцов И.И.** Повышение производительности вилочного погрузчика с помощью поворотного механизма..... 38
- Бирюков В.П., Якубовский А.А., Горюнов Я.А.** Влияние состава полимерных материалов на износостойкость при трении закрепленным абразивным зерном..... 42
- Бирюков В.П.** Повышение износостойкости стали при лазерной закалке кромки образцов..... 45
- Нгуен В.Д.** Проблемы, возникающие при механической обработке. Требования, предъявляемые к обеспечению качества обрабатываемой поверхности 49

Соловьев И.В., Михайлов А.В. Анализ грейферной выемки волокнистого торфяного сырья	54
Метелкин А.А., Столбов А.М., Тимофеев М.В. Разработка алгоритма управления роботизированным комплексом шлифования пера лопаток вентилятора газотурбинного двигателя.....	58
Гараников В.В., Корнильев Е.О. Ползучесть конструкционных материалов при циклическом изменении напряжений и деформации	63

Среднее машиностроение

Долгоносков В.К., Род В.А., Варакина С.В., Кондратов А.П. Деформационная и тензочувствительность полимерных тензодатчиков.....	67
Жуков М.Е., Сеницына Ю.В. Актуальность оценки крутильной жесткости планетарно-цевочного редуктора на точность позиционирования руки робота	70
Медовщиков А.В. Разработка экспериментальной установки для исследования контактной усталости при реверсивном линейном движении.....	73

Ремонт машин и оборудования

Бураева Г.М., Шистеев А.В., Бураев М.К. Ремонт опорных роликов ходовой части гусеничных тракторов	76
--	----

Смежные вопросы развития машиностроения

Гавричев И.В., Пенев М.В., Шишленин А.Н., Шматко А.Д. Анализ области исследования волокнистых наполнителей керамических композитов с карбидокремниевой матрицей	82
Соболев И.А., Рожков М.С., Азанов Д.А., Шматко А.Д. Инновационный метод акустической эмиссии в обеспечении качества изделий машиностроения	85
Силаев С.М., Гаврилов А.Д., Расулов З.Н., Силаев М.Ю. Технологическая подготовка производства при проектировании и изготовлении памятных знаков	90
Чаржова К.Ю., Демченко М.В. Верификация и топологическая оптимизация модели траверсы для монтажа вертикального оборудования.....	94

РАСЧЕТ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВЕДУЩЕМ ВАЛУ МИКРОГЭС

Хакимов У.А., Юлдашева Ш.А.

Наманганский инженерно-строительный институт, Наманган, Узбекистан

Ключевые слова: микроГЭС, энергия, низконапорное течение, вода, колесо, вращающий момент, частота вращения, КПД.

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований микроГЭС, рассчитанных на низконапорные течения. Экспериментальных исследованиях были получены осциллограммы, определяющие изменения вращающего момента на валу водяного колеса и его частоты вращения. На основе осциллограмм построены графические зависимости параметров, проанализированные автофоми. Кроме того, был определен КПД водяного колеса.

CALCULATION OF TORQUE ON THE DRIVE SHAFT OF MICROHPP

Khakimov U.A., Yuldasheva Sh.A.

Namangan Engineering-Construction Institute, Namangan, Uzbekistan

Keywords: microHPP, energy, low-pressure current, water, wheel, torque, rotational speed, efficiency.

Abstract. The article presents the results of experimental studies of microhydroelectric power plants designed for low-pressure flows. Experimental studies were obtained oscillograms that determine the changes in the torque on the shaft of the water wheel and its rotational speed. On the basis of the oscillograms, graphical dependencies of the parameters, analyzed by autofamily, are constructed. In addition, the efficiency of the water wheel was determined.

В настоящее время электроэнергию получают различными способами, но наиболее распространенными являются только три извлечение энергии из ископаемого топлива (ТЭС), ядерные реакции (АЭС) и использование гидроэнергии (ГЭС). Интерес к гидроэлектростанциям растет день ото дня в связи с их экологической безопасностью [1-3].

Из всех доступных возобновляемых источников энергии чрезвычайно важно использование гидроэнергетики. В мире на гидроэлектростанции приходится примерно 23% общей мощности и 21% производства электроэнергии [4, 5].

На электротензометрической схеме опытной микроэлектростанции (рис. 1) обозначены: 1 – воды; 2 – измеритель скорости (вертушка) типа ГР21М; 3 – лопасти; 4 – ведущий вал; 5, 6 и 10 – подшипники; 7 – ведущая звездочка; 8 – цепь; 9 – ведомая звездочка; 11 – ведомый вал; 12 – генератор; 13 – тензодатчик; 14 – преобразователь; 15 – магнит; 16 – электромагнитный датчик; 17 – микроконтроллер Arduino UNO; 18 – компьютер.

Экспериментальные исследования проводились в трёх видах водопотребления и трёх видах технологического сопротивления при скорости течения воды в канаве 1,05 м/с. При этом расход воды составляет 80, 100 и 120 л/с.

В качестве технологического сопротивления была выбрана мощность, вырабатываемой генератором электроэнергии, которая составляла: 100, 300 и

500 Вт. В условиях эксперимента высота капли воды составляла 1 м, а угол наклона потока 60° .

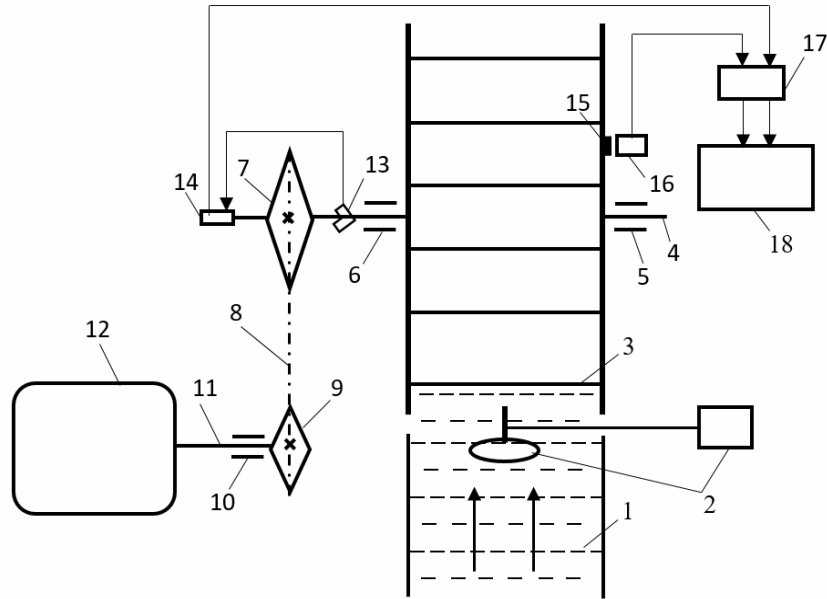


Рис. 1. Электротензометрическая схема экспериментального стенда

Результаты экспериментальных исследований были получены в численном виде, а с помощью компьютерной программы Excel построены осциллограммы для анализа закономерностей их изменения (рис. 2).

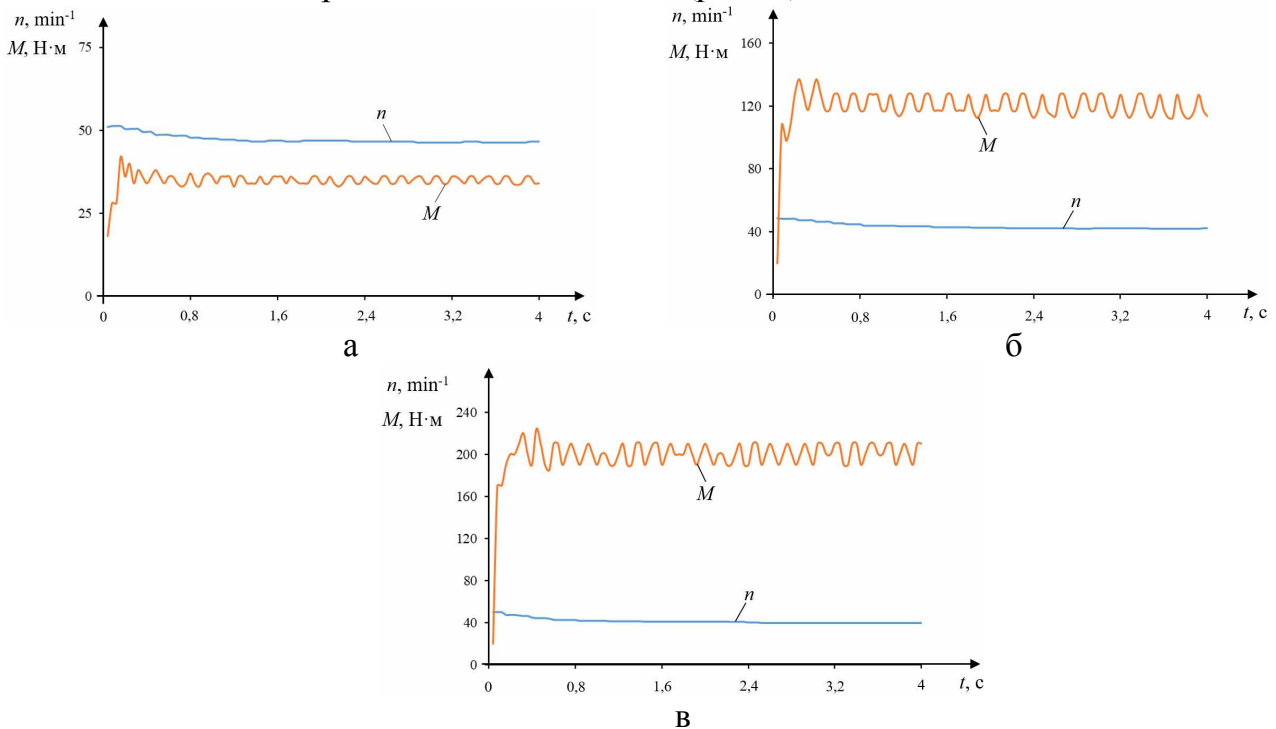


Рис. 2. Закон изменения вращающего момента и частота вращения вала водяного колеса (расход воды 120 л/с) при потребляемой электрической мощности 100 Вт (а); 300 Вт (б); 500 Вт (в)

Из закономерностей изменения на рисунке 2 видно, что вращающий момент на валу водяного колеса имеет колебательный характер, а частота вращения изменяется незаметно. Можно заметить, что значение вращающего момента увеличивается, а частота вращения уменьшается с увеличением

потребления электроэнергии. Отмечено, что значение вращающего момента было высоким во всех случаях в начальный период при подключении потребителя электроэнергии при работе гидроагрегата. Этот период можно назвать переходным периодом [6-8].

В проводимых опытах при расходе воды 120 л/с и потреблении электроэнергии 100 Вт среднее значение вращающего момента на валу водяного колеса составило 35,2 Н·м, а средняя частота вращения – 47 мин⁻¹ (рис. 2,а). Из осциллограммы на рисунке 2,б видно, что среднее значение вращающего момента на валу водяного колеса составляет 120 Н·м, а среднее значение частота вращения – 43 мин⁻¹ при потребляемой мощности 300 Вт. При потребляемой мощности 500 Вт среднее значение вращающего момента на валу водяного колеса составляет 200 Н·м, а среднее значение частота вращения – 40 мин⁻¹ (рис. 2,в).

На основе анализа приведенных осциллограмм был построен график зависимости крутящего момента на валу водяного колеса и числа оборотов от потребляемой мощности электроэнергии (рис. 3).

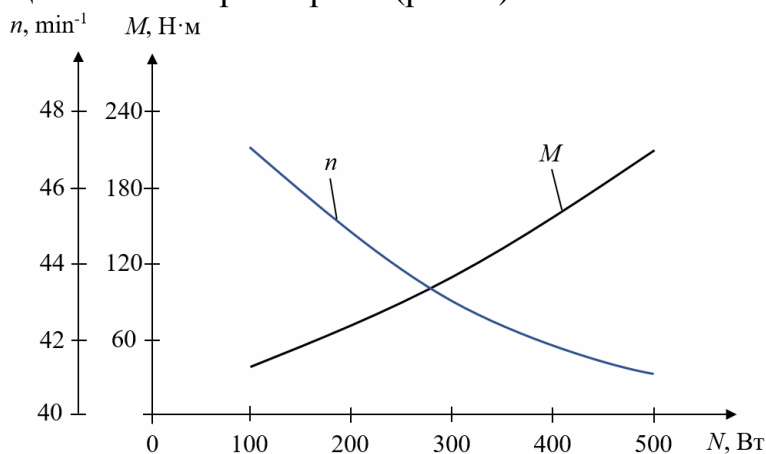


Рис. 2. Зависимость вращающего момента M и частоты вращения вала водяного колеса от мощности электроэнергии

Из этих графиков можно сделать вывод, что по мере увеличения потребляемой мощности крутящий момент на валу водяного колеса увеличивается криволинейно, а количество оборотов криволинейно уменьшается.

Список литературы

1. Турдалиев В.М., Акрамович Х.Ў., Ўктамов С.М., Рахимбердиев Д.Т.Ў. МикроГЭСнинг тажрибавий усулда тадқиқ этиш ва сув ғилдирагининг фойдали иш коэффициентини аниқлаш // Научный журнал механика и технология. – 2022. – №3(8). – С. 38-46.
2. Акрамович Х.Ў., Набижонов Ў.А.Ў. Паст босимли оқимларга мўлжалланган микрогэсининг иқтисодий самарадорлигини ҳисоблаш // Научный Фокус. – 2023. – 1(1). – С. 666-668.
3. Akramovich K.U. Calculation of stability of shafts in hydraulic machine turbine // Scientific Impulse. 2024, vol. 2(17), pp. 354-367.
4. Умурзаков А.Х., Турдалиев В.М., Хакимов У.А. Экспериментальные исследования водяного двигателя // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2022. – №5. – С. 8-10.
5. Umurzakov A.K., Turdaliev V.M., Khakimov U.A. Low-Power Hydraulic Motor for Mobile Micropower Stations and Pumps // Russian Engineering Research. 2022, vol. 42(8), pp. 791-793.

6. Махкамов Г.У., Хакимов У.А. Экспериментальное исследование МикроГЭС. Определение коэффициента полезного действия водяного колеса // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, №10. – С. 838-841.
7. Makhkamov G.U., Khakimov U.A. Experimental Study of Micro-Hydropower Plants. Calculation of Water Wheel Efficiency // Russian Engineering Research. 2023, vol. 43(12), pp. 1524-1527.
8. Akramovich K.U. Prospects of creating mathematical models and devices of controlled mechanisms // Научный Фокус. – 2024. – №1(10). – С. 591-600.

Сведения об авторах:

Хакимов Уткирбек Акрамович – к.т.н., старший преподаватель кафедры “Общетехнические дисциплины”;

Юлдашева Шохида Акмалжон кизи – студент.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕДУКТОРА ПЛАНЕТАРНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО

Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В., Ерошков В.Ю.

ПАО «ОДК-Сатурн»;

*Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева, Рыбинск*

Ключевые слова: редуктор, зубчатая передача, анализ несущей способности, запас прочности.
Аннотация. Разработан редуктор планетарно-дифференциальный с двумя концентричными выходными валами. Разработанная конструкция редуктора характеризуется уменьшением нагрузки на подшипники валов, с одновременным сокращением габаритных размеров устройства. Использование механизма дозагрузки позволило равномерно распределить силы от нагружающих элементов по валам, обеспечивая их баланс. Приведены результаты оценки несущей способности зубчатых передач и эффективности работы редуктора с учетом разработанной методики.

DESIGN OF A PLANETARY DIFFERENTIAL GEARBOX

Shehovtseva E.V., Shehovtseva T.V., Eroshkov V.Yu.

PJSC "ODK-Saturn";

Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk

Keywords: gearbox, gear train, analysis of bearing capacity, safety margin.

Abstract. A planetary differential gearbox with two concentric output shafts has been developed. The developed gearbox design is characterized by a reduction in the load on the shaft bearings, while reducing the overall dimensions of the device. The use of a reloading mechanism made it possible to evenly distribute the forces from the loading elements along the shafts, ensuring their balance. The results of the evaluation of the bearing capacity of gears and the efficiency of the gearbox, taking into account the developed methodology, are presented.

Развитие турбовинтовых двигателей (ТВД) в авиации в существенной степени основано на высоконадежных редукторах, характеризующихся небольшими габаритами и массой, проектирование которых стала возможным на основе современных методов проектирования и инженерных методов расчета, а изготовление – на основе применения прогрессивных с точки зрения повышения качества поверхностного слоя технологий обработки деталей. В частности, особое внимание уделяется авиационным зубчатым передачам, приводам и редукторам, которые играют важную роль в силовой установке летательного аппарата. Надежность зубчатых передач является первостепенной задачей, обеспечивающей безопасность полета, поэтому удельный вес этих элементов в авиационных конструкциях имеет решающее значение. Минимизация габаритов редукторов ТВД с соосными входным и выходными валами требует использования дифференциальных и планетарных передач.

Спроектирован редуктор планетарно-дифференциальный [1] (рис. 1,а) при условии снижения нагрузки на подшипники валов и увеличении КПД зубчатых передач. Созданная конструкция обладает дополнительным эффектом –

равномерным распределением нагрузки от нагружающих элементов по валам. В результате этого достигается требуемый баланс сил внутри редуктора, что потенциально повышает его надежность с конструкторской точки зрения.

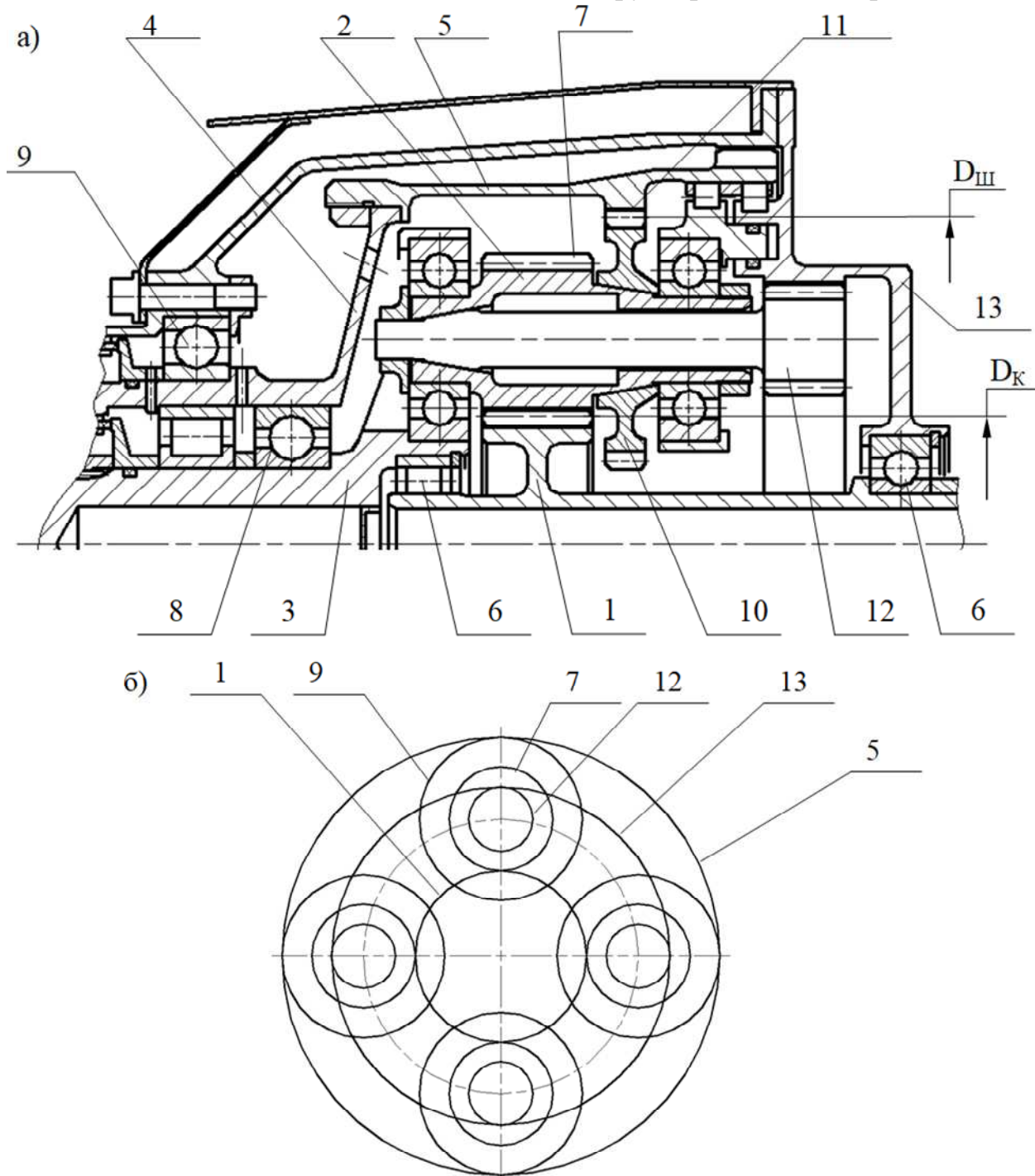


Рис. 1. Редуктор планетарно-дифференциальный: а) продольный разрез; б) схема кинематическая

При этом, использование в данном редукторе технологичных прямозубых передач, как наружного, так и внутреннего зацепления, с открытыми зубчатыми венцами, доступными для обработки различным инструментом, приводит к повышению надежности данных передач с точки зрения технолога. Все это уменьшает риск снижения качества поверхностного слоя и возникновения концентраторов напряжений при обработке. Возможность использования

упрочняющих методов обработки на открытых поверхностях шестерен (в данном редукторе даже детали с внутренним зацеплением достаточно открыты для использования таких методов) улучшает физико-механические параметры зубчатых соединений, и приводит к уменьшению износа поверхностей, т.е. увеличению ресурса данных редукторов.

Так же достоинством предлагаемой конструкции является относительная (с учетом общей сложности изделия) простота сборки узла, в частности из-за наличия в деталях самоцентрирующих конических посадок и регулировочных стяжных гаек.

Спроектированный редуктор содержит в себе вал-шестерню 1 входную, соединенную с блоком сателлитов 2, концентричные валы выходные внутренний 3 и наружный 4 и тело центральное 5. Тело центральное 5 вала выходного наружного 4 имеет зубчатый венец внутреннего зацепления. Валы снабжены подшипниками 6, 8, 9, где хотя бы один из них установлен концентрично на валу 1 и валу 3. Вал-шестерня 1 и блока сателлитов 2 через венец 7 соединены косозубой зубчатой передачей. Зубчатый венец 10 блока сателлитов 2 через внутреннее прямозубое зацепление 11 соединён с зубчатым венцом тела центрального 5. При этом отношение диаметра начальной окружности зубчатого венца внутреннего зацепления вала выходного 4 наружного ($D_{ш}$) к диаметру начальной окружности вала-шестерни 1 входной ($D_{к}$) составляет от 2 до 3.

Также введение в редуктор шестерни 12 (рис. 1) формирует внутреннее зацепление 13, обеспечивающее балансировку усилий в распределении нагрузки между выходными валами. Количество блоков сателлитов 2 в редукторе планетарно-дифференциальном от 3 до 7 штук (рис. 1,б).

Табл. 1. Исходные данные по зубчатым колесам

№	Число зубьев, z	Модуль, m , мм	Ширина, b_w , мм	Угол исходного контура, α , °	Угол наклона зуба, β , °	Коэффициент смещения, x
Дифференциальные ступени						
1	35	1,25	15	20	12	0,889
7	24					0,768
10	32		6		0	0,537
11	94					-1,179
Ступень дозагрузки						
12	14	1,25	12	25	0	-0,003
13	81					1,608

На основе разработанной методологии [2-3] оценки несущей способности зубчатой передачи выполнен инженерный анализ предложенного редуктора. Исходные данные представлены в таблице 1 при $a_w = 39,5$ мм и степени точности 5-5-5. Габариты редуктора ориентировочно составят – максимальный диаметр 165 мм, максимальная длина 152 мм и масса 7 кг.

Результаты прочностного анализа приведены в таблице 2 при заданных запасах прочности $[s_F] = 1,6$ и $[s_H] = 1,1$. Методики расчета основаны на ISO6336:206 Метод В и DIN3990:1987 Метод В.

Табл. 2. Результаты прочностного расчета зубчатых колес

№	Число зубьев, z	Напряжения в ножке зуба, σ_F , Н/мм ²	Предельная прочность ножки зуба $[\sigma_F]$, Н/мм ²	Запас прочности, s_F	Контактные напряжения, σ_H , Н/мм ²	Предельная прочность, $[\sigma_H]$, Н/мм ²	Запас прочности s_H	Окружная скорость, м/с	КПД
Дифференциальная ступень									
1	35	786,56	1325,29	1,68	1575,42	1735,21	1,1	65,5	99,588
7	24	788,61	1325,51	1,68	1539,57	1696,93	1,1		
10	32	758,86	1324,7	1,74	1362,13	1726,11	1,26	86,1	99,878
11	94	729,92	1340,97	1,83	1407,25	1833,79	1,3		
Замыкающая ступень									
12	14	748,73	1320,25	1,76	1561,45	1717,75	1,1	25,6	99,125
13	81	779,86	1333,12	1,71	1645,45	1811,83	1,1		

В заключение следует отметить, что спроектированная конструкция в совокупности с предложенной методикой оценки несущей способности обеспечивает относительно небольшие габариты редуктора при технологичности изготовления зубчатых передач. Также конструкция позволяет осуществить распределение сил от нагружающих элементов между валами, достигая необходимый баланс усилий в редукторе.

Список литературы

1. Патент №2528236 РФ. Планетарно-дифференциальный редуктор / Е.В. Шеховцева, В.А. Никифоров. – Заявка № 2013139906/06 от 27.08.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
2. Патент 2804265 РФ. Способ изготовления зубчатого зацепления / Д.А.Слободской, Е.В. Шеховцева. Заявка №2023110045 от 20.04.2023; опубл. 26.09.2023, Бюл. № 27.
3. Свидетельство № 23-1209, серия А. Служебное произведение науки. Методология оценки эксплуатационных свойств зубчатой передачи с учетом физико-механических свойств материала упрочненного слоя и сердцевины / Шеховцева Е.В., Слободской Д.А.; право принадлежит: ПАО «ОДК-Сатурн»; заявл. 27.09.2023; опубл. – 15 с.

Сведения об авторах:

Шеховцева Евгения Владимировна – к.т.н., начальник отдела;

Шеховцева Татьяна Владимировна – к.т.н., доцент;

Ерошков Василий Юрьевич – к.т.н., доцент, начальник технологического бюро.

ВИХРЕВЫЕ ДИОДЫ

*Кайгородов С.Ю., Руменко Д.Н., Харахордина А.Ю.
Омский государственный технический университет, Омск*

Ключевые слова: гидравлический диод, диодность, вихревой диод повышенной диодности, вихревой диод с конусной вихревой камерой, вихревой гидродиод, насос, гидравлическая система, гидропневматическая система, вихревая камера.

Аннотация. Статья посвящена анализу эффективности вихревого диода повышенной диодности, вихревого диода с конусной вихревой камерой и обычного вихревого гидродиода. Данный анализ оценивает достоинства и недостатки различных конструкций диодов, а также их эффективность с учётом применения в гидравлических системах. Данная статья будет интересна специалистам из области гидромеханики.

VORTEX DIODES

*Kaigorodov S.Y., Rumenko D.N., Harahordina A.Y.
Omsk State Technical University, Omsk*

Keywords: hydraulic diode, diode, high-diode vortex diode, vortex diode with a conical vortex chamber, vortex hydrodiode, pump, hydraulic system, hydropneumatic system, vortex chamber.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the efficiency of a high-diode vortex diode, a vortex diode with a conical vortex chamber and a conventional vortex hydrodiode. This analysis evaluates the advantages and disadvantages of various diode designs, as well as their effectiveness, taking into account their use in hydraulic systems. This article will be of interest to specialists in the field of hydromechanics.

Введение

С развитием технологий машиностроения в виду усложнения механизмов, агрегатов и систем, наибольшую популярность приобретают идеи энергоэффективности. В тяжёлом машиностроении энергоэффективность наиболее присуще гидравлическим системам [1]. Так, например, автор И. Цветков и др. в работах [2, 3] применяет гидравлические диоды (гидродиоды) для дросселирования потока в кран-манипуляторных установках. В работе [4] автор А. Шапошков используют гидравлический диод для демпфирования грузов на примере гидравлического амортизатора автомобиля. Автор В. Оверко в работах [5,6] предлагает способ борьбы с гидравлическими ударами в магистральных трубопроводах с помощью гидравлических диодов.

В тоже время разрабатываются всё новые конструкции гидравлических агрегатов, где в качестве распределителей используются гидравлические диоды. Так, С. Кайгородов в работе [7] рассматривает возможность применения гидравлического диода за место обратных клапанов в прямозубом роторном насосе. Также этот же автор в работе [8] рассматривает возможность применения гидродиода взамен нагнетательного клапана поршневого насоса. Похожие варианты конструкций насосов исследовал автор Е. Спиридонов и др. в работах [9,10], и Д. Хабарова [11], но с другими видами гидродиодов.

Гидродiodы активно применяются при разработке микронасосов, так автор Н. Cazorla и др. предлагают микронасос с гидродiodом широкого спектра действия [12].

По данным [13], наибольшей диодностью обладают вихревые гидродiodы. В результате патентного поиска были найдены конструкции, вихревого диода повышенной диодности [14] и струйного вихревого диода [15].

В настоящее время разрабатываются всё новые конструкции гидродiodов, которые по заявлению авторов обладают лучшими характеристиками, относительно известных ранее конструкций. Так, например, автор В. Оверко и др. в работе [13] предлагает конструкцию вихревого диода с конусной вихревой камерой. Автор С. Кайгородов и др. в работе [14] предлагает конструкцию, объединяющую в себе преимущества вихревого и диафрагменного гидродiodа. Автор И. Лебедев в работе [15] описывает базовую конструкцию вихревого гидродiodа [16].

Таким образом, анализ конструкций гидродiodов на предмет улучшения их основной характеристики – диодности (в общем случае представляет собой отношение расходов при течении жидкости через гидродiod в прямом и обратном направлении при одинаковом перепаде давления), является актуальной задачей.

Целью этой работы является анализ эффективности вихревого диода повышенной диодности в сравнении с известными аналогами, а именно вихревого диода с конусной вихревой камерой и обычного вихревого гидродiodа.

Основная часть

Согласно [13] вихревой диод с конусной вихревой камерой содержит в себе подводящий и отводящий патрубки, соединяющиеся вихревой плитой. Отводящий патрубок располагается на торцевой части вихревой камеры, которая в свою очередь имеет коническую форму и выполнена с торообразной частью. При движении в обратном направлении поток жидкости закручивается в винтообразном отводном патрубке и через торцевой выход входит под углом в вихревую камеру. В итоге, это приводит к наибольшей скорости движения потока и наибольшему сопротивлению движению. В прямом направлении жидкость проходит по подводящему патрубку к вихревой камере, в ней из конической части переходит в торообразную, после чего через отводящий патрубок проходит в трубопровод, тем самым создаётся лишь небольшое сопротивление движению.

Вихревой диод повышенной эффективности [14] представляет собой цилиндрическую камеру постоянной высоты с тангенциальным соплом и трубкой в центре камеры. В трубку вмонтированы дополнительно несколько резисторных диодов диафрагменного типа, в форме усечённого конуса с коническими поверхностями. Конусы расположены под острым углом к осевой линии трубки вдоль прямого направления диода. В данном диоде сопротивление движению потока в обратном направлении создаётся за счёт резисторных диодов вмонтированных в трубку.

Вихревой диод, описанный в работе [15], содержит цилиндрическую камеру постоянной высоты с тангенциальным соплом и трубкой внутри камеры.

Поток жидкости поступаая через цилиндрическую камеру, закручиваясь и выходя из камеры через трубку, тем самым создавая сопротивление потоку, в прямом же направлении сопротивление создаётся сравнительно не большое. При движении в прямом направлении поток через трубку поступает в камеру, после чего выходит через тангенциальное сопло. При обратном движении жидкость поступает через тангенциальное сопло в цилиндрическую камеру, после чего, закручиваясь, выходит через трубку. Тем самым, благодаря сопротивлению крутки и сопротивления входа потока из камеры в трубку создаётся диодность.

Анализ эффективности вихревых диодов

Все рассмотренные вихревые диоды имеют ряд преимуществ и недостатков. Одно из основных преимуществ – высокая надёжность конструкций, так как они не имеют подвижных частей. Таким образом, конструктивно применение таких гидродиодов в гидравлических системах значительно уменьшает вероятность поломок последних.

Вихревой диод с конусной вихревой камерой обладает самой сложной конструкцией из рассматриваемых вихревых диодов, так как имеет очень много не стандартных изогнутых криволинейных поверхностей. Как следствие, это очень сильно усложняет его производство и поднимает его себестоимость. Стоит отметить, что при этом он обладает хорошими параметрами эффективности [13].

Эффективность работы гидродиодов оценивается величиной диодность. В работах [6, 15, 17], эффективность гидродиодов оценивается разными диодностями. Диодность по расходу (отношение расходов в прямом и обратном направлении) и сопротивлению (отношение сопротивлений в обратном и прямом направлении), согласно [15] имеет связь:

$$D_Q = \sqrt{D},$$

где D_Q – диодность по расходу, а D – диодность по сопротивлению.

Исходя из данных, полученных при анализе литературы, видно, что диодность гидродиода повышенной диодности [14] чуть ниже диодности вихревого диода с конусной вихревой камерой [6], однако наличие дополнительных диафрагменных диодов усложняет конструкцию, создаёт потребность в изготовлении и креплении диафрагм, что увеличивает себестоимость и сложность производства. Наличие диафрагм конструктивно много меньше увеличивает массогабаритные параметры относительно вихревого диода с конусной вихревой камерой, а наличие большего числа прямолинейных поверхностей упрощает технологию изготовления такого гидродиода.

Вихревой диод [15] обладает самой простой конструкцией, благодаря чему имеет лучшие массогабаритные показатели и, соответственно, себестоимость производства. Однако, многочисленные исследования, например [17], показали, что диодность такого гидродиода относительно мала.

Вывод

В результате анализа конструкций вихревого диода с конусной вихревой камерой, вихревого диода повышенной диодности и обычного вихревого диода, можно сделать вывод, что вихревой диод повышенной диодности в целом является лучшим выбором для уменьшения расхода жидкости и защиты от

гидравлических ударов, применения в насосной и компрессорной технике и иных гидропневматических систем. Являясь улучшенной версией вихревого диода, он обладает плюсами вихревого и диафрагменного гидродиодов. Однако более высокие массогабаритные характеристики всё же создают некоторые ограничения для его использования.

Список литературы

1. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: учеб. пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 145 с.
2. Цветков И.В., Кайгородов С.Ю. Проблемы и пути повышения эффективности работы гидравлических систем // EurasiaScience: сб. ст. XXIX Междунар. научно-практической конференции. – М.: ООО «Актуальность.РФ», 2020. – Ч. 1. – С. 119-121.
3. Цветков И.В., Кайгородов С.Ю., Павлюченко Е.А., Кужбанов А.К. Разработка и исследование вихревого гидродиода повышенной диодности для специальной техники военного назначения // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2021. – № 5-6(155-156). – С. 131-142.
4. Шапошков А.А., Кайгородов С.Ю. Гидравлический амортизатор с гидродиодами // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: сб. науч. ст. по материалам VII Междунар. науч.-практ. конф. (Уфа, 14 дек. 2021 г.). – Уфа: ООО «Науч.-изд. центр «Вестник науки», 2021. – С. 24-29.
5. Оверко В.М., Овсянников В.М. Повышение надежности водоотливных установок шахт в переходных режимах работы // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Гірничо-електромеханічна. – 2010. – Вып. 20(176). – С 85-91.
6. Оверко В.М., Овсянников В.М. Влияние количества гидравлически диодов в напорном трубопроводе на эффективность защиты водоотливных установок от гидравлических ударов // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Гірничо-електромеханічна. – 2008. – Вып. 16(142). – С. 210-215.
7. Кайгородов С.Ю. Экспериментальное подтверждение возможности применения гидравлического диода в линии нагнетания прямозубого роторного насоса // Вестник машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 56-58. – DOI: 10.36652/0042-4633-2020-4-56-58.
8. Кайгородов С.Ю. Работа поршневого насоса с гидравлическим диодом на нагнетании // Вестник машиностроения. – 2021. – № 7. – С. 3-5.
9. Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Гидродинамика и характеристики бесклапанного насоса с гидродиодами // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й науч. конф. Секции технических наук (Челябинск, 15-17 апр. 2014 г.) / Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014.
10. Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Принципиальные схемы и характеристики бесклапанных насосов с вытеснителем возвратно-поступательного перемещения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1-2. – С. 309-313.
11. Хабарова Д.Ф., Спиридонов Е.К. Экстремальные характеристики и расчет бесклапанных поршневых насосов с гидравлическими диодами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 52-60.
12. Cazorla P.H., Fuchs O., Cochet M., Maubert S., Rhun G.L., Fouillet Y., Defay E. A low voltage silicon micro-pump based on piezoelectric thin films // Sensors and Actuators A: Physical. 2016, vol. 250, pp. 35-39.
13. Патент № 75770 UA. Струменевий діод / А.П. Кононенко, В.М. Оверко, М.В. Оверко, А.М. Гончаров (Україна). – Заявка от 12.06.2012; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.
14. Патент №199636 РФ. Вихревой диод повышенной диодности / С.Ю. Кайгородов, И.В. Цветков. Заявка №2020115387 от 06.05.2020; опубл. 11.09.2020.
15. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. – М.: Машиностроение, 1973. – 359 с.

16. Patent №2642895 US. Aerodynamic Valve / Bertin J.H. – Patented June 23, 1953; Filed Feb 16. 1948.
17. Кайгородов С.Ю., Цветков И.В. Экспериментальное исследование характеристик вихревого диода повышенной диодности // Вестник машиностроения. – 2021. – № 9. – С. 47-49. – DOI: 10.36652/0042-4633-2021-9-47-49.

Сведения об авторах:

Кайгородов Сергей Юрьевич – к.т.н. доцент;

Руменко Дмитрий Николаевич – студент;

Харахордина Анастасия Юрьевна – студентка.

УДК 621 (825.5/.7+926)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Мележик Р.С., Власенко Д.А.

Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Ключевые слова: четырехвалковая дробилка, динамические нагрузки, вибрационные характеристики, муфта зубчатая, муфта пальцевая с эластичным элементом дискового типа.

Аннотация. В работе выполнено экспериментальное исследование динамических нагрузок, передающихся от валков на подшипниковые опоры привода дробилки ДЧГ 900×700 в процессе дробления. В производственных условиях определены численные значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения на подшипниковых опорах валка дробилки, тихоходном валу редуктора с помощью метода контроля вибрационного состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях в условиях использования двух типов муфт с различной демпфирующей способностью. Обосновано снижение показателей вибрационных характеристик при использовании и привод дробилки муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DYNAMICS OF A FOUR-ROLL CRUSHER IN WORKING CONDITIONS

Melezhik R.S., Vlasenko D.A.

Donbass State Technical University, Alchevsk

Keywords: four-roll crusher, dynamic loads, vibration characteristics, gear coupling, pin coupling with an elastic disc-type element, displacement.

Abstract. The work presents an experimental study of dynamic loads transmitted from the rolls to the bearing supports of the drive of the crusher DCHG 900×700 in the crushing process. In production conditions, numerical values of vibration displacement, vibration velocity and vibration acceleration on the bearing supports of the crusher roll, the low-speed gearbox shaft were determined using the method of monitoring the vibration state of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts under conditions of using two types of couplings with different damping capacity. A decrease in vibration characteristics is justified when using and driving a pin coupling crusher with an elastic disc-type element.

Введение. Для фракционной подготовки твердого топлива в агломерационном производстве широкое применение нашли четырехвалковые дробилки ДЧГ 900×700, обладающие высокой надежностью и эффективностью. Однако в процессе работы данные дробилки испытывают существенные динамические нагрузки, негативно влияющие на работоспособность основных рабочих органов, подшипниковых опор, а также других элементов привода, вызывая их преждевременный износ и разрушение, что приводит к выходу из строя и возникновению значительных простоев оборудования [1]. Эти нагрузки носят случайный характер и передаются через рабочие органы на узлы привода. Как показывает опыт эксплуатации четырехвалковых дробилок зачастую применяемые зубчатые муфты (МЗ №8) неспособны в достаточной степени

компенсировать возникающие ударно-переменные нагрузки, передающиеся от валков на привод, что приводит к снижению срока службы муфт и редукторов.

Для снижения негативного влияния динамических нагрузок и повышения срока службы элементов привода предлагается [2, 3] применять муфту пальцевую с эластичным элементом дискового типа (МПЭЭДТ) [4]. Данная муфта в отличие от других компенсирующих муфт способна в полной мере обеспечить необходимый уровень демпфирования при обеспечении передачи заданного крутящего момента без существенных конструктивных изменений в уже работающем приводе четырехвалковой дробилки.

Цель исследования. Целью данной работы является экспериментальное исследование и сравнение вибрационных характеристик привода при использовании муфты зубчатой и муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа.

Материал и методы. В ходе работы вибрационные характеристики (виброперемещение, виброскорость, виброускорение) определялись при дроблении кокса сухого тушения в условиях агломерационного цеха ООО «ЮГМК». Сравнительный анализ полученных результатов проводился при использовании в приводе дробилки ДЧГ 900×700 муфт МЗ №8 и МПЭЭДТ.

Замеры выполнялись на корпусе подшипниковой опоры приводного валка с холостой стороны, корпусе подшипниковой опоры валка со стороны привода и бобышке подшипника тихоходного вала редуктора (рис. 1).

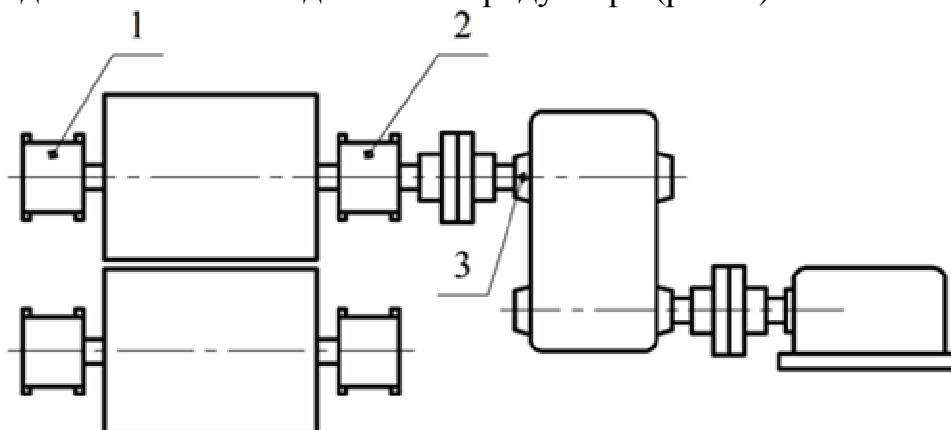


Рис. 1. Схема установки измерительных датчиков: 1 – подшипниковая опора валка с холостой стороны; 2 – подшипниковая опора валка с приводной стороны; 3 – бобышка тихоходного вала редуктора

Для выполнения измерений использовался метод контроля состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Измерение каждого из показателей вибрационных характеристик осуществлялось двухканальным переносным цифровым анализатором, коллектором данных и балансировочным прибором «Кварц 2» в течение тридцати секунд, а число повторных измерений в каждом эксперименте принималось равным пяти. Результаты фиксировались в режиме реального времени с дисплея прибора «Кварц 2» (рис. 2, 3).

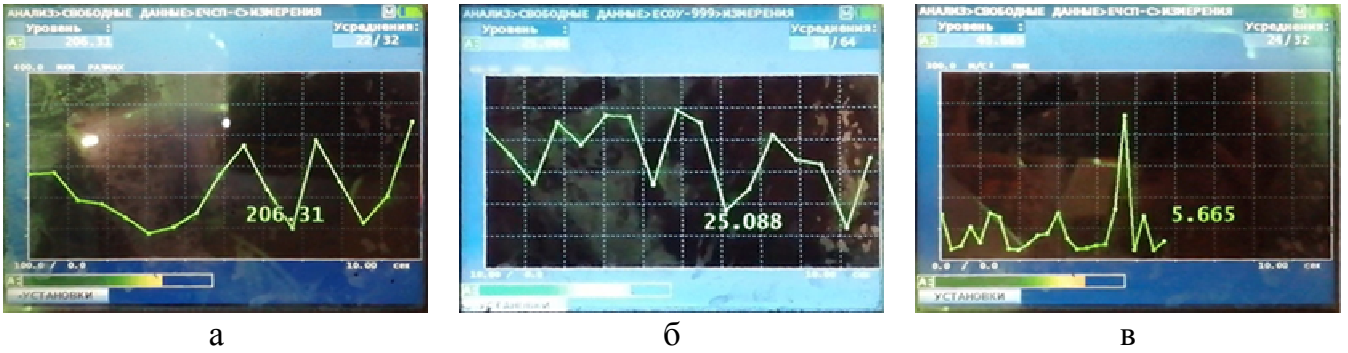


Рис. 2. Вибрационные характеристики на бобышке редуктора, полученные при использовании в приводе МЗ №8: а – виброперемещение, б – виброскорость, в – виброускорение

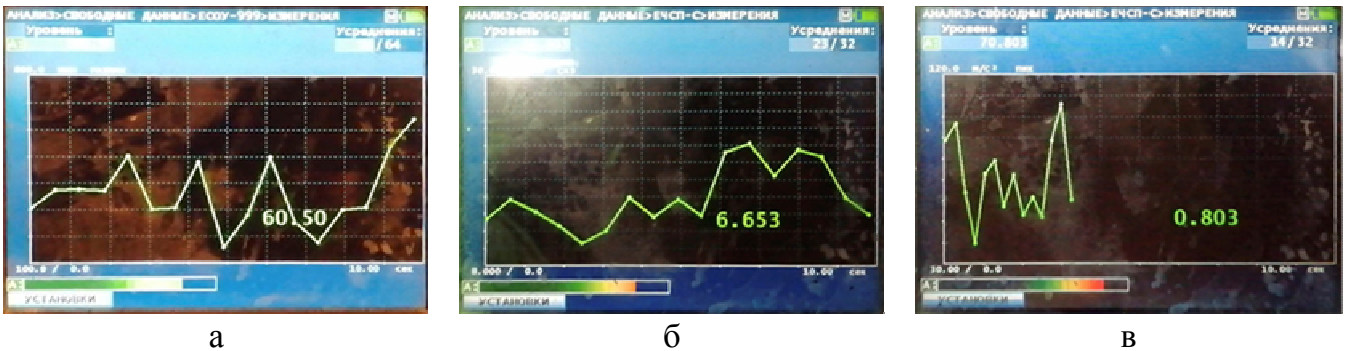


Рис. 3. Вибрационные характеристики на бобышке редуктора, полученные при использовании в приводе МПЭЭДТ: а – виброперемещение, б – виброскорость, в – виброускорение

Результаты исследования. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, в виде численных значений вибрационных характеристик представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты измерений вибрационных характеристик

Вибрационная характеристика	МЗ №8	МПЭЭДТ
Корпус подшипниковой опоры вала с холостой стороны		
Виброперемещение, мм	4,31	2,69
Виброскорость, мм/с	524,76	223,01
Виброускорение, м/с ²	83,29	34,97
Корпус подшипниковой опоры вала с приводной стороны		
Виброперемещение, мм	3,69	2,23
Виброскорость, мм/с	426,31	191,14
Виброускорение, м/с ²	69,41	33,18
Бобышка подшипниковой опоры тихоходного вала редуктора		
Виброперемещение, мм	0,21	0,06
Виброскорость, мм/с	24,91	6,77
Виброускорение, м/с ²	5,13	0,94

На основании полученных экспериментальным путем результатов вибрационных характеристик установлено снижение уровня вибрации

подшипников привода, возникающей при ее передаче от валков дробилки в процессе работы при использовании муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа по сравнению с муфтой зубчатой: виброперемещения в 2,25 раза, виброскорости в 2,75 раза, виброускорения в 3,31 раза.

Выводы

1. Проведено исследование динамических нагрузений привода четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700 в процессе фракционной подготовки твердого топлива в производственных условиях.

2. Установлено, что при использовании муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа наблюдается снижение виброперемещения в 2,25 раза, виброскорости в 2,75 раза, виброускорения в 3,31 раза по сравнению с муфтой зубчатой №8.

3. Результаты исследований подтверждают перспективность применения муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа в приводах дробильно-измельчительных машин, испытывающих ударно-переменные нагрузки.

Список литературы

1. Власенко Д.А., Левченко Э.П., Жильцов А.П. и др. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет: учебное пособие. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2023. – 140 с.
2. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6., №2. – С. 128-135. – doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135.
3. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Анализ динамики и усовершенствование конструкции привода четырехвалковой дробилки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – №12 (765). – С. 28-37. – doi.org/10.18698/0536-1044-2023-12-28-37.
4. Патент №210721 РФ. Муфта пальцевая с эластичным элементом дискового типа / Р.С. Мележик, Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Я.Э. Крупнов. – Заявка №2021113946 от 17.05.2021; опубл.28.04.2022, Бюл. №20.

Сведения об авторах:

Мележик Руслан Сергеевич – аспирант, ассистент кафедры «Металлургические технологии»;

Власенко Дмитрий Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии».

УДК 539.3

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ ПРИ НАКЛОННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ КАПСУЛ В СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

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

Ключевые слова: турбинная лопатка, перфорация, трещина, диагностика повреждений.

Аннотация. В исследовании проведено конечно-элементное моделирование напряженного состояния турбинной лопатки с системой обнаружения повреждений при наклонном расположении капсул. Проанализировано изменение интенсивностей напряжений при различных углах наклона перфорации, предназначенной для установки капсулы, к продольной оси пера лопатки. Согласно анализу наклонное расположение капсул в системе обнаружения повреждений в пределах десяти градусов относительно продольного направления незначительно влияет на изменение напряженного состояния турбинной лопатки.

EVALUATION OF THE STRESS STATE OF THE TURBINE BLADE WITH AN INCLINED ARRANGEMENT OF CAPSULES IN A FINITE ELEMENT DAMAGE DETECTION SYSTEM

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

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

Keywords: turbine blade, perforation, crack, damage diagnosis.

Abstract. In the study, finite element modeling of the stress state of a turbine blade with a damage detection system with an inclined capsule arrangement was carried out. The change in stress intensities at different angles of inclination of the perforation intended for the installation of the capsule to the longitudinal axis of the turbine blade pen is analyzed. According to the analysis, the inclined position of the capsules in the damage detection system within 10 degrees relative to the longitudinal direction has little effect on changes in the stress state of the turbine blade.

Проблема обнаружения трещин в турбинных лопатках в режиме работы газотурбинного двигателя является сегодня чрезвычайной актуальной, поскольку от ее решения зависит безопасность и эффективность работы авиационных и судовых турбомашин. В исследовании [1] предложен способ обнаружения трещин турбинных лопаток на работающих газотурбинных двигателях за счет установки системы капсул в теле лопатки, которые содержат активное вещество, проявляющее при высоких температурах ионизирующие свойства. Работы [2-4] посвящены вопросам параметризации и оптимизации предложенной системы обнаружения трещин лопаток газотурбинных двигателей. Согласно проведенным исследованиям показано, что расположение системы капсул в продольном направлении пера лопатки не влияет на напряженное состояние тела лопатки при действии только центробежных растягивающих сил. Однако неисследованным является вопрос влияния неортогонального расположения системы капсул к оси вращения на напряженное состояние лопатки. Соответственно, цель исследования заключалась в оценке распределения напряжений при различных

углах наклона перфорации под установку цилиндрической капсулы к продольной оси пера лопатки α (рис. 1). Результаты расчета проводились при следующих входных данных: высота пера лопатки $h = 200$ мм, радиус отверстия $r = 2$ мм под установку капсулы. Угол α варьировался от 0° до 10° . Материал лопатки определялся константами: плотность $\rho = 7850$ кг/м³, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. В качестве нагружения была задана угловая скорость $\omega = 500$ рад/с. Жесткое закрепление применялось по отношению к корневому сечению лопатки.

Оценка напряженного состояния проводилась с помощью эквивалентных напряжений по Мизесу в программном комплексе ANSYS с помощью метода конечных элементов. Напряженное состояние в турбинной лопатке с перфорацией, расположенной под углом $\alpha = 10^{\circ}$ представлено на рисунке 2. Проанализировано изменение напряженного состояния в области корытца турбинной лопатки при различных углах α в области корневого и срединного сечений лопатки (рис. 3). Согласно результатам расчета напряжения повышаются при увеличении угла отклонения перфорации относительно продольной оси. При этом отклонение в результатах при $\alpha = 0^{\circ}$ и $\alpha = 10^{\circ}$ составляет не более 3%.

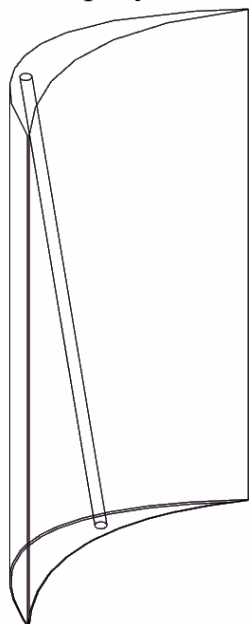


Рис. 1. Модель турбинной лопатки с перфорацией для установки наклонной капсулы системы обнаружения повреждений

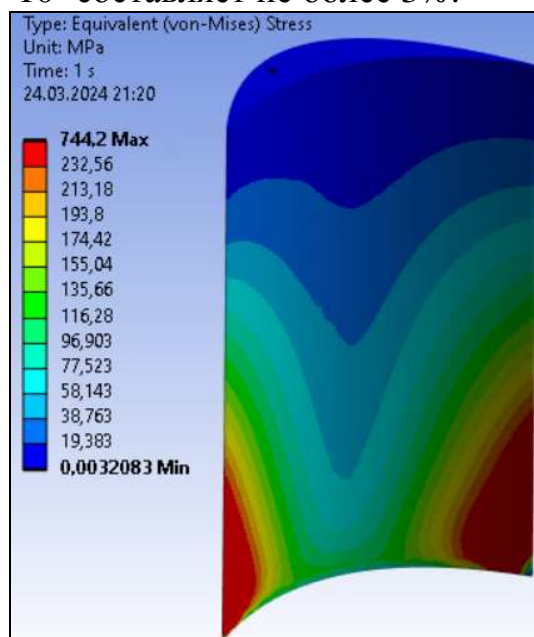


Рис. 2. Распределение интенсивностей напряжений в теле турбинной лопатки с наклонной перфорацией при $\alpha = 10^{\circ}$

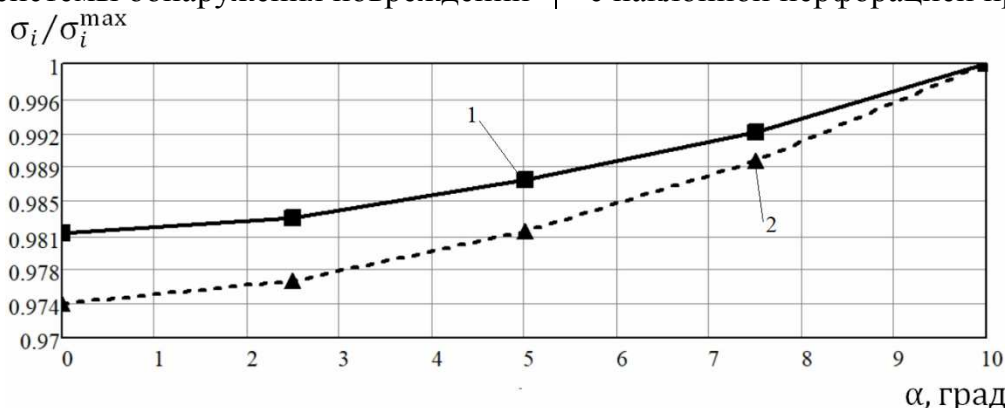


Рис. 3. Изменение относительных напряжений в области корытца лопатки при различных углах α : 1 – в корневом сечении, 2 – в срединном сечении

Таким образом, согласно проведенному конечно-элементному анализу наклонное расположение капсул в системе обнаружения повреждений лопаток газотурбинных двигателей незначительно влияет на изменение напряженного состояния при изменении углов наклона в пределах 10 градусов относительно продольного направления пера лопатки.

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

Список литературы

1. Кара Б.М., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И. Способ обнаружения микротрещин в лопатках работающих газотурбинных двигателей // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 08-12 апреля 2019 года / Часть 3. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 237-240.
2. Андрианов И.К., Гринкруг М.С., Кара Балли М. Разработка подхода к обнаружению трещин в лопатках авиационных газотурбинных двигателей на рабочих режимах. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2024. – № 1 (148). – С. 4-20.
3. Андрианов И.К., Чепурнова Е.К., Андрианов И.К. Оценка предельного давления и геометрии капсул в системе обнаружения трещин лопаток газотурбинного двигателя в условиях нестационарности и температурной неравномерности // Вестник машиностроения. – 2023. – № 9. – С. 725-730. – DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-9-725-730.

Сведения об авторах:

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

Чепурнова Елена Константиновна – лаборант-исследователь;

Солецкий Вячеслав Вадимович – младший научный сотрудник;

Чернышова Дарья Витальевна – младший научный сотрудник.

УДК 621 (3.016+926.9)

МОДЕРНИЗАЦИЯ РОТОРНОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ В УСЛОВИЯХ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА АМК ООО «ЮГМК»

Власенко Д.А.

Донбасский государственный технический университет, ЛНР, Алчевск

Ключевые слова: роторная зубчатая дробилка, ротор с нелинейным расположением зубьев, агломерат, фракционный состав, мощность привода, степень износа рабочих органов.

Аннотация. Работа посвящена модернизации роторной зубчатой дробилки ДО-1300-2700-61, используемой для дробления агломерата в условиях агломерационного производства АМК ООО «ЮГМК», за счет использования нелинейного расположения зубьев звездочек на роторе, позволившей исключить в готовом продукте куски размерами, превышающими верхний предел требуемой фракции, увеличить количество возврата агломерата в шихте на 2...4% и снизить его отсеvy в доменном производстве на 6...7%. Использование ротора нелинейного типа обеспечило снижение необходимой мощности электродвигателя привода в 1,5...1,8 раза и степени износа зубьев звездочек и колосников – в 1,2...1,9 раза.

MODERNIZATION OF A ROTARY GEAR CRUSHER IN CONDITIONS OF AGGLOMERATION PRODUCTION AT AMP LLC «SMMC»

Vlasenko D.A.

Donbass State Technical University, LPR, Alchevsk

Keywords: rotary gear crusher, rotor with a nonlinear arrangement of teeth, agglomerate, fractional composition, drive power, degree of wear of working parts.

Abstract. The work is devoted to the modernization of the DO-1300-2700-61 rotary gear crusher, used for crushing sinter in the conditions of the sintering production of AMP LLC «SMMC», through the use of a non-linear arrangement of sprocket teeth on the rotor, which made it possible to exclude pieces in the finished product with sizes exceeding the upper limit of the required fractions, increase the amount of sinter return in the charge by 2...4% and reduce its screenings in blast furnace production by 6...7%. The use of a nonlinear type rotor ensured a reduction in the required power of the drive electric motor by 1,5...1,8 times and the degree of wear of the teeth of sprockets and grate bars by 1,2...1,9 times.

При фракционной подготовке материалов значительное влияние на технико-экономическую эффективность дробильных машин оказывают различные показатели: качество дробленого продукта, энергоемкость процесса и мощность привода, долговечность рабочих органов и т.д., на которые непосредственно влияет способ дробления (разрушения) материала [1, 2].

Для железорудного агломерата, как для хрупкого анизотропного материала, наиболее выгодным видом деформирующего разрушения является растяжение (раскалывание) [4-6], однако по конструктивным соображениям в современной практике фракционной подготовки в большинстве дробилок разрушение куска обеспечивается за счет деформации сжатия или его сочетания с другими видами деформации [2-6].

В настоящее время для дробления агломерата наибольшее распространение получили роторные зубчатые дробилки [1-6] с линейным расположением зубьев

на роторе (рис. 1,а). Однако они обладают рядом недостатков, одним из которых является неконтролируемость проникновения материала в рабочее пространство ротора, вследствие чего разрушение большей части пирога обеспечивается за счет сжатия при его контактном взаимодействии с колосниками, что не позволяет обеспечить стабилизацию фракционного состава дробленого материала, что существенно сказывается на гранулометрическом составе готового продукта и энергоемкости процесса.

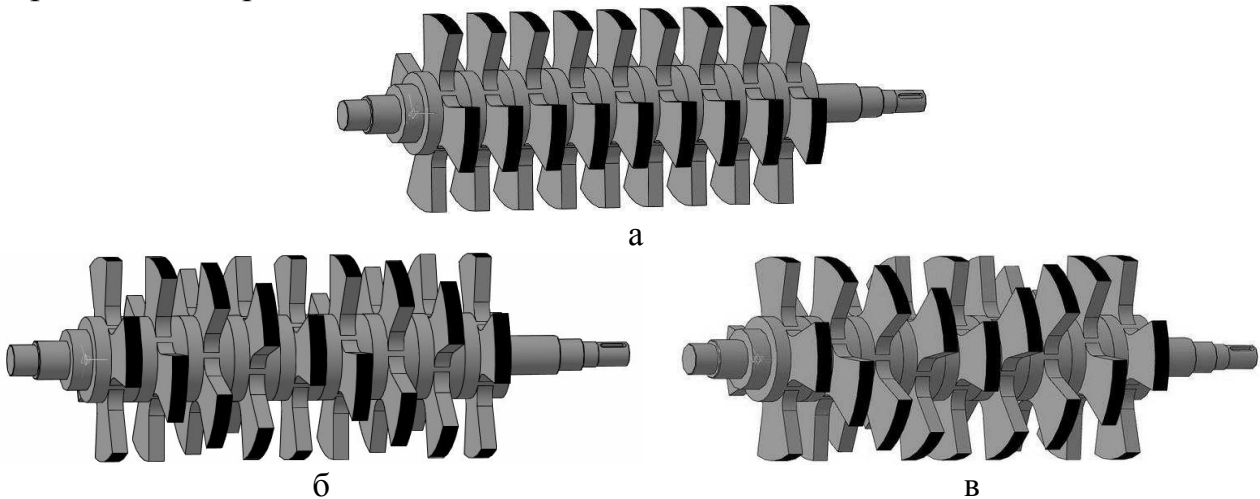


Рис. 1. Типы роторов роторной зубчатой дробилки по расположению зубьев на валу: а – линейный, б – спиральный; в – шевронный

В работах [4-7] для повышения эффективности роторных зубчатых дробилок предложено использовать ротора с нелинейным расположением зубьев звездочек на роторе (рис. 1,б,в), при использовании которых происходит поэтапное внедрение пирога 2 в рабочее пространство (рис. 2), что обеспечивает его дробление в зоне приемного стола 3 на куски определенного размера, не превышающего значения задаваемого конструктивно-технологическими параметрами машины (скорости вращения ротора, длины звездочек, расстояния от внешней грани зубьев до приемного стола).

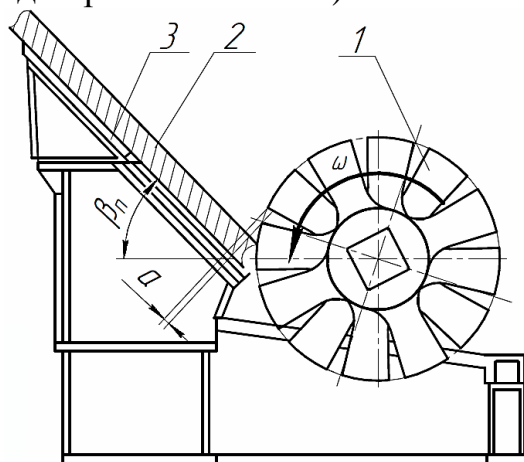


Рис. 2. Схема взаимодействия звездочек ротора с нелинейным расположением зубьев с пирогом агломерата

Такие условия нагружения дробимого материала также сказываются на энергосиловых параметрах привода дробилки [4, 6], так как сила, возникающая

при разламывании пирога агломерата о колосниковую решетку, значительно больше, нежели при его разрушении о консольную часть приемного стола.

Реализация мероприятий, направленных на усовершенствование роторной зубчатой дробилки, проведена в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК». На рисунке 3 представлен ротор со спиральным расположением зубьев звездочек на валу (рис. 3,а) и рабочее пространство дробилки усовершенствованной конструкции (рис. 3,б) прошедшей успешное испытание и внедрение в агломерационном цехе [4, 6].

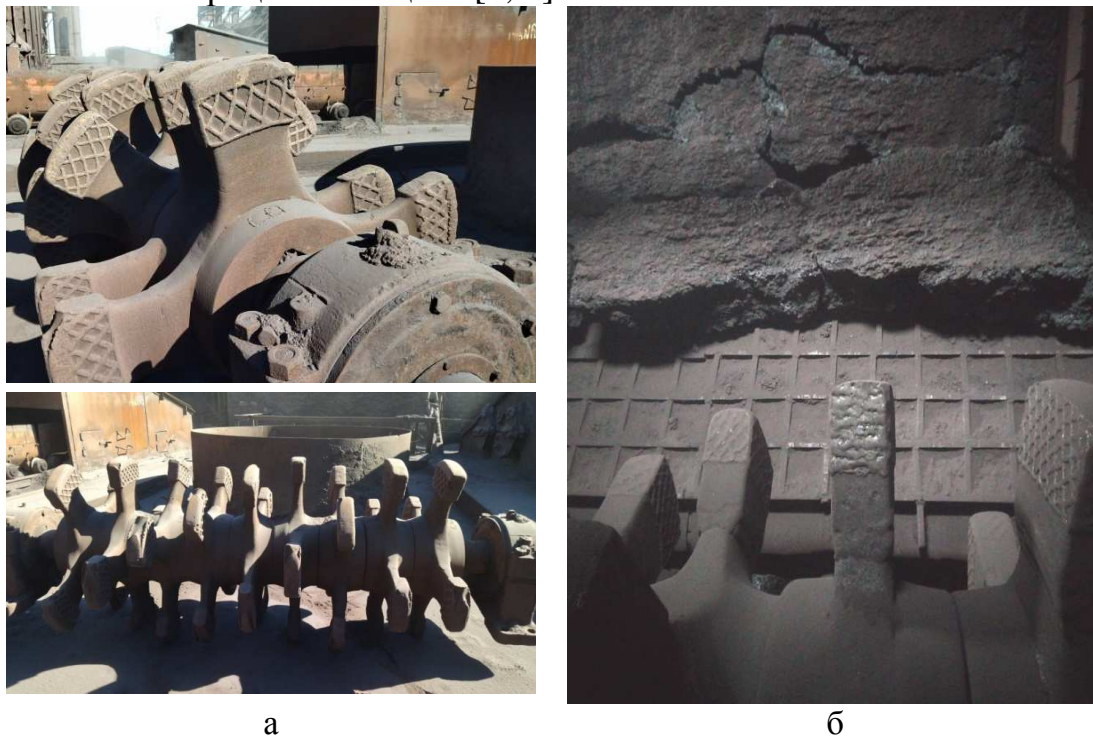


Рис. 3. Дробилка ДО-1300-2700-61 усовершенствованной конструкции: ротор с нелинейным расположением зубьев (а) и рабочее пространство (б) дробилки

Промышленные испытания модернизированной дробилки показали стабилизацию фракционного состава дробленого агломерата, что выразилось в отсутствии крупных кусков в дробленном продукте, превышающих своими размерами верхний предел требуемой фракции в 80 мм. При этом после классификации агломерата на грохоте количество возврата увеличилось на 2...4% по сравнению с использованием дробилки с ротором линейного типа, что говорит о повышении доли гарантированно раздробленных кусков без нарушения целостности структуры и их высокоэффективном отсеивании.

В тоже время одним из главных показателей результативности предложенных мероприятий является снижение количества отсевов при классификации агломерата на тракте подачи шихтовых материалов доменной печи №1 АМК ООО «ЮГМК» на 6...7%. Это обусловлено тем, что при дроблении аглопирога в усовершенствованной дробилке обеспечивается стабилизация фракционного состава и снижается наличие хрупких фаз в кусках материала, термических и механических напряжений в отдельных блоках, приводящих к саморазрушению кусков агломерата в вагон-хопрах, бункерах, перегрузочных узлах, конвейерах при транспортировке и перегрузках.

Также установлено, что при использовании новой конструкции ротора наблюдается изменение степени износа отдельных рабочих узлов: износ зубьев звездочек уменьшился в 1,2 раза за счет уменьшения силы дробления, действующей на рабочую поверхность зубьев; увеличение интенсивности изнашивания футеровочных плит приемного стола в 1,5 раза, вследствие того, что разрушение фактически всего аглоспека обеспечивается в зоне приемного стола; снижение степени износа колосников в 1,9 раза обусловленное уменьшением количества материала, раздавливаемого о колосники.

Список литературы

1. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Власенко Д.А., Левченко Э.П., Жильцов А.П. и др. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет: учебное пособие. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2023. – 140 с.
3. Власенко Д.А., Левченко Э.П. К вопросу уточнения систематизации валковых и роторных зубчатых дробилок // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 7-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 24-26 мая 2021 года. Том 3. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. – С. 100-103.
4. Власенко Д.А. Исследование процесса дробления агломерата и промышленное освоение усовершенствованной роторной зубчатой дробилки // Металлург – 2024. – № 3. – С. 30-35.
5. Власенко Д.А., Долгих В.П. Исследование процесса разрушения хрупких тел деформацией сжатия в валковых дробилках // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 46-52. – doi.org/10.26160/2658-3305-2023-20-46-52.
6. Власенко Д.А., Левченко Э.П. Развитие научных основ и практика повышения эффективности процессов дробления в роторных зубчатых дробилках. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – 143 с.
7. Патент № 196194 РФ. Ротор одновалковой зубчатой дробилки / Д.А. Власенко, А.П. Жильцов, Э.П. Левченко, В.В. Мороз, А.С. Мягков. – Заявка № 2019137708 от 21.11.2019; опубл. 19.02.2020, Бюл. №5.

Сведения об авторе:

Власенко Дмитрий Алексеевич – к.т.н.

УСИЛИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЭЛЕКТРОД ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ, ПРИ ЕГО УПОРЕ В ШИХТУ

Астапенко Э.С., Кахиев Р.Н.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электропривод, электрод, регулятор мощности дуги, шихта.

Аннотация. При пуске в ход дуговой сталеплавильной печи привод регулятора перемещает электрод вниз до касания шихты и загорания электрических дуг. При наличии в шихте не проводящих ток фрагментов происходит упор электрода и возможна его поломка. В статье определены допустимые усилия, действующие на электрод со стороны привода, при различных параметрах шихты. Предлагается контролировать состояние упора электрода в шихту по возрастанию тока якоря перемещающего электрод двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Это позволит создать контур предотвращения поломок электродов.

THE FORCES ACTING ON THE ELECTRODE OF AN ARC STEEL-SMELTING FURNACE ARE WHEN IT RESTS ON THE CHARGE

Astapenko E.S., Kakhiev R.N.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk

Keywords: arc steelmaking furnace, electric drive, electrode, arc power regulator, charge.

Abstract. When starting an arc steelmaking furnace, the regulator drive moves the electrode down until the charge touches and the electric arcs ignite. If there are fragments in the charge that do not conduct current, the electrode stops and its breakdown is possible. The article defines the permissible forces acting on the electrode from the drive side at different charge parameters. It is proposed to control the state of the electrode stop in the charge according to the increasing armature current of the DC motor moving the electrode of independent excitation. This will create a contour to prevent electrode breakdowns.

Производство стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) растет с каждым годом. По состоянию на 2011 год она составляет 28%. Так как основное управление процессом выплавки стали в ДСП осуществляется посредством перемещения электродов, то регулятор мощности дуги (РМД) является важнейшим звеном в автоматизации технологического процесса выплавки электростали.

Кроме основной задачи стабилизации длины дугового промежутка РМД должен обеспечивать автоматическое зажигание дуги при пуске печи в ход после завалки или подвалки шихты. В дифференциальных регуляторах этот режим обеспечивается самим принципом формирования сигнала рассогласования [1].

При пуске печи в ход имеется лишь сигнал напряжения, под действием которого привод перемещает электрод вниз. В момент соприкосновения первого электрода с шихтой напряжение становится малым, и регулятор останавливает электрод. При подходе второго и третьего электродов зажигаются дуги, появляется сигнал тока дуги, и привода устанавливают положения электродов, обеспечивающие требуемый электрический режим.

Так осуществляется пуск печи загруженной шихтой хорошего качества. В ДСП в качестве шихтового материала используется лом черного металла. В состав лома входят литейные отходы собственного производства, обрезь слитков, отходы при прокатке и лом, собранный организациями вторчермета. Шихта неоднородна по составу, имеет различную форму и размеры. Литейные отходы зачастую покрыты шлаком и являются токонепроводящими. Соприкосновение электрода с такой шихтой не создает электрического контакта, и дуга не загорается. При этом привод продолжает перемещать электрод вниз, что приводит к его упору в шихту и поломкам, вызывающим аварийные простои печи. Кроме снижения производительности и дополнительного расхода электроэнергии на компенсацию тепловых потерь, поломки электродов вызывают дополнительные потери электродов, составляющие до 20% от их общего расхода, который в свою очередь составляет в условиях сталеплавильного цеха до 15% эксплуатационных затрат на производство стали [2].

Если для электрогидравлических регуляторов мощности проблема поломки электродов решена, то для электромеханических регуляторов, которыми оснащено большинство печей малой мощности, существующие технические решения не гарантируют предотвращение поломок. Зажигание дуги оператором в ручном режиме и ручной контроль плавки до устойчивого горения дуги малоэффективен при высоких (до 4,5 м/мин) скоростях перемещения электродов. При этом угроза поломок электродов вынуждает сохранять до сих пор операторов на ДСП, не передавая их функции сталевару.

Для решения задачи предотвращения поломок электродов при пуске печи в ход определим усилия, действующие на электрод при его упоре в шихту. Наиболее опасными являются изгибающие усилия, так как предел прочности на изгиб графитированных электродов примерно в 2,5 раз меньше предела прочности на сжатие [1]. Изгибающее усилие возникает при упоре вертикально закрепленного электрода в шихту, поверхность которой наклонена к горизонту под некоторым углом $\varphi_{\text{ш}}$ (рис. 1). В этом случае усилие F , действующее на электрод со стороны привода, может быть разложено на две составляющие: нормальную $F_{\text{н}}$ и касательную $F_{\text{к}}$:

$$F_{\text{н}} = F \cos \varphi_{\text{ш}}, \quad (1)$$

$$F_{\text{к}} = F \sin \varphi_{\text{ш}}. \quad (2)$$

Нормальная составляющая уравнивается соответствующей реакцией шихты, а касательная – силой трения $F_{\text{тр}}$ конца электрода по шихте при выполнении условия:

$$\text{tg} \varphi_{\text{ш}} < K_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения скольжения электрод – шихта.

Если условие (3) не выполняется, то некомпенсированная силой трения часть $\Delta F_{\text{к}}$ касательного усилия $F_{\text{к}}$ вызывает появление изгибающей силы $F_{\text{и}}$ и дополнительного нормального усилия $\Delta F_{\text{н}}$. В этом случае имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} F_{И} \cdot \cos \varphi_{Ш} = F_{К} - F_{ТР}, \\ \Delta F_{Н} = F_{И} \cdot \sin \varphi_{Ш}, \\ F_{ТР} = K_{ТР} (F_{Н} + \Delta F_{Н}). \end{cases} \quad (4)$$

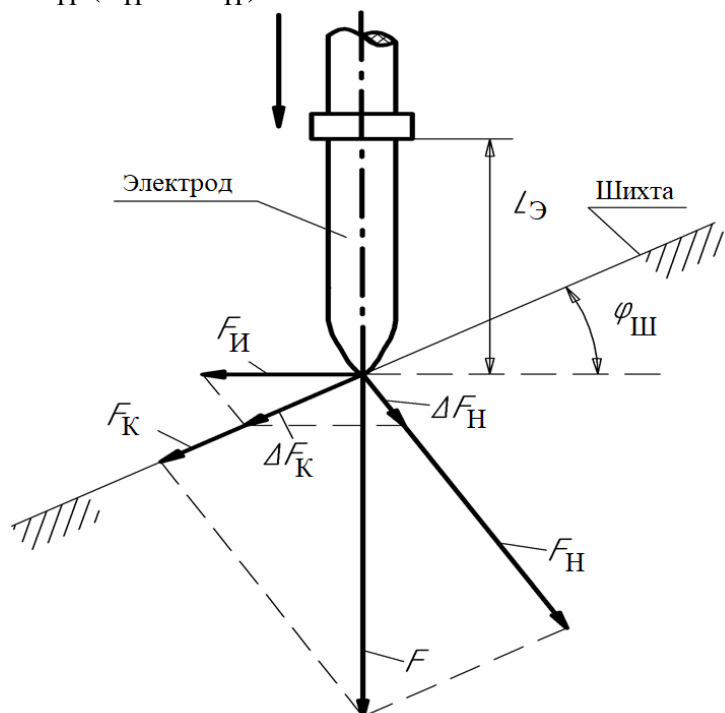


Рис. 1. Разложение сил при упоре электрода в шихту

Решая (1), (2) и (4) относительно изгибающего усилия получаем:

$$F_{И} = F \frac{tg\varphi - K_{ТР}}{1 + K_{ТР} \cdot tg\varphi_{Ш}}. \quad (5)$$

Выражение (5) имеет физический смысл только при невыполнении условия (3). Допустимое изгибающее усилие $F_{Ид}$ для закрепленного в электрододержателе одним концом электрода выражается:

$$F_{Ид} = \frac{[\delta]W}{L_{Э}}, \quad (6)$$

где $[\delta]$ – допустимое напряжение изгиба электрода;

W – момент сопротивления сечения электрода при изгибе;

$L_{Э}$ – длина электрода до места закрепления в электрододержателе.

Решая совместно (5) и (6) получаем выражение для определения допустимой величины усилия, действующего на электрод со стороны привода:

$$F_{Д} = \frac{[\delta]W}{L_{Э}} \cdot \frac{1 + K_{ТР} \cdot tg\varphi_{Ш}}{tg\varphi_{Ш} - K_{ТР}}. \quad (7)$$

Для предохранения электрода от поломки при упоре в токонепроводящую шихту необходимо, как следует из (7), ограничить величину усилия F , действующего в момент упора на электрод со стороны привода до уровня $F < F_{Д}$.

На рисунке 2 представлен график зависимости допустимых усилий $F_{Д}$, действующих на электрод со стороны привода, из условий ограничения прочности электрода на сжатие и изгиб, в зависимости от угла наклона шихты $\varphi_{Ш}$, в которую он упирается. Графики построены для графитированного

электрода диаметром 200 мм и длиной $L_{\text{Э}} = 2000$ мм, коэффициент трения электрод-сталь $K_{\text{ТР}} = 0,12$, предел прочности на изгиб 6,5 МПа, предел прочности на сжатие 20,6 МПа,

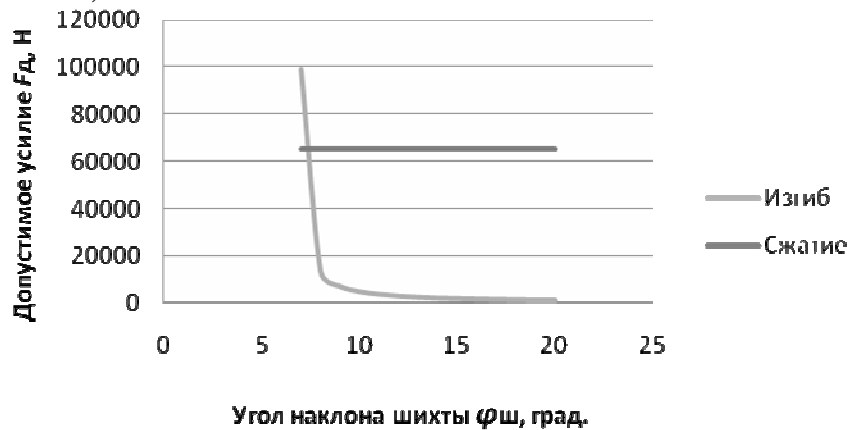


Рис. 2. Зависимость допустимых усилий при упоре электрода в шихту

Видно, что при невыполнении условия (3) величина допустимого усилия $F_{\text{д}}$ резко снижается в связи с появлением изгибающего усилия. Интерес представляет пологий участок графика при $\varphi > 7^{\circ}$. Рассмотрим его укрупнено при углах наклона шихты более 10° (рис. 3). Анализ характера графика показывает, что при углах наклона шихты в пределах 20° величина действующего на электрод допустимого усилия составляет более 10000 Н. В таких пределах величину усилия в реальных условиях работы ДСП можно проконтролировать по увеличению момента двигателя перемещения электрода, возникающем при упоре электрода в шихту [3].

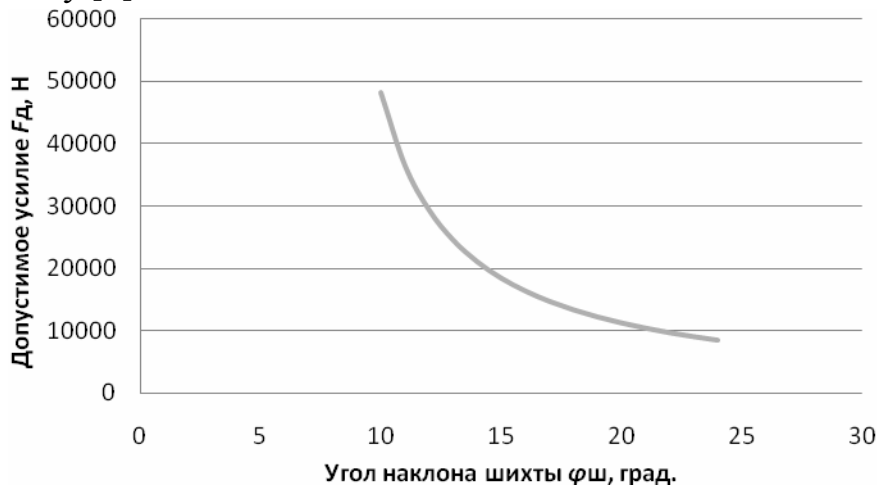


Рис. 3. Участок зависимости допустимого усилия при упоре электрода

В большинстве ДСП малой мощности применяются регуляторы мощности дуги с электромеханическим приводом и механической передачей винт-гайка или зубчатое колесо-рейка. В качестве электродвигателей в основном применяются двигатели постоянного тока независимого возбуждения, у которых ток якоря пропорционален моменту.

При пуске печи в ход электропривод перемещает электрод вниз с небольшим моментом (током якоря) в силу неуравновешенности массы электродной свечи вместе с электрододержателем и стойкой. Увеличение тока якоря двигателя (выше тока при опускании электрода) и отсутствии тока дуги

свидетельствует об упоре электрода в шихту. Наличие информации об упоре в шихту позволяет организовать контур предотвращения поломок электродов и разработать соответствующий алгоритм управления, как для эксплуатируемых регуляторов мощности, так и для вновь проектируемых.

Список литературы

1. Пирожников В.Е. Автоматизация электросталеплавильного производства. – М.: Metallurgy, 1985. – 184 с.
2. Маслов Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дугowymi сталеплавильными печами, снижающими поломки электродов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.10. – М.: ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2014. – 20 с.
3. Астапенко Э.С., Кахиев Р.Н. Синтез контура ограничения механических усилий на электрод при его упоре в шихту // Современные проблемы машиностроения. Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. – Томск: Томский политехнический университет, 2022. – С. 85-86.

Сведения об авторах:

Астапенко Эдуард Степанович – к.т.н., с.н.с., доцент;

Кахиев Руслан Нариманович – к.т.н., доцент.

УДК 621.01:621.891

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГООРУБЕНЧАТОГО ВАЛЬЦОВОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ СОРТИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ СЕМЯН

*Князев А.В., Бородин Н.А., Ткачев В.В., Поздняков Е.В., Доманин К.А.
Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж*

Ключевые слова: сепаратор, процесс сортирования, полнота выделения проходовой фракции, осевая скорость частиц, семена.

Аннотация. Получение высококондиционного посевного материала возможно при сохранении посевных качеств семян, уменьшении степени их травмирования и циклов обработки, снижении потерь при обработке и при высева в питомнике. Исследованиями установлено, что при сортировании семян сосны обыкновенной на четыре размерные группы (фракции) с одинаковым размерным промежутком, получается выровненный посадочный материал, как по размерам (толщине), так и по массе 1000 штук. При этом масса 1000 штук семян в соседних фракциях отличается в среднем на 10...15%, что является необходимостью при их отдельном высева в питомнике. Выявлена динамика распределения трудноотделимых примесей и отходов в получаемых фракциях семян. Исходя из этого, существует необходимость в разработке устройства для сортирования семян хвойных пород, которое обеспечит качество и эффективность технологического процесса, а также получение высококондиционного посевного материала за минимальное количество циклов обработки.

ANALYTICAL STUDY OF THE DESIGN PARAMETERS OF A MULTISTAGE ROLLER SEPARATOR FOR SORTING FOREST SEEDS

*Knyazev A.V., Borodin N.A., Tkachev V.V., Pozdnyakov E.V., Domanin K.A.
Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozova, Voronezh*

Keywords: separator, sorting process, completeness of separation of the passing fraction, axial velocity of particles, seeds.

Abstract. Obtaining high-quality seed material is possible while maintaining the sowing qualities of the seeds, reducing the degree of their injury and processing cycles, reducing losses during processing and during sowing in the nursery. Research has established that when sorting Scots pine seeds into four size groups (fractions) with equal dimensional intervals, the resulting planting material is aligned, both in size (thickness) and in weight, 1000 pieces. At the same time, the weight of 1000 seeds in neighboring fractions differs by an average of 10...15%, which is necessary when sowing them separately in the nursery. The dynamics of the distribution of difficult-to-separate impurities and waste in the resulting seed fractions has been revealed. Based on this, there is a need to develop a device for sorting coniferous seeds, which will ensure the quality and efficiency of the technological process, as well as the production of high-quality seed material in a minimum number of processing cycles.

Предпосевная обработка лесных семян является заключительной стадией в их очистке от примесей и сортирование, является важной составляющей возобновления лесных насаждений. К качеству обработки, так же как и к качеству самого семенного материала, предъявляются высокие требования. В связи с этим известные семяочистительные машины, такие, как СУМ-1, МОС-1А

и другие сортировальные установки требуют модернизации. Поэтому, выбрана и обоснована конструкция многоступенчатого вальцового сепаратора, определены геометрические соотношения, представлены аналитические исследования описывающие движение частиц по рабочему органу, их движение после отрыва от вальцов, размещение приемных лотков МВС.

Предложенная конструкция многоступенчатого состоит из рамы с винтовыми механизмами подъема, на которой монтируются все узлы и агрегаты, загрузочный бункер, имеющий заслонки грубой и точной подачи. Механизм равномерной подачи, выполнен в виде двух шлифованных вальцов, вращающиеся в противоположные стороны с большой частотой [1].

Для качественного процесса сортирования семян вальцы ориентирующе-сортирующего приспособления выполнены многоступенчатыми и, как вальцы механизма равномерной подачи вращаются с большой частотой в противоположные стороны. Ящики предназначены для сбора получаемых фракций семян. Вальцы механизма равномерной подачи и вальцы ориентирующе-сортирующего приспособления приводятся во вращение от электродвигателя, посредством плоскоременной передачи.

С целью обновления конструктивно-технологических параметров многоступенчатого вальцового сепаратора проведены аналитические исследования. Рассмотрен процесс движения частиц по рабочей поверхности вальцов.

При движении по рабочему органу на частицу действуют силы: тяжести $G_n = mg$, две силы трения скольжения по вальцам F_{mp} , сила сопротивления воздуха $F_{сопр}$, учет которой необходим из-за малой массы частицы.

Дифференциальное уравнение движения частицы по рабочему органу запишется в следующем виде [2]:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = mg \sin \alpha - 2F_{mp} - F_{сопр}, \quad (1)$$

где α – угол наклона вальцов, ξ – нормальная составляющая скорости частиц (продольная), t – время движения частиц по поверхности рабочего органа сепаратора.

В свою очередь:

$$F_{mp} = \frac{mg \cos f}{Q_1 + Q_2 \left(C_1 + C_2 \frac{\pi D n_g}{60} \right)}, \quad (2)$$

где m – масса частицы; g – ускорение свободного падения; f – коэффициент трения; C_1 и C_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств семян и от шероховатости вальцов, D – диаметр вальцов, n_g – окружная скорость вальцов.

$$Q_1 = const = \sqrt{2(1 + \cos \gamma)}, \quad Q_2 = const = \sqrt{2(1 + \cos \gamma)}, \quad (3)$$

где γ – угол между линиями действия нормальных динамических реакций со стороны вальцов.

Введя обозначения, получим:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = mg \sin \alpha - 2Kmgf \cos \alpha - kV^2, \quad (4)$$

где k – переменная величина.

После сокращения на массу и приведения к каноническому виду уравнение движения частицы представится в виде:

$$\ddot{\xi} = g \sin \alpha - 2Kgf \cos \alpha - \frac{k}{m} V^2, \quad (5)$$

где введено обозначение $K = \left[Q_1 + Q_2 \left(C_1 + C_2 \frac{\pi D \cdot n}{60} \right) \right]^{-1}$.

Скорость частицы в момент времени ее отрыва от вальцов составит:

$$V = \sqrt{\frac{mg(\sin \alpha - 2Kf \cos \alpha)}{k}}. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) позволяет сделать заключение о том, что осевая скорость движения частицы по рабочему органу зависит от переменной величины k , коэффициента трения частиц по рабочему органу f и угла наклона вальцов к горизонту, при увеличении шероховатости поверхности и угла наклона рабочего органа осевая скорость перемещения частицы уменьшается. Снижение же шероховатости или повышение частоты вращения вальцов ведет к увеличению осевой скорости частиц.

Получены аналитические выражения, описывающие фазу полета, то есть движения семян после отрыва от вальцов [1-3]:

$$\begin{aligned} (V_{omp})_x &= V_{ox} = V_{omp} \cos \alpha, \\ (V_{omp})_y &= V_{oy} = V_{omp} \sin \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

где V_{omp} – скорость отрыва частицы от вальцов.

$$m \ddot{x} = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad m \ddot{y} = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (8)$$

После преобразований получим выражение для закона изменения во времени продольной скорости частицы по оси X :

$$V_x(t) = \frac{V_{ox}}{\frac{R_5}{m} V_x \cdot t + 1} \quad (9)$$

где $R_5 = \frac{\pi C_v g_B d^2}{8}$, по оси Y : $V_y(t) = \frac{V_{oy} + qt}{\frac{R_6}{m} V_y t + 1}$, где $R_6 = \frac{\pi C_v g_B d^2}{8}$.

Выводы

1. Из полученного выражения (9) видно, что продольная скорость частицы V_x в фазе полета все время уменьшается (вплоть до $V_x \approx 0$ при больших t), что обусловлено как формой траектории падающих частиц, так и силой сопротивления воздуха. Поэтому потери продольной скорости частицы обратнопропорциональны ее массе.

2. Величина скорости частицы на оси Y все время возрастает за счет работы силы тяжести, которая повышает работу силы сопротивления воздуха

($qt > \frac{R_6}{m} V_y t$) в интервале времени t , поскольку время полета частицы от момента проваливания и до момента падения мало.

3. Результаты теоретических исследований показывают, что основное влияние на полноту выделения проходовой фракции семян оказывают угол наклона рабочего органа α , частота вращения рабочего органа n и шероховатость поверхности вальцов.

Список литературы

1. Голев А.Д. Обоснование технологических и конструктивных параметров сепаратора вальцового типа для вторичной очистки и сортирования семян хвойных пород: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1997. – 209 с.
2. Князев А.В. Обоснование параметров и разработка конструкции многоступенчатого вальцового сепаратора для сортирования семян хвойных пород: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2001. – 203 с.
3. Свиридов Л.Т. Сортирование лесных семян. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – 298 с.

Сведения об авторах:

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

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

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

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

Доманин Кирилл Алексеевич – студент.

УДК 625.08

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИЛОЧНОГО ПОГРУЗЧИКА С ПОМОЩЬЮ ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА

Семенов Д.А., Воронцов И.И.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: вилочный погрузчик, поворотный механизм, автоматизация, производительность, рабочий цикл.

Аннотация. В данной статье рассматривается подход к повышению производительности вилочного погрузчика с точки зрения производства отечественных деталей и узлов. В ходе исследования была изложена конструктивная схема вилочного погрузчика, описаны основные узлы и функциональные особенности машины, приведена конструктивная схема поворотного механизма, описан его принцип работы, сделаны соответствующие выводы о вводе в эксплуатацию рассматриваемого узла поворота.

INCREASING FORKLIFT PRODUCTIVITY WITH A SWIVEL MECHANISM

Semenov D.A., Vorontsov I.I.

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg*

Keywords: forklift, turning mechanism, automation, productivity, working cycle.

Abstract. This paper examines the approach to improving forklift productivity from the point of view of domestic parts and assemblies production. In the course of the study the structural scheme of the forklift truck has been outlined, the main units and functional features of the machine have been described, the structural scheme of the turning mechanism has been given, its operating principle has been described, appropriate conclusions have been made about the commissioning of the considered turning unit.

В настоящее время вопрос повышения производительности машин и оборудования различных отраслей машиностроения стоит очень остро. Существует техника, которая не поддавалась усовершенствованию уже на протяжении многих десятков лет. Рассмотрим решение данной проблемы на примере логистической сферы.

Складские помещения являются неотъемлемой частью логистики. В наши дни известно множество путей повышения производительности рабочих процессов по сборке заказов, разгрузки продукции и ее транспортировки из одной части склада в другую. Такие технологии чаще всего связаны с автоматизацией [1-3].

В Европе и в Азии роботы-доставщики уже вошли в обыденный ход жизни производственной линии, на очереди стоят и вилочные погрузчики – основные машины на складском объекте.

Вилочный погрузчик является универсальной подъемно-транспортной машиной, которая осуществляет погрузку, разгрузку и транспортировку различных видов грузов по территории складского помещения.

Конструкция вилочного погрузчика является универсальной вне зависимости от марки, модели или технических характеристик, и условно ее можно разделить на две части: рабочий узел машины и узел управления (рис. 1) [1-4].

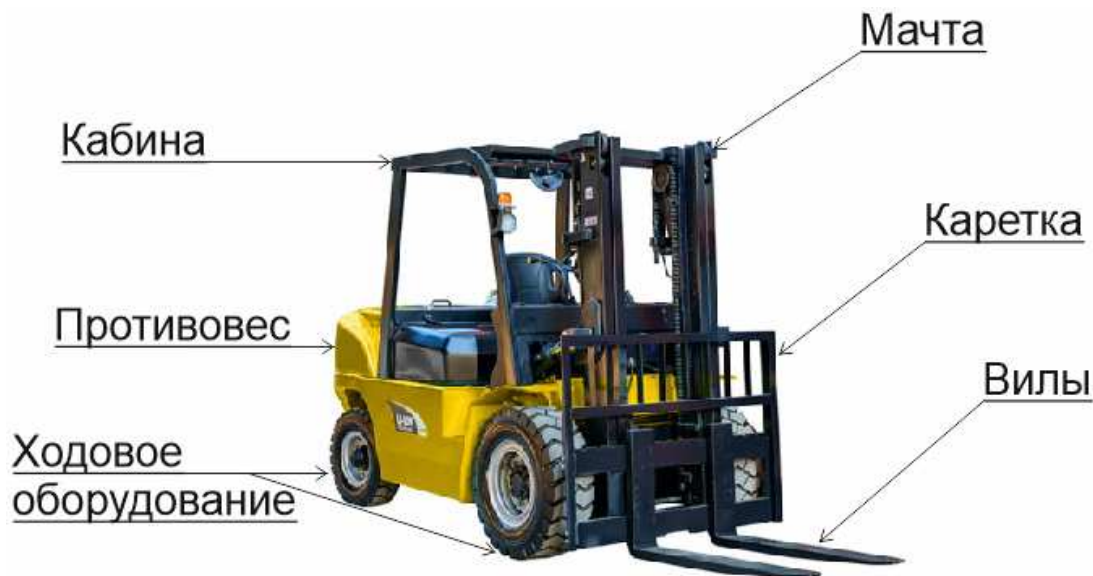


Рис. 1. Конструкция вилочного погрузчика

В рабочем узле машины находятся грузозахватные вилы, которые являются основным рабочим органом машины, мачта и каретка. В узле управления находятся кабина оператора, противовес и ходовая часть машины. Подробная конструктивная характеристика погрузчика приведена в таблице 1.

Табл. 1. Конструктивные элементы вилочного погрузчика

№	Наименование	Функционал
1	грузозахватные вилы	подъем/опускание груза
2	мачта	отклонение вилок от вертикальной оси
3	каретка	удержание груза при движении
4	кабина оператора	органы управления погрузчика
5	противовес	защита от опрокидывания
6	ходовое оборудование	передвижение машины

Повышением производительности вилочного погрузчика занимаются уже на протяжении нескольких десятков лет, однако экстремум развития пришелся на последние пять лет, когда европейские инженеры стали активно совершенствовать технику различным оборудованием, которое в результате привело к полноценной автоматизации. К сожалению, сейчас говорить о том, что большинство погрузчиков осуществляют рабочий цикл без помощи оператора, не стоит, поскольку подход к беспилотному управлению в складском хозяйстве нуждается в индивидуальном рассмотрении, необходимо ещё время для того, чтобы можно было осуществлять модернизацию погрузчиков любой модели на автоматизированный цикл [4-6].

Но пока инженеры зарубежных стран стараются разработать универсальный алгоритм, есть возможность создать предпосылки к

отечественной автоматизации посредством повышения производительности машины с помощью поворотного механизма.

Складские помещения обладают проходами разной ширины, и в частности, встречаются ситуации, когда оператору погрузчика необходимо выполнить несколько маневров для того, чтобы отгрузить или наоборот, захватить паллет с грузом. В таких случаях уходит много времени на лишние движения, что увеличивает рабочий цикл машины, а значит, и ее производительность.

Подобную проблему можно решить поворотным механизмом, который позволит повернуть рабочий узел машины, оставив при этом положение машины относительно складского прохода неизменным. Рабочий цикл операций в таком случае уменьшится, риск повреждения паллетов с грузом и самой техники станет ниже, поскольку ряд внешних факторов, присутствующих при маневрировании погрузчика, будет исключен.

Поворотный механизм по своей структуре представляет собой червячный редуктор, распределительный вал и несколько тяг, которые служат в качестве крепления к корпусу машины и к мачте погрузчика (рис. 2).

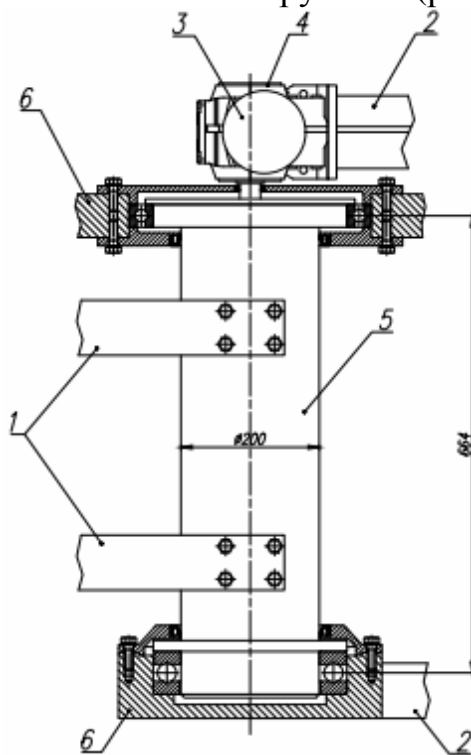


Рис. 2. Поворотный механизм: 1, 2 – тяги крепления, 3 – гидромотор, 4 – червячный редуктор, 5 – распределительный вал, 6 – опорные подшипники

Принцип работы механизма заключается в следующем: для поворота рабочего узла машины оператор переключает с помощью рычага управления поток гидравлической жидкости на гидромотор, в результате чего червячный редуктор приводит во вращение распределительный вал и грузозахватные вилы, мачта и каретка поворачиваются на угол в 90 градусов относительно положения погрузчика. Опорные подшипники в конструкции механизма служат как удерживающая сила, исключая лишние степени свободы распределительного вала (рис. 3).

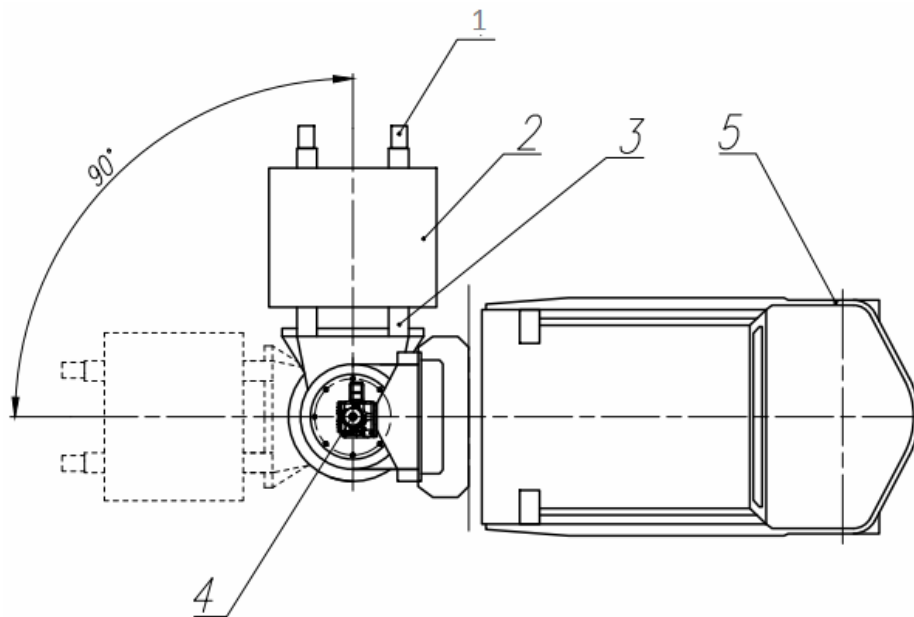


Рис. 3. Схема поворота рабочего узла вилочного погрузчика: 1 – грузозахватные вилы, 2 – паллет с грузом, 3 – мачта, 4 – поворотный механизм, 5 – противовес

Использование поворотного механизма позволит повысить производительность машины и при этом станет отправной точкой для последующей автоматизации погрузочно-разгрузочных операций, а впоследствии и полноценной автоматизацией погрузчика, при этом такой подход к созданию беспилотного погрузчика будет строиться на отечественных деталях и ресурсах, что позволит избежать зависимость от зарубежных производителей, что весьма актуально в реальном времени с учетом санкций и ограничений европейских производителей.

Список литературы

1. Гришко Г.С., Минин В.В. Рабочее оборудование универсальных малогабаритных погрузчиков. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2020. – 192 с.
2. Семенов Д.А., Воронцов И.И. Статистические и динамические показатели системы управления автоматизированного вилочного погрузчика // Строительные и дорожные машины. – 2023. – №2. – С. 38-41.
3. Федотов П.И. Подъемно-транспортные машины. – М.: Изд-во АСВ, 2019. – 200с.
4. Фразелли Э. Мировые стандарты складской логистик. – М.: Альпина Паблицер, 2021. – 336 с.
5. Минин В.В. Концепция повышения эффективности универсальных малогабаритных погрузчиков. – М.: Инфра-М, 2020. – 304 с.
6. Семенов Д.А. Современные тенденции развития вилочных погрузчиков // Грузовик. – 2021. – №5. – С. 36-40.

Сведения об авторах:

Семенов Дмитрий Александрович – аспирант;
Воронцов Иван Иванович – д.т.н., профессор.

УДК 621.891.22

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ ТРЕНИИ ЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

Бирюков В.П., Якубовский А.А., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: износ, закрепленное абразивное зерно, текстолит, оксафен.

Аннотация. Работа посвящена определению износостойкости при изнашивании закрепленным зерном карбида кремния образцов текстолита ТПТ, ТПТК и оксафена. Получены закономерности стойкости к абразивному изнашиванию закрепленным абразивным зерном в зависимости от состава текстолита. Наибольшей износостойкостью обладали образцы текстолита ТПТК. Результаты исследований могут быть использованы для замены деталей в узлах трения подвижного состава.

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF POLYMER MATERIALS ON WEAR RESISTANCE DURING FRICTION WITH FIXED ABRASIVE GRAIN

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: wear, fixed abrasive grain, textolite, oxaphene.

Abstract. The work is devoted to determining the wear resistance of TPT, TPTK and oxafene textolite samples during wear with a fixed silicon carbide grain. Patterns of resistance to abrasive wear by fixed abrasive grain are obtained depending on the composition of the textolite. The samples of PTK textolite had the greatest wear resistance. The results of the research can be used to replace parts in the friction units of rolling stock.

Разработка новых полимеров и их композитов и изготовление деталей на их основе сыграли очень важную роль в машиностроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности. Самосмазывание, высокое соотношение прочности к массе детали, эстетичный внешний вид характеристики, которые привлекли разработчиков новых изделий. Абразивный износ является основной причиной выхода из строя большинства деталей из полимеров и композитов и изучение механизмов изнашивания и стойкости полимеров к нему является актуальной задачей.

Для испытания [1] были выбраны материалы из текстолита, политетрафторэтилена с добавлением 15% графита (ПТФЭ+Гр). Определение трибологических характеристик проводили на машине трения по схеме "диск (анодированный алюминиевый сплав) – колодка (образцы текстолита и ПТФЭ+Гр)", при давлении 7 МПа, времени цикла 2 с, линейной скорости 21 м/с. По результатам испытания установлено, что самая низкая скорость изнашивания и коэффициент трения были у ПТФЭ+Гр, а износ был вызван пластическим оттеснением материала. Однако свойства текстолита были незначительно хуже ПТФЭ+Гр поэтому оба материала способны работать при высоких скоростях скольжения.

Образцы [2] были изготовлены из эпоксидной смолы с добавлением ценосферы 20, 40 и 60% с размерами 75×25×10 мм. Испытание на абразивное изнашивание проводили при нагрузках 10, 20, 30 и 40 Н, частоте вращения диска 200 мин⁻¹, расходе абразива 200 г/мин, продолжительности циклов 10, 15, 20 и 25 минут. Установлено, что минимальная скорость износа – 0,124·10⁻⁸ м³/Н·м получена на образцах с добавками 60% ценосферы при нагрузке 40 Н, времени цикла 15 минут. Данный эксперимент показал, что введение в композит ценосферы приводило к повышению износостойкости, уменьшению размеров частиц износа и повышению устойчивости к эрозии.

Природные композиты [3] EP, EP8, EP16, EP24, EP32 были изготовлены с помощью эпоксидной смолы с разным процентным содержанием джутовых и банановых волокон с размерами 8×8×3,2 мм. Испытание на износ проводили по схеме: «штифт (образец) – диск (с наклеенной наждачной бумагой SiC разной зернистости P180, P320, P400, P600) при нагрузке 10 Н, скорости скольжения 1 м/с, пути трения 100 м. Композиты EP16 показали наилучшую износостойкость. Установлено, что при зернистости P180 образцы имели наивысшую скорость изнашивания. Механизмы разрушения включали микрорезание, измельчение волокон. Образцы композитов с 16 мас.% волокон обладали наилучшей стойкостью к истиранию. Но более высокая объемная доля натуральных волокон в композитах снижала их износостойкость.

Цель работы заключалась в определении стойкости к абразивному изнашиванию закрепленным абразивом образцов из текстолита ТПТ (1), ТПТК (2) и оксафена (3),

Образцы текстолита толщиной 5 мм наклеивались на вкладыш с размерами 70×20×10 мм при помощи цианоакрилатного клея. Испытания на абразивное изнашивание закрепленным зерном выполняли по схеме: «торец кольцевой оправки с наклеенной наждачной бумагой – широкая сторона образца (текстолит, оксафен)». Для испытаний использовали наждачную бумагу карбида кремния с зернистостью P120. Результаты испытаний на абразивное изнашивание закрепленным зерном по трем образцам представлены в таблице 1.

Табл. 1. Потеря массы образцов при испытании закрепленным абразивным зерном

№ образца	Масса до испытаний, г	Масса после испытаний, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы образца, г
1.1	16,6663	16,5925	0,0738	0,0696
1.2	16,5450	16,4791	0,0659	
1.3	16,4791	16,4099	0,0692	
2.1	16,1653	16,0956	0,0697	0,0641
2.2	16,0530	15,9940	0,0590	
2.3	15,9940	15,9303	0,0637	
3.1	16,0680	15,9871	0,0809	0,0829
3.2	15,9350	15,8494	0,0856	
3.3	15,8494	15,7670	0,0824	

Морфология поверхностей трения текстолита и оксафена представлена на рисунке 4. На данном рисунке видно, что основным механизмом износа ТПТ и ТПТК было микрорезание, а у оксафена износ проходил в основном по усталостному механизму.

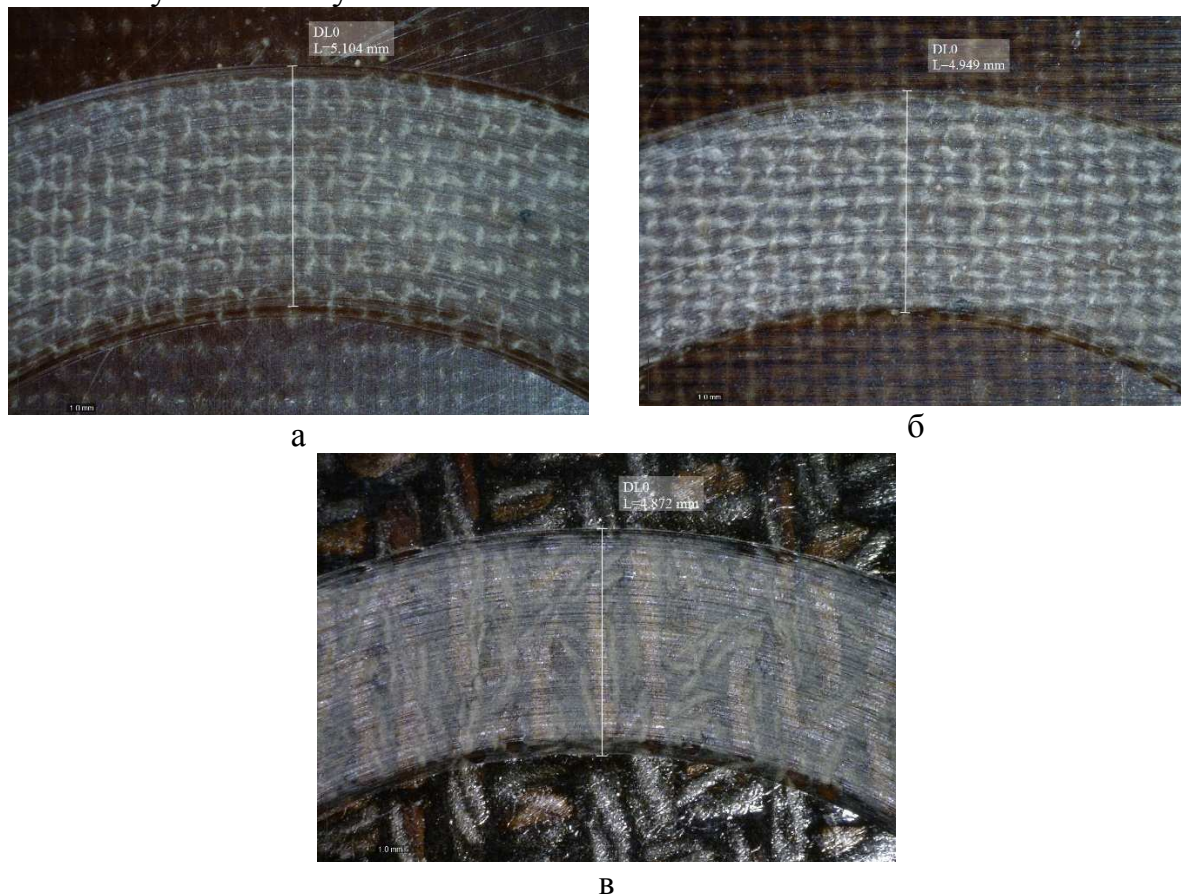


Рис. 4. Морфология поверхности трения образцов: а – ТПТ, б – ТПТК, в – оксафен

Выводы

Проведенные эксперименты показали, что максимальной износостойкостью при изнашивании закрепленным абразивным зерном обладали образцы ТПТК, далее следовали образцы ТПТ. Наихудшие результаты показали образцы оксафена.

Список литературы

1. Boguszewicz P., Perkowski W., Tywoniuk A. Wear of non-metal slides under very high load // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2016, vol. 23(3), P.1231-4005. DOI: 10.5604/12314005.1216401.
2. Mahesh V., Mahesh V., Harursampath D. Three body abrasion wear resistance of cenosphere particle-reinforced syntactic foams developed using molding method // Industrial Engineering and Management, Siddaganga Institute of Technology Polym Eng Sci. 2023, vol. 63. p. 3091-3104, DOI: 10.1002/pen.26430.
3. Krupesh K.S., Suresh R., Rudresh B.M. Effect of abrasive grit grade on the abrasion wear behaviour of long banana-jute fibers reinforced hybrid epoxy composites // Materials Research Express. 2023, vol. 10, p. 125102, DOI: 10.1088/2053-1591/ad1126.

Сведения об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник;
Якубовский Антон Алексеевич – младший научный сотрудник;
Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник.

УДК 621.891.22

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ КРОМКИ ОБРАЗЦОВ

Бирюков В.П.

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

Ключевые слова: лазерное упрочнение, сталь, микротвердость, интенсивность изнашивания, износостойкость.

Аннотация. Работа посвящена определению влияния режимов лазерного упрочнения кромки прямоугольных образцов стали 45 и триботехнических характеристик после лазерной закалки расфокусированным и колеблющимся лучом. Установлено, что обработка кромки образцов расфокусированным непрерывным лазерным лучом приводила к частичному испарению материала и оплавлению кромки образцов независимо от режимов закалки. Применение поперечных колебаний позволило сохранить геометрические параметры кромки образцов и получить микротвердость на 680-890 МПа выше, чем при обработке расфокусированным лучом. Результаты испытаний на интенсивность изнашивания показали повышение износостойкости колеблющимся и расфокусированным лучом в 3,8 и 2,9 раза соответственно по сравнению со сталью 45 в исходном состоянии.

INFLUENCE OF LASER HARDENING MODES AND QUENCHING AREA ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF CAST IRON-STEEL FRICTION PAIRS

Biryukov V.P.

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

Keywords: laser hardening, steel, microhardness, wear intensity, wear resistance.

Abstract. The work is devoted to determining the influence of laser edge hardening modes of rectangular steel 45 samples and tribotechnical characteristics after laser hardening with a defocused and oscillating beam. It was found that processing the edge of the samples with a defocused continuous laser beam led to partial evaporation of the material and melting of the edge of the samples regardless of the quenching modes. The use of transverse vibrations made it possible to preserve the geometric parameters of the edge of the samples and obtain a microhardness 680-890 MPa higher than when processing with a defocused beam. The results of the wear intensity tests showed an increase in the wear resistance of the oscillating and defocused beam by 3.8 and 2.9 times, respectively, compared with steel 45 in its initial state.

Образцы стали 40Cr с размерами 40×40×12 мм и исходной феррито-перлитной структурой [1] обрабатывали на экспериментальной лазерной системе, состоящей из непрерывного волоконного лазера IPG (IPG Photonics) YLS-4000 и робота KUKA (Keller und Knappich Аугсбург) KR-20. Для оценки противоизносных свойств материала был использован тестер для определения трения и износа НТ-1000. Наилучшие параметры процесса обработки получены при мощности лазера 2000 Вт, скорости сканирования 20 мм/с и радиусе пятна 3 мм. При этих режимах наибольшая твердость закаленного слоя составляла 889 НВ, а средняя микротвердость 764 НВ, при глубине 0,7 мм. Использование

повторной закалки позволяло дополнительно увеличить глубину и твердость закаленного слоя. Повторная закалка снижала средний коэффициент трения материала с 0,56 до 0,37 по сравнению с закалкой в один проход, а потери массы при износе были снижены с 4,0 до 1,7 мг.

Исходной сталью для лазерной закалки [2] выбраны образцы стали 40CrNiMo с твердостью 320 HV_{0,5}. Лазерную обработку выполняли на станке оснащенном волоконным лазером D01, размером пятна 1,14 мм², при скорости сканирования 650, 800 и 950 мм/мин. Образцы исходной стали и после лазерной закалки испытывали на трение и износ при возвратно поступательном движении по схеме: «полуцилиндр (образец) – пластина (сталь GCr15, 772 HV_{0,5}) при нормальной нагрузке 10 Н, длине хода 5 мм, времени цикла 30 мин. Наибольшую износостойкость показали образцы упрочненные при мощности излучения 2010 Вт, и скорости сканирования 800 мм/мин. Вначале процесса сухого трения, основным механизмом был абразивный износ. Абразивный износ вызывал сколы, а в местах отслаивания возникал окислительный износ, который по мере возрастания времени испытаний постепенно переходил в усталостный износ.

Для обработки Nd:YAG лазером использовали образцы [3] стали AISI4130. В качестве переменных для экспериментов использовались скорость сканирования луча, фокусное расстояние и пиковая мощность. При лазерном упрочнении на максимальной мощности 3,5 кВт, с частотой 7 Гц, скорости сканирования 5 мм/с, получена максимальная глубина и ширина зоны оплавления 0,4 и 2 мм соответственно. Преобладающими микроструктурами в зоне термического воздействия были в основном мартенсит и бейнит с максимальной твердостью 650 и 530 HV соответственно. Упрочненные образцы подвергали испытанию на износ по схеме: «штифт – диск» и было обнаружено, что коэффициент трения снизился с 0,77 для основного металла до 0,39 в закаленных образцах. изнашиваемая поверхность закаленного образца демонстрировала сочетание абразивного и адгезионного износа. Лазерные дорожки нанесенные с 20% поперечным перекрытием имели зоны отпуска в местах перекрытия с минимальной твердостью 450 HV. Износостойкость закаленных лазером образцов, упрочненных с большей дефокусировкой луча, была выше, чем у образцов закаленных с повышенной плотностью мощности при прочих равных режимах обработки.

Целью работы было определение влияния режимов лазерной закалки образцов стали 45 на качество и микротвердость зон упрочнения.

Лазерное упрочнение образцов стали 45 (270-290 HV_{0,1}) с размерами 12×20×70 мм выполняли на автоматизированном комплексе ИМАШ РАН. При проведении лазерной закалки варьируемыми параметрами были скорость перемещения луча 7-10 мм/с, мощность излучения 700-1000 Вт. Дополнительным параметром были поперечные колебания луча по нормали к вектору скорости обработки с частотой 215 Гц. Металлографические исследования зон закалки проводились на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,98 Н, металлографическом микроскопе и цифровом микроскопе АМ426.

На рисунке 1 представлены микрошлифы образцов стали 45 обработанные расфокусированным (рис. 1,а) с оплавлением и частичным испарением кромки и

колеблющимся лучом (рис. 1,б) с сохранением формы и размеров кромки образца полученными при мощности излучения 700 Вт, скорости перемещения 7 мм/с. Сталь 45 нашла широкое применение при изготовлении деталей для переработки продукции сельского хозяйства. К ним относят ножи, зубчатые противорезы, детали дробилок основным режущим рабочим элементом которых является кромка инструмента. Очень важно при лазерной закалке сохранить геометрию режущей кромки и придать ей высокую твердость.

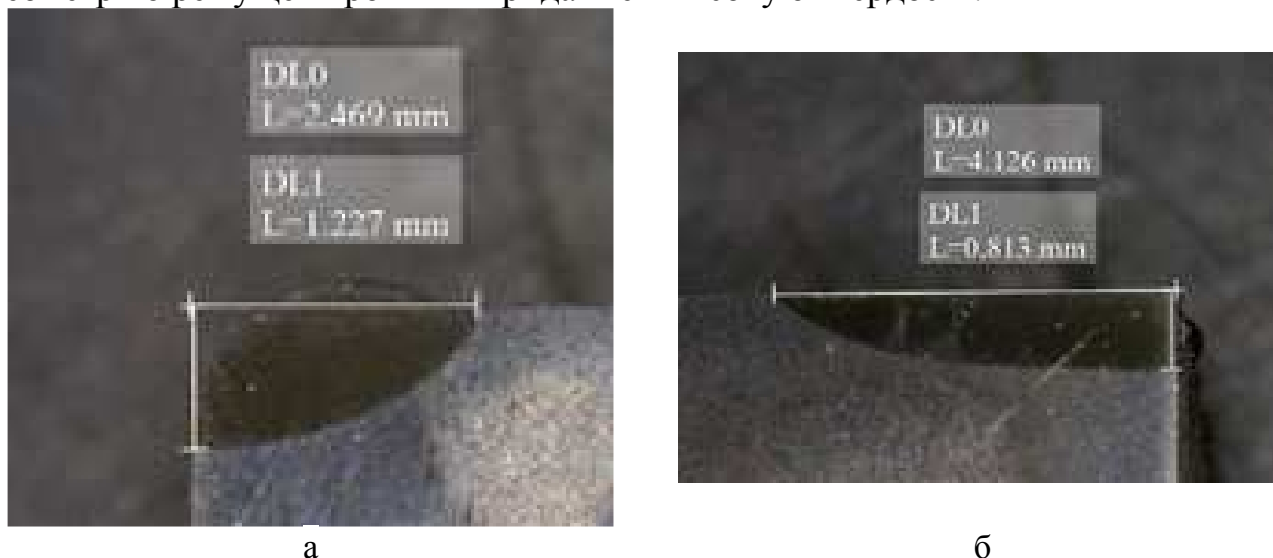
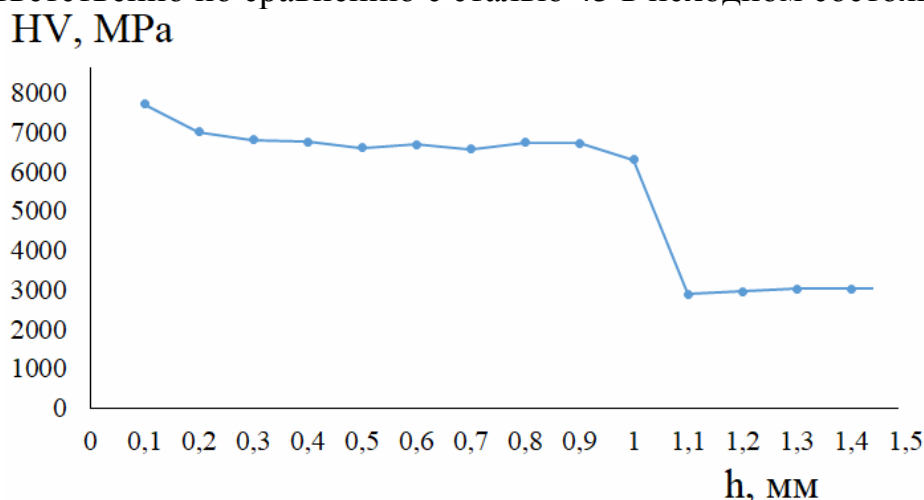


Рис. 1. Микршлифы зон лазерной закалки стали 45 обработанные расфокусированным (а) и колеблющимся лучом (б): $P = 700$ Вт, $V = 7$ мм/с

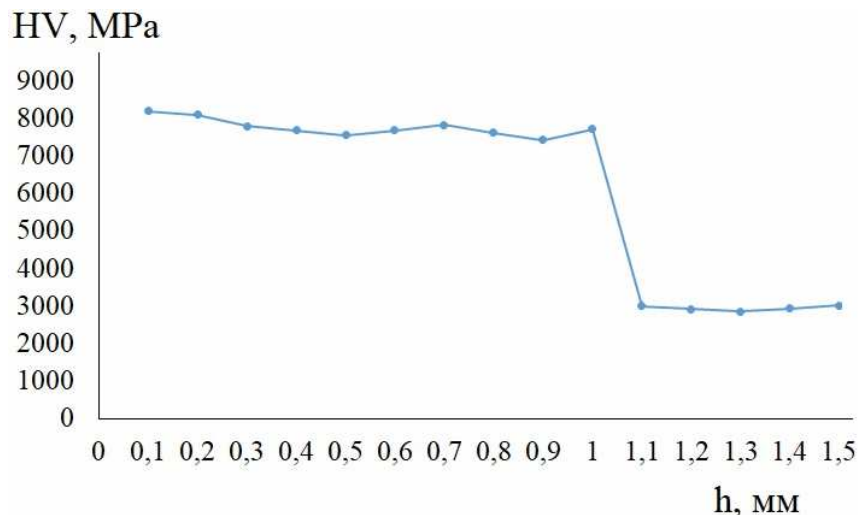
На рисунке 2 представлены графики микротвердости зон лазерной закалки кромки образцов стали 45 расфокусированным (рис. 2,а) и колеблющимся лучом (рис. 2,б) от глубины слоя. Микротвердость дорожки закалки полученная при обработке колеблющимся лучом выше на 680-890 МПа по сравнению с закалкой расфокусированным лучом.

Результаты испытаний на интенсивность изнашивания показали повышение износостойкости колеблющимся и расфокусированным лучом в 3,8 и 2,9 раза соответственно по сравнению с сталью 45 в исходном состоянии.



а

Рис. 2. График микротвердости стали 45 после закалки расфокусированным (а) лучом: $P = 700$ Вт, $V = 7$ мм/с



б

Рис. 2. График микротвердости стали 45 после закалки колеблющимся лучом (б):
 $P = 700$ Вт, $V = 7$ мм/с

Выводы. Определено влияние режимов лазерного упрочнения на качество закалки кромки образцов стали 45. Установлено, что при обработке расфокусированным лучом происходило частичное испарение и ее оплавление, чего не наблюдали при упрочнении колеблющимся лучом на всех исследованных режимах сохранялась геометрия кромки образцов и высокая микротвердость. Испытания на интенсивность изнашивания показали повышение износостойкости колеблющимся и расфокусированным лучом в 3,8 и 2,9 раза соответственно по сравнению со сталью 45 в исходном состоянии.

Список литературы

1. Wu L., Long W., Hao Q., Cheng Z., Yang Y., Shi L., Wu Y. Research on 40Cr Laser Quenching Process for Guid Rail // Journal of Physics: Conference Series. 2023, vol. 2566, p. 012100. doi: 10.1088/1742-6596/2566/1/012100.
2. Li J., Yan H., Li S., Lei M. Microstructure and wear behavior of arc-shaped 40CrNiMo steel after laser hardening // Journal of Materials Research and Technology. 2023, vol. 24, pp. 5743-5754. doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.197.
3. Bakhtiari M., Fayazi Khanigi A., Farnia A. Improving the wear properties of AISI4130 steel using laser surface hardening treatment // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023, vol. 48, pp. 11801-11818. doi.org/10.1007/s13369-022-07551-5.

Сведения об авторе:

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

ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Нгуен В.Д.

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

Ключевые слова: аустенитная сталь, механическая обработка, качество обработки, качество обрабатываемой поверхности, шероховатость поверхности, вибрация, автоколебание, наростообразование, стружкообразование, сливная стружка.

Аннотация. Проведена оценка применимости аустенитных сталей в современном машиностроении, а также в различных отраслях промышленности на основе их эксплуатационных характеристик. Рассмотрены проблемы, возникающие при механической обработке, и требования, предъявляемые к обеспечению качества обрабатываемой поверхности, в т.ч. при механической обработке заготовки из материала аустенитного класса.

PROBLEMS ARISING DURING MACHINING. REQUIREMENTS FOR ENSURING THE QUALITY OF THE PROCESSED SURFACE

Nguyen V.D.

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

Keywords: austenitic steel, mechanical processing, processing quality, quality of machined surfaces, surface roughness, vibration, self-oscillation, build-up, chip formation, drain chips.

Abstract. The applicability of austenitic steels in modern mechanical engineering, as well as in various industries, was assessed based on their performance characteristics. The problems arising during machining and the requirements for ensuring the quality of the machined surface, including during machining of a workpiece made of austenitic class material, are considered.

Введение

В настоящее время в машиностроении можно выделить широкий класс изделий из многих классов сталей, прежде всего, коррозионностойких жаропрочных, титановых сталей и сплавов, и сталей аустенитного класса. Нержавеющая аустенитная сталь, которая является наиболее универсальной маркой нержавеющей, имеет важную роль в промышленности и широкое применение в различных отраслях машиностроения, включая медицинскую, автомобильную, аэрокосмическую, военную, а также при нефтегазовом производстве и т.д. [1]. Однако нержавеющая аустенитная сталь является труднообрабатываемым материалом из-за своих высоких эксплуатационных характеристик. Плохое качество поверхности и сильный износ инструмента являются двумя наиболее серьезными проблемами при обработке нержавеющих аустенитных сталей.

Механическая обработка – это процесс удаления лишнего металла с заготовки для получения изделия требуемых размеров и формы в соответствии с предъявляемыми требованиями. Механическая обработка широко применяется из-за ее способности формировать объекты сложной геометрии, ее способности

достигать высокой степени точности размеров и допусков поверхности, а также использования изобретательных режущих устройств для выполнения различных типов операций. Механическая обработка представляет собой сложный технологический процесс, сопровождаемый многими физическими явлениями, такими как закалкой, экзотермическим явлением, пластической деформации и т.д. Понимание природы этих физических явлений имеет большое экономическое значение. Таким образом, можно управлять технологическим процессом для достижения высокой производительности и обеспечивать качество эксплуатационных поверхностей изделий. Нержавеющая аустенитная сталь обладает высокими эксплуатационными характеристиками, такими как устойчивость к коррозии во многих агрессивных окислительных средах; высокая прочность и высокая пластичность; высокая формируемость. Кроме того, аустенитная сталь немагнитная и не может подвергаться термической обработке. Как показало на практике, обрабатываемость аустенитной нержавеющей стали невысокая и зависит от многих факторов. Некоторыми факторами, затрудняющими обработку резанием деталей из аустенитной стали, являются: высокая температура в зоне резания, автоколебание, наростообразование, стружкообразование и т.п. Они прямо влияют на производительность и себестоимость изделий, вызывая большие экономические потери. Поэтому исследование и разработка эффективных методов обработки материалов из аустенитной нержавеющей стали является сегодня очень важной задачей в области машиностроения [2].

Процесс механической обработки может существенно повлиять на характеристики поверхности, такие как микротвердость, шероховатость, остаточное напряжение и микроструктура. Одним из важнейших факторов для оценки качества изделий, полученных после механической обработки, является качество эксплуатационных поверхностей обрабатываемых деталей. Поэтому исследование свойств поверхности после механической обработки представляется очень важным вопросом. В процессе механической обработки основной задачей специалистов является повышение качества обработанной поверхности заготовки. Целостность поверхности является важным критерием для оценки коррозионной стойкости и усталостной прочности детали. Целостность поверхности, эффективность обработки и сила резания обычно считаются целями в большинстве традиционных методов оптимизации параметров резания. Таким образом, улучшение целостности поверхности является требованием производства, а также серьезной проблемой при выборе технологических параметров для удовлетворения необходимых требований. В частности, шероховатость поверхности и остаточное напряжение, которые являются двумя критическими показателями целостности поверхности, определяют стоимость и качество изделий. Шероховатость поверхности, достигаемая на этапе чистовой обработки, играет решающую роль в функционировании обрабатываемой поверхности, так как влияет на усталостную прочность, износостойкость, коэффициент трения, коррозионную стойкость и смазывание. Различными факторами, которые оказывают влияние на значение

шероховатости поверхности, являются вибрация станка, следы подачи инструмента, стружкообразование, наростообразование и т.п. [2, 3].

В процессе обработки изделий в технологической системе возникают вибрации вследствие слабой жесткости отдельных элементов технологической системы. Вибрации влияют на качество поверхностного слоя заготовки и на производительность изготовления изделия. Вибрации подразделяются на два основных вида: вынужденные вибрации и автоколебания. Вынужденные вибрации в процессе резания обычно возникают по следующим причинам: зависит от конкретных условий и состояния упругой системы станка – приспособления – инструмента – детали; и за счет циклического воздействия неуравновешенного движения отдельных элементов технологической системы. Автоколебания вызываются силой резания и поддерживаются самим процессом резания. Основными причинами являются: изменение силы трения в передней поверхности и задней поверхности инструмента в процессе резания; изменение пластичности заготовки в процессе резания, вызывающего изменение силы резания; наростообразование; упругая деформация инструмента и детали [4].

Наростообразование состоит из сильно деформированного материала, который быстро прилипает к режущему инструменту во время резания, изменяя геометрию режущей кромки. В отдельных случаях наростообразование обладает твердостью выше, чем материал детали или инструмента, поэтому сформированный наростообразованием режущий клин может заменить режущую кромку. При обработке наростообразующий клин увеличивает передний угол инструмента, помогает стружкообразованию и обеспечивает защиту режущей кромки от износа. Однако при чистой обработке наростообразование отрицательно сказывается на качестве обрабатываемой поверхности, снижает точность и увеличивает шероховатость обрабатываемой поверхности, снижает стойкость инструмента. Когда наростообразование достигает определенного размера, часть его слетает с передней поверхности, попадая в зону задней поверхности и подвергая разрушению и повреждению поверхности инструмента.

Кроме этого, как показывает практика, в процессе механической обработки стальной заготовки из аустенитных сталей возникает проблема, связанная с процессом формирования стружки. Процесс стружкообразования является одной из важнейших характеристик механической обработки. Различные физические явления при механической обработке (сила резания, износ инструмента и разупрочнение металла) неотделимы от процесса стружкообразования. Трение при механической обработке также может отражаться формой стружки; кроме того, стружкообразование также влияет на качество поверхности, точность обработки. Из-за различных материалов заготовки, условий резания и деформации процесса резания образуются различные типы стружки, в основном четыре типа: суставчатая, сливная, элементная и стружка надлома [4]. Образование стружки зависит от взаимосвязанных факторов, таких как характеристики материала заготовки, геометрия режущего инструмента, температура в зоне резания, настройка технологической системы (станка/заготовки/режущего инструмента) и режимы резания. Форма и размер образующейся стружки могут сильно различаться во время операций

механической обработки. Механизм образования стружки включает в себя срезание материала заготовки от зоны сдвига, простирающейся от вершины инструмента через плоскость сдвига до свободной поверхности под углом плоскости сдвига (φ).

На станках с числовым программным управлением особой проблемой является образуемая стружка, снижающая качество обрабатываемой поверхности при резании металлов, попадающая на главную и вспомогательную режущие кромки при резании в виде стальной ленты, нагретой до высоких температур и движущейся с большой скоростью.

Стружкодробление являются распространенной проблемой при чистовой и получистовой обработке. Процесс резания нестабилен в условиях высокой температуры и высокого давления, что приводит к серьезной деформации поверхности заготовки, большой длине контакта инструмента со стружкой, сложному разрушению стружки и легкой намотке резца. Неблагоприятные формы стружки также имеют тенденцию образовывать гнезда для стружки, которые препятствуют автоматическому удалению стружки конвейером для стружки. При обработке резанием заготовки из аустенитных сталей иметь сливную стружку, что оказывает влияние на качество обработанной поверхности и гарантированную стойкость инструмента. Стружкообразование во время обработки отрицательно влияет на безопасность рабочего и инструмента, качество заготовки, срок службы режущего инструмента и потребление энергии, а также снижает эффективность работы. Таким образом, наблюдение за формой и размером стружки играет важную роль в процессе механической обработки и помогает оценить качество поверхности полученного изделия.

Заключение

1. Аустенитная сталь является труднообрабатываемым материалом из-за своих высоких эксплуатационных характеристик, но их применяют во многих областях современных промышленности. При обработке материала аустенитного класса сопровождаются многим сложным физическим явлениям, таким как: низкая теплопроводность, высокая температура в зоне резания, наростообразование, автоколебание, стружкообразование и т.п., что приводят к уменьшению качества обработки и общей производительности.

2. Механическая обработка представляет собой технологический процесс и широко применяется для обработки материалов разных классов. Основной задачей в современном машиностроении является обеспечение высокого качества обработки, в т.ч. высокое качество поверхность обработанных изделий и малые затраты при обработке, и т.п.

Список литературы

1. Максаров В.В., Нгуен В.Д., Ефимов А.Е., Бригаднов И.А.. Технологическое обеспечение качества обработки стальной заготовки аустенитного класса с дроблением стружки // *Металлообработка*. – 2023. – № 2 (117). – С. 47-55. – DOI: 10.25960/mo.2021.3.57.
2. Ольт Ю., Максаров В.В., Ефимов А.Е. Повышение качества поверхности изделий из титановых сплавов в процессе механической обработки // *СТИН*. –2023. – №1. – С. 26-30. – DOI: 10.25960/mo.2022.5-6.41.

3. Максаров В.В., Попов М.А., Захарова В.П. Влияние параметров магнитно-абразивной обработки на керамический режущий инструмент для технологического обеспечения качества прецизионных изделий из хладостойких сталей // Черные металлы. – 2023. – № 1. – С. 67-73. – DOI: 10.17580/chm.2023.01.10.
4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

Сведения об авторе:

Нгуен Ван Дао — аспирант.

УДК 622.23.05

АНАЛИЗ ГРЕЙФЕРНОЙ ВЫЕМКИ ВОЛОКНИСТОГО ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Соловьев И.В., Михайлов А.В.

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

Ключевые слова: торфяного сырья, технологический модуль, волокнистая среда, грейфер.

Аннотация. В работе подтверждается возможность применения вильчатого грейфера для поверхностной выемки волокнистого торфяного сырья. Проведен анализ процесса захватывания сырья с помощью двухчелюстного вильчатого грейферного оборудования: внедрение челюстей в залежь и смыкание челюстей в массиве. В условиях торфяного месторождения проведена серия экспериментов по внедрению элементов грейфера в разные виды торфа и сжатию захваченной области торфяного массива с полномасштабными физическими моделями грейферного оборудования. Выявлены диапазоны необходимых усилий для реализации этих процессов. Определено рациональное расстояние между рабочими элементами вильчатого грейфера.

ANALYSIS OF GRAPLE EXCAVATION OF FIBROUS PEAT RAW MATERIALS

Soloviev I.V., Mikhailov A.V.

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

Keywords: peat raw materials, technological module, fibrous medium, grab.

Abstract. The work confirms the possibility of using a fork grab for surface excavation of fibrous peat raw materials. An analysis of the process of capturing raw materials using double-jaw fork grab equipment was carried out: the introduction of the jaws into the deposit and the closing of the jaws in the massif. In the conditions of a peat deposit, a series of experiments was carried out on the introduction of grab elements into different types of peat and compression of the captured area of the peat mass with full-scale physical models of grab equipment. The ranges of required efforts to implement these processes have been identified. The rational distance between the working elements of a fork grab has been determined.

Введение

Волокнистое торфяное сырье малой степени разложения находит широкое применение в ряде отраслей промышленности благодаря своим специфическим физико-механическим свойствам [1-4]. Создание средств механизации процесса добычи слаборазложившегося торфяного сырья с учетом современных принципов рационального природопользования и сведения к минимуму негативного техногенного влияния на окружающую среду является актуальной задачей.

В работе [5] предложена технология, в которой выемка может осуществляться лагунным методом с сохранением берсы-перемычки для сохранения гидрологического режима места нарушения с целью ускорения процессов восстановления жизнедеятельности поверхностного слоя

месторождения. После локального воздействия нарушенная область способна к самовосстановлению в течение 3 лет.

Для добычи торфяного сырья предложена структура мобильного технологического модуля, состоящего из тягового энергетического устройства, транспортного полуприцепа и гидроманипулятора с выемочным рабочим органом на стреле исполнительного оборудования. В качестве выемочного рабочего органа для выемки слаборазложившегося торфяного сырья предложен гидравлический двухчелюстной вильчатый грейфер [6].

Рабочий процесс землеройных машин состоит из ряда выполняемых последовательно операций: отделения грунта от массива и его захвата, перемещения, укладки в кузов транспортной машины и возвращение в исходное положение [6, 7]. Захват волокнистого сырья осуществляется вертикальным внедрением элементов грейфера в массив и смыканием челюстей [8].

Внедрение челюстей грейфера в массив происходит под действием вертикальной нагрузки со стороны гидроманипулятора. После внедрения челюстей грейфера происходит их смыкание, при котором захватывается порция волокнистого упругого материала и сжимается в межчелюстном пространстве. Третьей операцией рабочего цикла выемочного грейфера является подъем заполненного грейфера и выгрузка в кузов транспортной машины.

Прочность торфяной залежи является основополагающим фактором в процессе выемки. Прочностные характеристики определяются, в основном, ботаническим составом, степенью разложения и связностью материала [7].

По теории Кулона-Мора предельное состояние в грунте наступает при определенном соотношении нормальных и касательных напряжений, действующих на площадках скольжения с учетом нормального напряжения, внутреннего трения и связности материала [9].

Цель исследования – подтверждение возможности применения двухчелюстного вильчатого грейфера для поверхностной выемки волокнистого торфяного сырья в условиях торфяного месторождения.

Основная часть

При вертикальном внедрении зуб грейфера раздвигает слой волокнистого материала и погружается на глубину до 0,3 м. При этом происходит преодоление сил сцепления между частицами макроструктуры материала [8].

В результате серии полевых экспериментов на физических моделях элемента вильчатого грейфера установлено, что среднее значение необходимого усилия для преодоления сопротивления внедрению модели грейфера: на площадке со магелланикум-торфом – 44,4 кН, с фускум-торфом – 61,5 кН.

Среднее значение нормального напряжения при погружении в массив элемента грейферного оборудования с учетом площади торцевой поверхности составляет для: магелланикум-торфа 89 кПа, фускум-торфа – 123 кПа.

Сопротивление материала при горизонтальном сдвиге и упругой деформации при сжатии определяется структурным сцеплением и трением между частицами макроструктуры.

Упругий материал обладает свойствами сплошности, однородности и относительной упругости, поэтому перемещение всякой точки тела вызывается

горизонтальными деформациями. Среднее значение модуля общей деформации E_0 в естественном залегании, характеризующего сжимаемость торфяной залежи под действием внешних нагрузок, составляет для магелланикум-торфа 116 кПа и для фускум-торфа 126 кПа, что соответствует ранее проводившимся исследованиям по определению физико-механических свойств верхнего слоя торфяной залежи.

Конструктивные особенности вильчатого грейфера позволяют минимально нарушать структуру вынимаемого сырья. Процесс сжатия материала является одним из этапов процесса выемки двухчелюстным грейфером. Сжатие волокнистых сред сопровождается образованием уплотненного тела, которое образуется при взаимодействии с элементами грейфера.

Проведен эксперимент из 3 опытов с установкой зубьев с разным расстоянием между ними: 0,25; 0,30 и 0,40 м. Заглубленная на 0,4 м модель челюсти вильчатого грейфера перемещалась на длину до 0,5 м.

Установка зубьев с интервалом $l = 0,40$ м обуславливает резкое снижение нагрузок на элементы грейфера при отделении сырья от торфяной залежи. Единое для соседних зубьев тело волочения разрушается, сдвигаемый материал просачивается между зубьями, не попадая в грейфер. Зубья образуют самостоятельные щели в торфяной залежи, а эффективность процесса экскавации сырья существенно снижается.

При установке зубьев с интервалом $l = 0,25$ м отделяемый материал деформируется по обе стороны зуба, вспучивается над поверхностью залежи, формирует общее для соседних зубьев тело, образуется единое тело волочения при сдвиге захваченной области материала. Такое расстояние между зубьями грейфера является наиболее предпочтительным.

Заключение

В результате серии полевых экспериментов на физических моделях элементов вильчатого грейфера подтверждена возможность его применения для выемки торфяного волокнистого сырья из верхнего слоя торфяной залежи.

Список литературы

1. Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шубина Л.А., Собенин А.В. Оценка возможности применения торфо-диатомитового мелиоранта при разработке мероприятий по экологической реабилитации нарушенных экосистем // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12, №4. – С. 493-500. – DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12- 4-493-500.
2. Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В. и др. Повышение эффективности многоцелевого лесопользования на выработанных торфяниках // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022 – № 3(387). – С. 91-102. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-91-102.
3. Гараев И.Х., Мусин И.Н., Зенитова Л.А. Антисептические перевязочные материалы на основе сфагнума // Бюллетень медицинской науки. – 2019 – № 1(13). – С. 8-13. – DOI: 10.31684/2541-8475.2019.1(13).8-13.
4. Бакатович А.А. Микроструктура как основной критерий, определяющий использование мха сфагнума в качестве заполнителя для эффективного плитного теплоизоляционного материала // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8.– С. 42-46.

5. Соловьев И.В., Михайлов А.В. Особенности компоновки технологического модуля для добычи торфяного сырья малой степени разложения // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №16. – С. 103-109.
6. Соловьев И.В., Михайлов А.В. Анализ выбора оборудования для поверхностной выемки органогенного грунта // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022 – №17-1. – С. 203-209.
7. Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селятина С.Б. Структура и сорбционные свойства верхового торфа приарктических территорий // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 1. – С. 18-22.
8. George Keller, Ahmed Aly, Hrymak Andrew, El Naggar Mohamed. Material characterization for natural fibers: compressibility, permeability and friction // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2020, vol. 35. DOI: 10.1515/npprj-2019-0084.
9. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Юдин С.А. Теория дистортности и основные гипотезы разрушения структур агрегатов торфяных систем // Труды Инсторфа. – 2018. – №18(71). – С. 28-36.

Сведения об авторах:

Соловьев Иван Васильевич – аспирант;

Михайлов Александр Викторович – д.т.н., профессор, профессор кафедры машиностроения.

УДК 621.865.8

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ ШЛИФОВАНИЯ ПЕРА ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Метелкин А.А., Столбов А.М., Тимофеев М.В.

*Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева, Рыбинск*

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатка, шлифование, роботизированный комплекс, алгоритм управления, автоматизация.

Аннотация. В статье предложены альтернативные варианты построения алгоритма управления роботизированным технологическим комплексом адаптивного шлифования лопаток вентиляторов газотурбинного двигателя с целью интеграции роботизированного технологического комплекса в производственный процесс. Рассмотрены алгоритмы с пакетной и с последовательной интервальной загрузкой полуфабрикатов. Выявлены их достоинства и недостатки.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CONTROLLING A ROBOTIC COMPLEX FOR GRINDING THE BLADES OF A GAS TURBINE ENGINE FAN

Metelkin A.A., Stolbov A.M., Timofeev M.V.

Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk

Keywords: gas turbine engine, blade, grinding, robotic complex, control algorithm, automation.

Abstract. The article proposes alternative options for constructing a control algorithm for a robotic technological complex for adaptive grinding of gas turbine engine fan blades in order to integrate the RTC into the production process. Algorithms with batch and sequential interval loading of semi-finished products are considered. Their advantages and disadvantages are revealed.

В последние десятилетие проблемы повышения качества, снижения трудоёмкости и себестоимости изготовления вентиляторов и компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) успешно решаются за счёт комплексной автоматизированной обработки лопаток и интеграции в производство интеллектуальных роботизированных комплексов, позволяющих реализовать итерационный цикл геометрического контроля полуфабриката, распределения припуска и операций чистовой обработки пера в адаптивном режиме [1, 2].

Одной из ключевых задач автоматизации технологического процесса производства лопаток является разработка и оптимизация алгоритма функционирования роботизированного технологического комплекса по тому или иному критерию эффективности. Решение этой задачи усложняется тем обстоятельством, что в зависимости от структуры производственного задания (номенклатуры, объёмов выпуска), сроков запуска, типа производства изделий, функционального состава оборудования комплекса возможны несколько альтернативных способов интеграции роботизированных технологических

комплексов (РТК) в существующую производственную систему и организации материальных потоков.

Минимальная конфигурация РТК кроме робота-манипулятора, как правило, включает в себя подсистемы загрузки-выгрузки, хранения, измерения, промывки и механической обработки [3]. В этом случае целесообразно рассмотреть следующие варианты построения алгоритма работы РТК: 1) с последовательной интервальной загрузкой РТК единичными заготовками и 2) с пакетной загрузкой заготовок в объеме транспортной партии или до заполнения подсистемы хранения.

Первый вариант алгоритма основывается на том, что загрузка заготовок осуществляется поштучно или малыми партиями через интервал времени, определяемый производительностью предыдущего этапа обработки и средней производительностью РТК. При работе РТК по второму варианту загрузка заготовок осуществляется пакетом, объем которого в пределе равен объему накопителя системы хранения в составе РТК.

Оба алгоритма могут строиться основе элементов теории конечных автоматов. В этом случае после каждой операции, проведенной над лопаткой, ей присваивается некий детерминированный статус, который определяет последующие действия над этим объектом. Таким образом, множество статусов соответствует множеству состояний объекта, а изменение статуса – переходам между состояниями под воздействием потоков событий, таких как обработка, промывка и пр.

Для удобства формализации введём следующие условные обозначения «статусов» (состояний) деталей: «Н» – детали требуется очистка в моечной установке; «М» – деталь готова к дальнейшей обработке; «-» – деталь не соответствует модели, требуется шлифовка; «+» – деталь готова к выгрузке.

Для идентификации событий будут использованы следующие условные обозначения технологических операций.

«М. Оп.» – моечная операция, во время которой происходит очистка от технологического покрытия, стружки и прочих загрязнений.

«К. Оп.» – контрольная операция, во время которой с помощью 3D сканера строится математическая модель текущего полуфабриката лопатки и сравнивается с теоретической (конструкторской) моделью.

«Ш. Оп.» – шлифовальная операция, во время которой происходит обработка участков с остаточным припуском, выявленным на контроле.

Рассмотрим алгоритм с последовательной интервальной загрузкой РТК (рис. 1). После загрузки лопатки в РТК, система проверяет состояние моечной установки. Если она свободна, то лопатка перемещается в позицию мойки и начинается моечная операция. Иначе лопатке присваивается статус «Н» и выполняется переход к началу алгоритма. В случае, если новая лопатка не загружена, то выполняется опрос состояния моечной установки и шлифовального станка. Если мойка закончила работу, то лопатке присваивается статус «М», «Н» соответственно и лопатки транспортируются в накопитель (стеллаж).

В задачи системы управления РТК входит мониторинг статуса лопатки в системе хранения. Если лопатке необходима шлифовка или мойка, то лопатка

направляется на соответствующие рабочие позиции. Лопатка без статусов «+» или «-» направляется на контрольную операцию, где в случае успешного приёмочного контроля отправляется на выгрузку. Если в данный момент нужное оборудование находится в работе, лопатка остаётся без движения, её статус не меняется, а система управления переходит к анализу следующей лопатки в системе хранения.

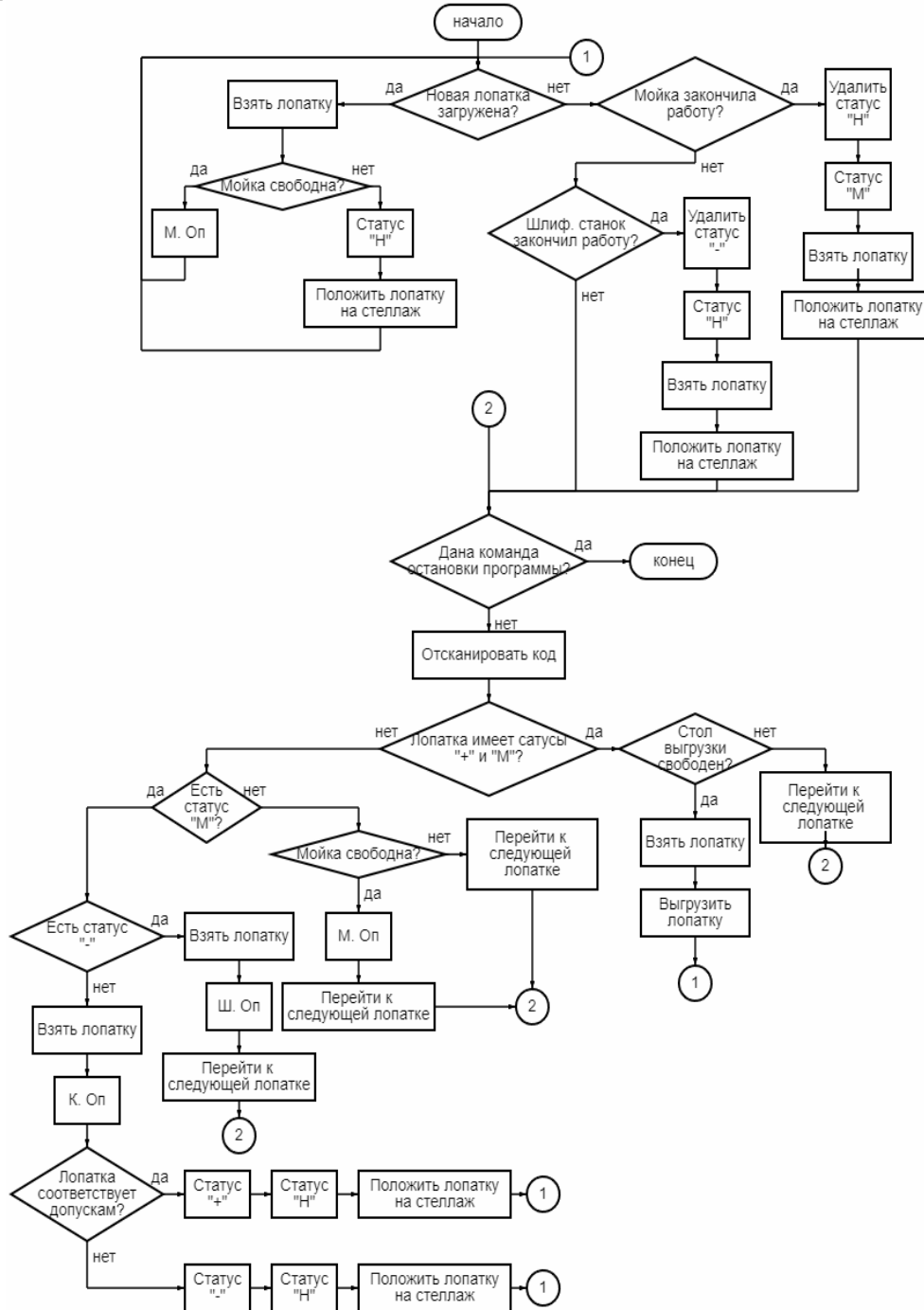


Рис. 1. Блок-схема алгоритма с последовательной интервальной загрузкой РТК

Блок-схема разработанного алгоритма с пакетной загрузкой РТК приведена на рисунке 2. Принципиальным отличием данного алгоритма является выделение в программе работы комплекса трёх функциональных фаз. В первой фазе промышленный робот загружает лопатки до тех пор, пока все позиции на стеллаже не будут заполнены или не завершится транспортная партия. Вторая

фаза обработки по составу операций идентична алгоритму потоковой загрузки (см. рис. 1). В третьей фазе промышленный робот выгружает все лопатки из подсистемы хранения РТК. После завершения выгрузки РТК находится в режиме ожидания до того момента, когда поступит новая транспортная партия лопаток.

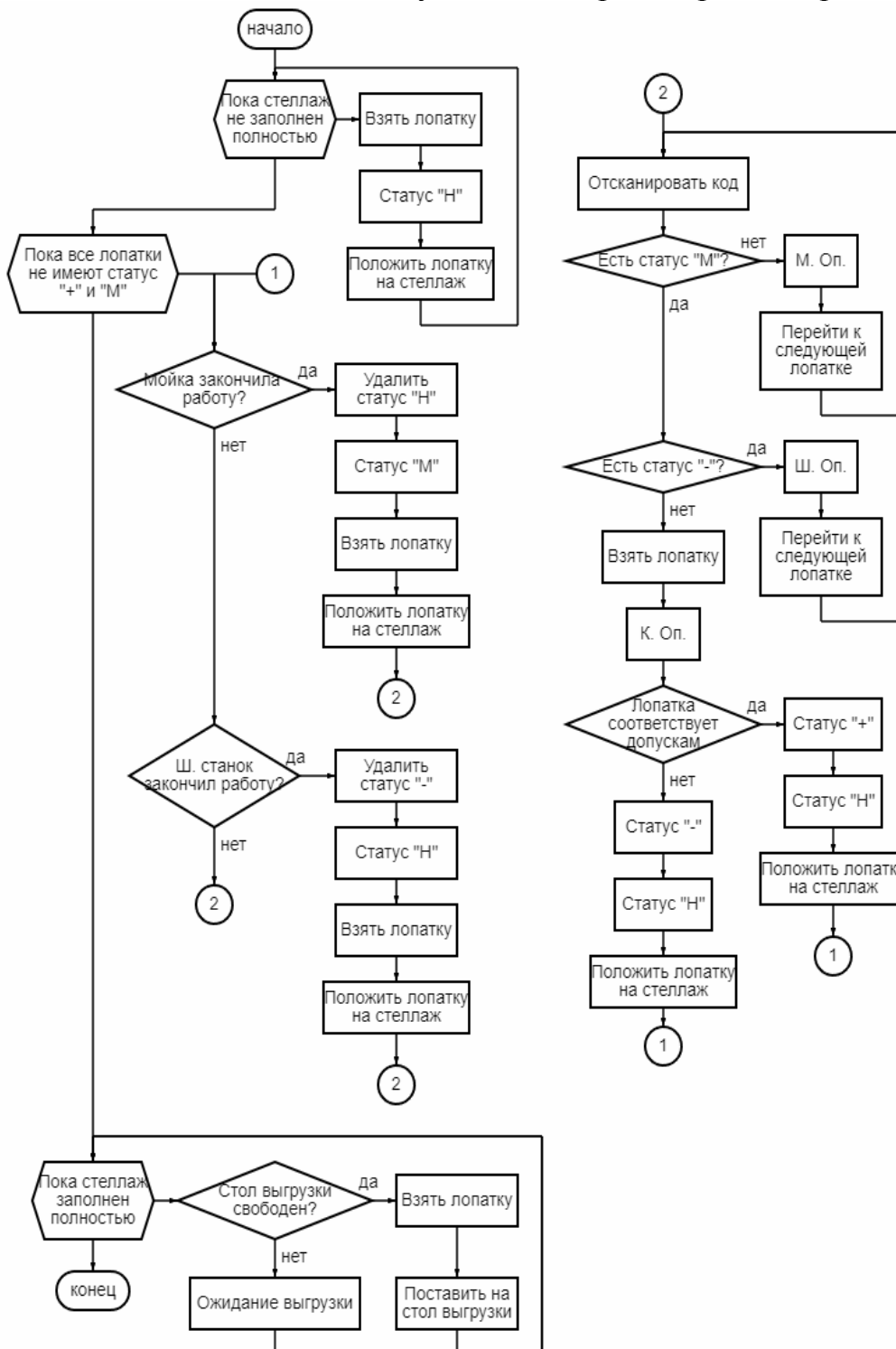


Рис. 2. Блок-схема алгоритма с пакетной загрузкой РТК

Ключевой особенностью предложенного варианта алгоритма с последовательной интервальной загрузкой является более высокий коэффициент загрузки оборудования, что способствует повышению эффективности РТК в целом. Вместе с тем, выделение в алгоритме с пакетной загрузкой трёх фаз

работы оборудования, хотя и увеличивает норму штучного времени РТК, одновременно снижает риск производственной травмоопасности.

Список литературы

1. Безъязычный В.Ф., Полетаев В.А., Кожина Т.Д. и др. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 2012. – Ч. 1. – 554 с.
2. Волков Д.И., Коряжкин А.А. Адаптивное ленточное шлифование лопаток ГТД на многокоординатном станочном оборудовании // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2013. – № 1(24). – С. 42-48.
3. Тимофеев М.В., Прокофьев М.А. Проблемные вопросы интеграции оборудования в составе робото-технологического комплекса адаптивного шлифования лопаток ГТД // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. – 2023. – №3(66). – С. 46-53.

Сведения об авторах:

Метелкин Андрей Александрович – студент;

Столбов Алексей Михайлович – студент;

Тимофеев Михаил Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей и общего машиностроения.

ПОЛЗУЧЕСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ

Гараников В.В., Корнильев Е.О.

Тверской государственной технической университет, Тверь

Ключевые слова: эксперимент, ползучесть, циклическое изменение, эксперимент, образец, программа, траектория, комплекс СН-ЭВМ.

Аннотация. Целью данной работы являлось исследование ползучести стали 9Х2 при циклическом изменении напряжений и деформаций. При эксплуатации реальных тонкостенных конструкций, таких как трубы и сосуды высокого давления, в процессе циклического нагружения может наблюдаться явление накопления односторонних деформаций. Эффект получил название "циклической ползучести" или "ратчеттинга" и отмечается в экспериментах с контролем по напряжениям при нагружении циклически анизотропных материалов либо при ассиметричном нагружении изотропных материалов.

INVESTIGATION OF CREEP OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS UNDER COMPLEX STRESS STATE AND LOADING

Garanikov V.V., Kornilyev E.O.

Tver State Technical University, Tver

Keywords: experiment, creep, cyclic change, extensometer, sample, trajectory, complex.

Abstract. The aim of this work was to study the creep of steel 9X2 under a cyclic variation of stresses and deformations. When operating the actual thin-walled structures, such as tubes and high pressure vessels, during cyclic loading can be observed phenomenon of accumulation of unilateral deformities. The effect is called "cyclic creep" or "ratcheting" and noted in experiments with voltage monitoring or loading cycles anisotropic materials or with unsymmetrical loading isotropic materials

Сложность форм современных конструкций, повышение интенсивности воздействий приводит к неоднородности напряженно-деформируемого состояния, возникновению областей пластичности. Потому построение определяющих соотношений для произвольных процессов, воздействующих на упруго-вязкопластическое тело, является важной задачей механики деформируемого твердого тела. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на автоматизированном расчетно-экспериментально комплексе СН-ЭВМ [1]. Комплекс состоит из нагружающей установки, реализующей трехпараметрическое воздействие на образец (осевая сила, кручение и внутреннее давление), датчиков усилий и деформаций, управляющей ЭВМ типа IBM PC и устройства связи с объектом (УСО). Более подробное описание комплекса и методики проведения экспериментальных исследований представлено в монографии [2]. Эксперименты выполнены на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках стали 9Х2.

Программа испытаний в пространстве напряжений состояла в следующем (рис. 1). После предварительного растяжения ($S_1=300$ МПа), полной разгрузки и последующего нагружения до уровня $S_1=318$ МПа осуществлялась полная выборка ползучести.

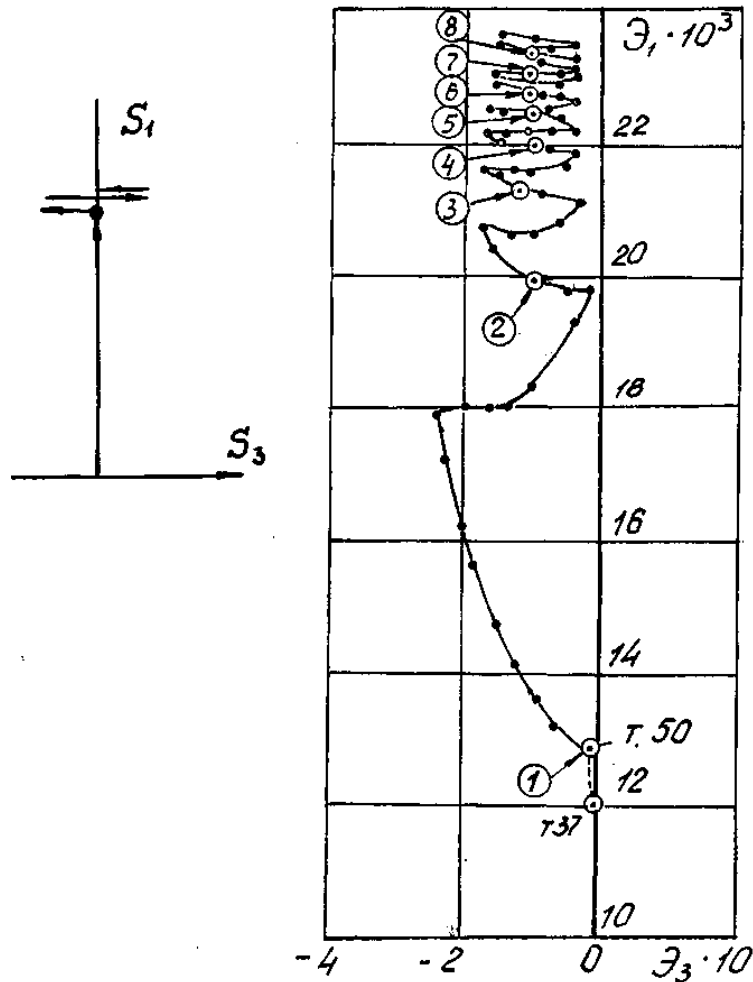


Рис. 1. Программа испытаний и траектория деформаций

После выборки ползучести при условии поддержания $S_1 = \text{const}$ осуществлялось сложное нагружение циклически (с постоянной скоростью) изменяющимся напряжением $-150 < S_3 < 150$ (МПа) (рис. 1). Отклик на данную программу нагружения представлен в виде траектории деформаций, изображенной на рисунке 1. Точки, обозначенные цифрами в кружках, соответствуют началу циклов сложного нагружения. Как видно из рисунка 1, циклическое закручивание оболочки при $S_1 = \text{const}$ приводит к существенному увеличению компоненты \mathcal{E}_1 вектора деформаций \mathcal{E} , причем наибольший рост характерен для первого цикла сложного нагружения и составляет более 50% от значения \mathcal{E}_1 в точке начала реализации сложного процесса. После пятого цикла степень прироста модуля вектора деформаций практически стабилизируется. Всего было выполнено 10 полных циклов нагружения по S_3 . Диаграмма деформирования представлена на рисунке 2. Треугольники отвечают предварительной полной разгрузке, кружки с внешними крестиками соответствуют повторному простому нагружению до $S_1 = 318$ МПа.

Программа испытаний в пространстве деформаций и траектория нагружения представлена на рисунке 3. Предварительное нагружение осуществлено растяжением до уровня деформации $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = 0,9\%$. После разгрузки ($\sigma = 0$) и повторного нагружения до $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = 0,1\%$, было реализовано циклическое деформирование кручением $-0,1\% < \mathcal{E}_3 < +0,1\%$. Стрелка на данном рисунке указывает начальную точку реализации сложного процесса. Сложное

деформирование приводит к уменьшению модуля вектора напряжений за счет изменения компоненты S_1 . При этом наибольшее падение значения S_1 наблюдается на первом цикле деформирования и составляет 23% от достигнутого уровня S_1 в точке начала реализации сложного процесса. К 10-му циклу траектория нагружения практически стабилизируется. С целью проверки данного результата в ходе эксперимента была изменена амплитуда компоненты ε_3 до значения $|\varepsilon_3|=0,2\%$. Подобные результаты экспериментов были получены и для других материалов [3].

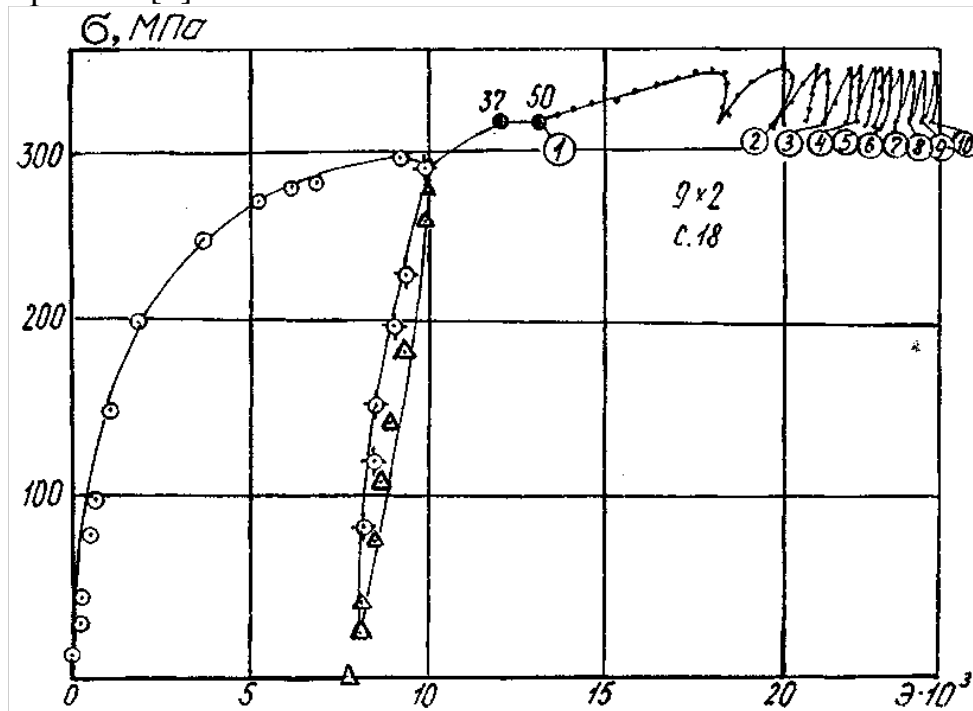


Рис. 2. Диаграмма деформирования

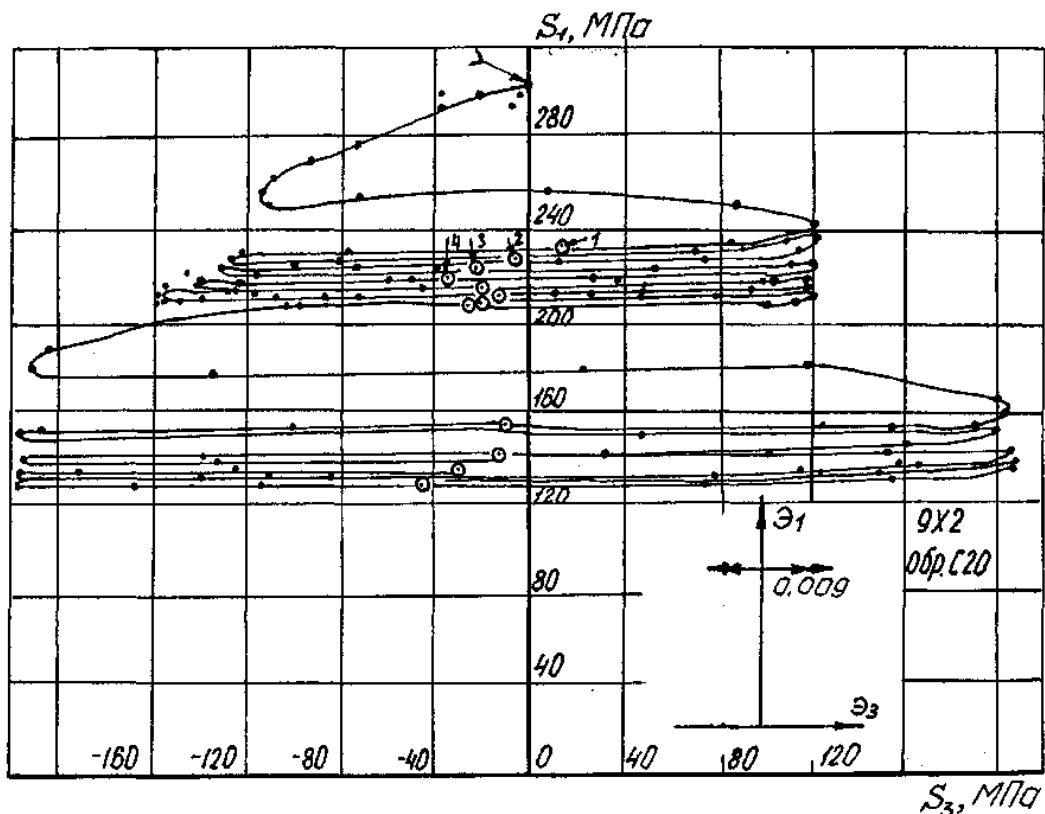


Рис. 3. Программа испытаний и траектория нагружения

По результатам проведенных испытаний, можно сделать следующий вывод: циклическое закручивание с малой амплитудой (при $S_1 = \text{const}$) приводит к существенному увеличению компоненты \mathcal{E}_1 и уменьшению S_1 (при $\mathcal{E}_1 = \text{const}$). Скорость изменения \mathcal{E}_1 (S_1) имеет наибольшее значение на первом цикле и стабилизируется к пятому циклу нагружения (деформирования).

Список литературы

1. Гараников В.В. Экспериментальное исследование процессов сложного нагружения на замкнутых четырехзвенных ломаных траекториях деформирования // Современные проблемы теории машин. – 2016. – №4(2). – С. 79-81.
2. Патент №7202 РФ. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении // В.Г. Зубчанинов, А.В. Акимов, Н.Л. Охлопков. – Заявка №97108023 от 20.05.1997; опубл. 16.07.1998.
3. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1: Процессы сложного деформирования. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.

Сведения об авторах:

Гараников Валерий Владимирович – д.т.н., заведующий кафедрой «Техническая механика»;
Корнильев Егор Олегович – старший преподаватель кафедры «Техническая механика».

УДК 621.315.57

ДЕФОРМАЦИОННАЯ И ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

*Долгоносов В.К., Род В.А., Варакина С.В., Кондратов А.П.
Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: датчик, деформационная чувствительность, тензочувствительность, электрическая проводимость, графит, полипропилен, механическое напряжение.

Аннотация. Развитие автоматизации производственных процессов с использованием «умных» материалов, способных передавать информацию о движениях искусственному интеллекту требует разработки новых полимерных пленочных датчиков из отечественных материалов. Вместе с этим необходимо совершенствовать способы мониторинга напряженного состояния изделий из полимерных композиционных материалов и использовать объективные параметры чувствительности электрических тензодатчиков и датчиков деформаций в различных диапазонах.

DEFORMATION AND STRAIN SENSITIVITY OF POLYMER STRAIN SENSORS

*Dolgonosov V.K., Rod V.A., Varakina S.B., Kondratov A.P.
Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: sensor, deformation sensitivity, strain sensitivity, electrical conductivity, graphite, polypropylene, mechanical strain.

Abstract. The development of automation of production processes using «smart» materials capable of transmitting information about artificial intelligence movements requires the development of new polymer film sensors from domestic materials. At the same time, it is necessary to improve the methods of monitoring the stress state of polymer composite products and to use objective parameters of sensitivity of electric strain gauges and strain sensors in different ranges.

Для определения деформационной чувствительности датчиков из электропроводящей полимерной композиции, содержащих дисперсию графита на пленке полипропилена, проводили измерение сопротивления в диапазоне относительного удлинения 0-80% (рис. 1).

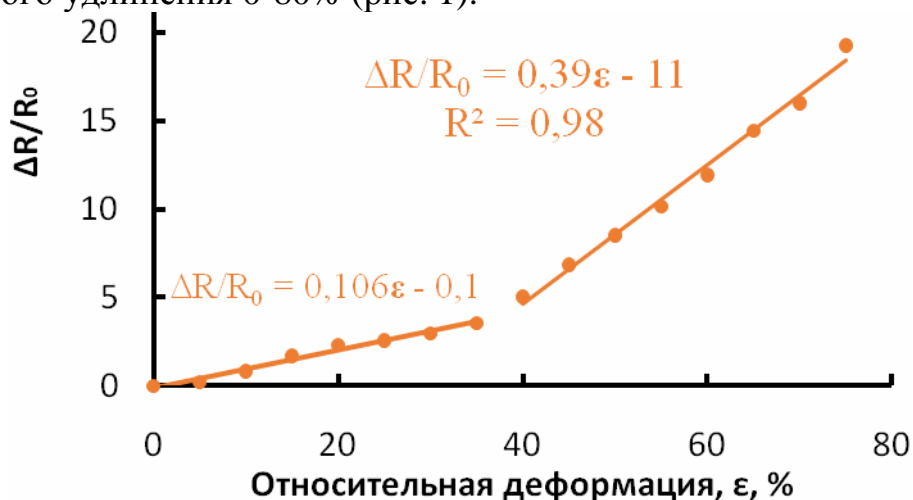


Рис. 1. Изменение электросопротивления при деформации эластичной пленки с покрытием суспензией графита

Предварительная обработка пленки перед нанесением электропроводящего наполнителя циклической деформацией на воздухе позволяет увеличить адгезию проводящего слоя к пленке.

На характерных участках первого и повторного растяжения пленок получены функции для расчета деформационной и относительной тензочувствительности датчиков в различных диапазонах (рис. 2).

Для вычисления чувствительности к деформации (GF), тензочувствительности (QF) и относительной тензочувствительности датчиков (θF), изготовленных из композиционного материала на основе эластичной пленки и суспензии графита использовали формулы

$$QF = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta \sigma}, [\text{Па}^{-1}], \quad (1)$$

$$\theta F = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta \sigma / \sigma}, \quad (2)$$

где, R_0 – начальное сопротивление датчиков, ΔR – изменение сопротивления при деформации, σ – начальное значение напряжения, $\Delta \sigma$ – увеличение напряжения.

Новым является вычисление изменения напряжения в пленке и относительной величины этого изменения в определенном интервале напряжения для определения относительной тензочувствительности датчиков (θF) [1-3].

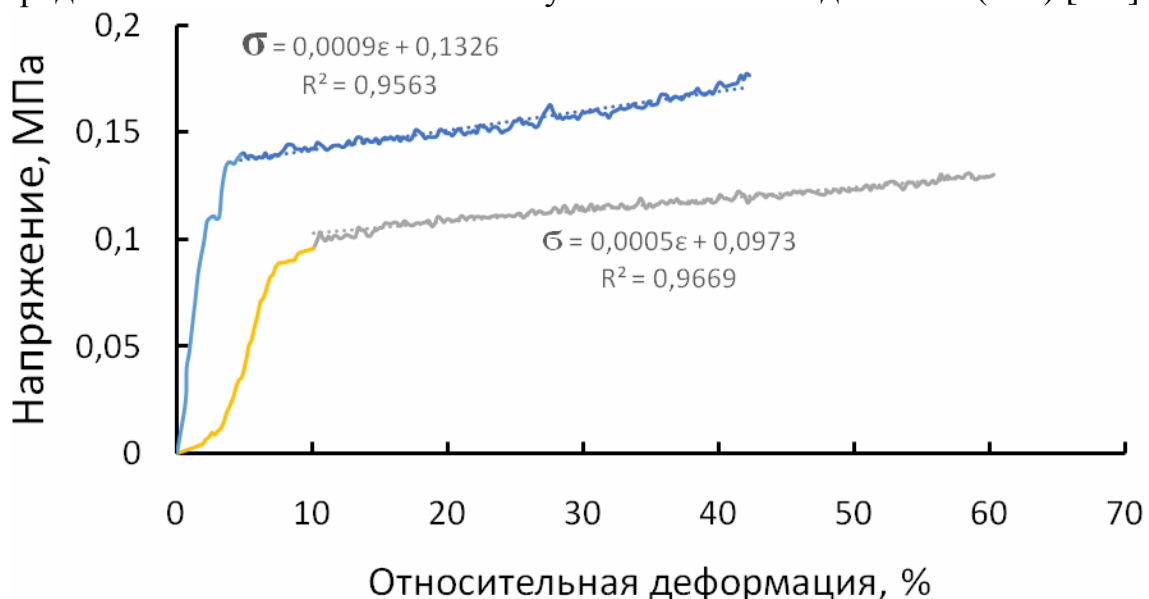


Рис. 2. Фрагмент деформационной кривой эластичной пленки с покрытием суспензией графита

Исходные данные для таких расчетов изменения напряжения в пленке, полученные на примере эластичной полипропиленовой пленки, подвергнутой нескольким циклам деформации на воздухе и покрытой суспензией графита представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

В данном примере для расчетов среднего уровня напряжения и его увеличения по мере растяжения ($\Delta \sigma$) использованы интервалы относительного удлинения до 5-16% и 20-60% при первичном и повторной деформации.

Табл. 1. Результаты испытания эластичной полипропиленовой пленки с электропроводящим покрытием

ε , %	$\Delta R/R_0$	σ , МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\Delta\sigma/\sigma_{cp}$
3	0,04	0,11	0	0,02
4	0,34	0,14	0,03	
8	0,47	0,14	0,03	
12	0,92	0,14	0,03	
16	1,28	0,15	0,04	
20	2,14	0,11	0	0,01
32	3,28	0,12	0,01	
40	5,12	0,12	0,01	
48	8,7	0,12	0,01	
59	15,9	0,13	0,02	

Табл. 2. Расчет деформационной и тензочувствительности

Диапазон первичного ε_1 и повторного ε_2 растяжения пленки полипропилена (интервал оцифровки А-В)	$\varepsilon_1 \rightarrow$	$\varepsilon_2 \rightarrow$
	40% (5-45)	50% (10-60)
Модуль эластичности, МПа	0,09	0,05
Деформационная чувствительность (GF)	10,6	40
Тензочувствительность (QF), МПа ⁻¹	121	800
Относительная тензочувствительность (θF)	457	3846

Заключение

Рассчитаны характеристики деформационной и тензочувствительности (табл. 2), а также безразмерный параметр относительной тензочувствительности для объективной характеристики чувствительности эластичных датчиков к изменению напряжения определяемый как отношение изменения электрического сопротивления к нормированному по средней величине изменению механического напряжения.

Список литературы

1. Knite M, Teteris V, Kiploka A, Kaupuzs J. Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials // *SensorActuatA*. 2004, vol. 110(1), pp. 142-149.
2. Патент №2762026 РФ. Способ изготовления гибкого датчика деформации / А.В. Лозицкая, А.П. Кондратов. – Заявка № 2021103180 от 10.02.2021; опубл. 14.12.2021, Бюл. № 35.
3. Kondratov A.P., Lozitskaya A.V., Samokhin V.N., Volinsky A.A. Mullins effect in polymer large deformation strain gauges // *Journal of Polymer Research*. 2023, vol. 30(1), p. 36.

Сведения об авторах:

Долгоносов Вячеслав Константинович – аспирант;

Род Виктор Андреевич – студент;

Варакина Светлана Владимировна – студент;

Кондратов Александр Петрович – д.т.н., профессор.

АКТУАЛЬНОСТЬ ОЦЕНКИ КРУТИЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОГО РЕДУКТОРА НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РУКИ РОБОТА

Жуков М.Е., Синицына Ю.В.

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

Ключевые слова: планетарно-цевочный редуктор, циклоидальное зацепление, робот-манипулятор, крутильная жесткость, точность позиционирования, удельный момент.

Аннотация. В данной статье показана актуальность оценки крутильной жесткости планетарно-цевочной передачи за счет определения размеров деталей и их допусков, которые влияют на крутильную жесткость многопарного зацепления, а также установлена взаимосвязь угла закручивания тихоходного вала редуктора и точности позиционирования выходного звена руки робота-манипулятора.

IMPORTANCE OF ESTIMATION THE TORSIONAL RIGIDITY OF A CYCLOIDAL SPEED REDUCER ON THE ACCURACY OF POSITIONING A ROBOT'S ARM

Zhukov M.E., Sinitsyna Y.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: cycloidal speed reducer, cycloidal gear, robot-manipulator, torsional rigidity, accuracy of positioning, torque weight-ratio.

Abstract. This article shows the importance of estimation the torsional rigidity of a cycloidal speed reducer by determining the dimensions of parts and their tolerances, which affect the torsional rigidity of a multi-pair gearing, and also establishes the relationship between the angle of twist of the low-speed gearbox shaft and the positioning accuracy of the output link of the robot manipulator arm.

На сегодняшний день является актуальным проектирование поворотных осей роботов манипуляторов на базе планетарно-цевочных передач (ПЦП), ввиду большого ряда преимуществ таких передач перед другими. Такой редуктор позволяет обеспечить широкий диапазон передаточных чисел, минимальное значение люфта, крутильную жесткость, низкий момент инерции, а также значительный коэффициент полезного действия.

Помимо этого, ПЦП имеет высокое соотношение крутящего момента к массе, то есть облагает значительным удельным моментом. Удельный момент такой передачи обычно в 2...3 раза больше, чем у прочих [1]. Благодаря этому предоставляется возможность спроектировать достаточно компактный привод при большом крутящем моменте на выходном валу.

Однако большинство преимуществ такой передачи обусловлены её многопарным зацеплением [2]. Ценой такого ряда преимуществ являются высокие требования по точности изготовления планетарно-цевочных передач.

Рассматривая конструкцию планетарно-цевочной передачи [3] и наиболее ответственных поверхностей, которые сопрягаются друг с другом, приведем

допуски размеров этих поверхностей (рис. 1), где T_{dp} , T_{Dp} – допуски диаметра цевки, диаметра отверстия под цевку, T_{df} , T_{DF} – допуски диаметра пальцев, диаметра отверстия под пальцы, T_{ap} , T_{af} , T_{aF} – позиционные допуски расположения отверстий под цевку, отверстий под пальцы, пальцев, подшипников, T_{Tc} – допуск формы циклоиды.

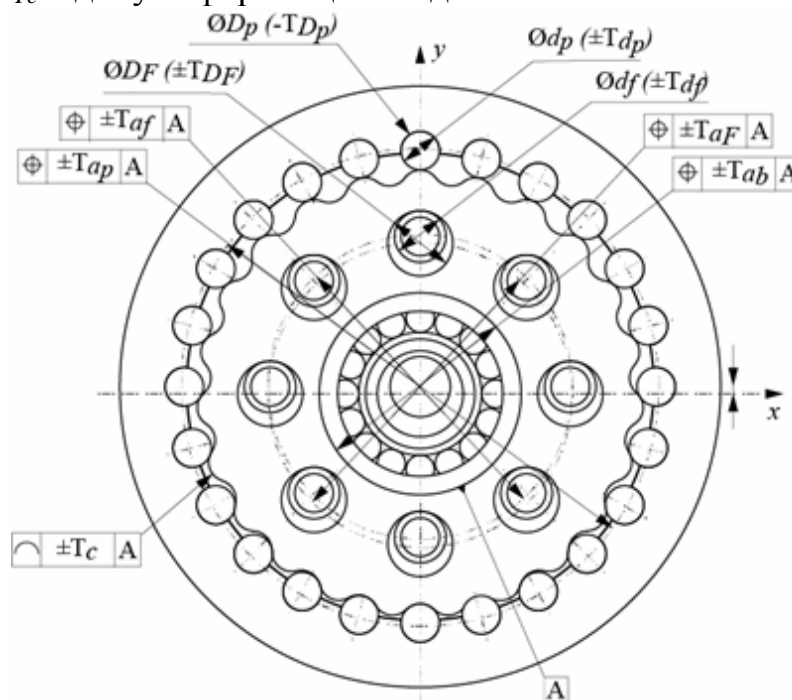


Рис. 1. Рассматриваемые допуски планетарно-цевочной передачи

При различном сочетании квалитетов точности этих размеров получается различная крутильная жесткость редуктора [4], то есть угол закручивания входного вала относительно выходного вала, что показано в работе [5].

При проектировании руки робота используются 3 планетарно-цевочные передачи, каждая имеет свою крутильную жесткость. В связи с этим, вклад в общую погрешность будет производить угол закручивания тихоходного вала под нагрузкой для каждого редуктора. С учетом длины звеньев руки робота L_1 и L_2 (рис. 2), угол отклонения тихоходного вала редуктора будет гораздо больше на входном звене руки робота за счет большего плеча.

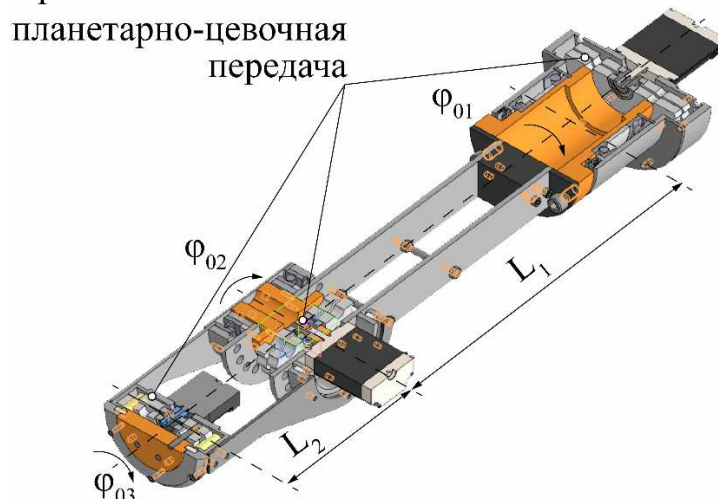


Рис. 2. Конструкция руки робота: Φ_{01} , Φ_{02} , Φ_{03} – углы закручивания редукторов

Выводы

1. Установлена актуальность использования планетарно-цевочной передачи в качестве поворотной оси робота-манипулятора посредством оценки удельного момента такой передачи.

2. Установлено, что точность изготовления передачи влияет не только напрямую, через погрешность угла поворота, но и косвенно, через жесткость передачи. В связи с чем необходимо проводить оценку точности изготовления планетарно-цевочной передачи.

Список литературы

1. Сеницына Ю.В. Влияние кинематики мотор-редуктора на удельный момент // Евразийское Научное Объединение. – 2017. – Т. 1, №10. – С. 56-58.
2. Сеницына Ю.В., Ермолаев М.М. Метод проектного расчета планетарно-цевочных передач для приводов легкой и текстильной промышленности // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020). Сборник материалов Международной научно-технической конференции. – М.: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2020. – Часть 2. – С. 296-299.
3. Иванов А.С. Ермолаев М.М., Чиркин А.В., Сеницына Ю.В. Метод расчета планетарно-цевочной передачи // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2015 г. – Донецк: МСМ, 2015. – Т. 1. – С. 151-157.
4. Палочкин С.В., Сеницына Ю.В., Эрастова К.Г. Влияние точности изготовления планетарно-цевочного редуктора на точность позиционирования робота параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – №11(740). – С. 13-21.
5. Сирицын А.И., Башкиров В.Н., Широких Э.В. Статическая крутильная жесткость привода станка на основе эпициклоидально-цевочной передачи // Вестник машиностроения. – 2015. – №1. – С. 3-7.

Сведения об авторах:

Жуков Михаил Евгеньевич – магистрант;

Сеницына Юлия Владимировна – к.т.н., доцент кафедры «Основы конструирования машин».

УДК 620.178.311.4

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Медовщиков А.В.

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

Ключевые слова: контактная усталость, шотландский механизм, выносливость, контактное взаимодействие.

Аннотация. Рассмотрен принцип работы шотландского механизма, используемого в качестве устройства, преобразующего вращательное движение в возвратно-поступательное перемещение. Описан принцип работы механизма и причина выхода из строя составных деталей. Разработана экспериментальная установка для проведения испытаний на контактную выносливость, воспроизводящая принцип работы механизма.

CONTACT FATIGUE EXPERIMENTAL MACHINE FOR REVERSAL TYPE OF MOTION

Medovshchikov A.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: contact fatigue, Scottish mechanism, fatigue, contact mechanic.

Abstract. The principle of operation of the Scottish mechanism, used as a device that converts rotational motion into reciprocating motion, is considered. The principle of operation of the mechanism and the reason for the failure of its component parts are described. An experimental setup has been developed for conducting contact endurance tests, reproducing the principle of operation of the mechanism.

Для механической обработки заготовок в машиностроении в последнее время все чаще используют станки с числовым программным управлением ЧПУ [1]. Для соединения вращающихся деталей и передачи крутящего момента широкое применение нашли шпоночные соединения и шлицевые. Перед нарезанием шпоночных и шлицевых пазов валы обтачиваются на токарных станках. Далее, для нарезания пазов вал необходимо закрепить на другом оборудовании, в зависимости от способа нарезания паза. Такой подход увеличивает номенклатуру оборудования, оснастки и инструмента на предприятии. Поэтому, в последнее время нашли свое применения приводные долбежные головки (ПДГ) для станков с ЧПУ. ПДГ устанавливается на револьверную голову токарного станка и при помощи приводов подач задается глубина резания и подача. Также обработка пазов происходит за один установ с основной обточкой вала, что благоприятно сказывается на точности изготовления. В качестве механизма, при помощи которого реализуется возвратно-поступательное движение, в ПДГ обычно используют шотландский механизм.

Принцип работы данного механизма описан в [2]. Принципиальная схема механизма приведена на рисунке 1. На приводной диск 1 с эксцентриситетом установлен приводной ролик 4, который перемещается внутри паза штока 2, на который устанавливается режущий инструмент 3.

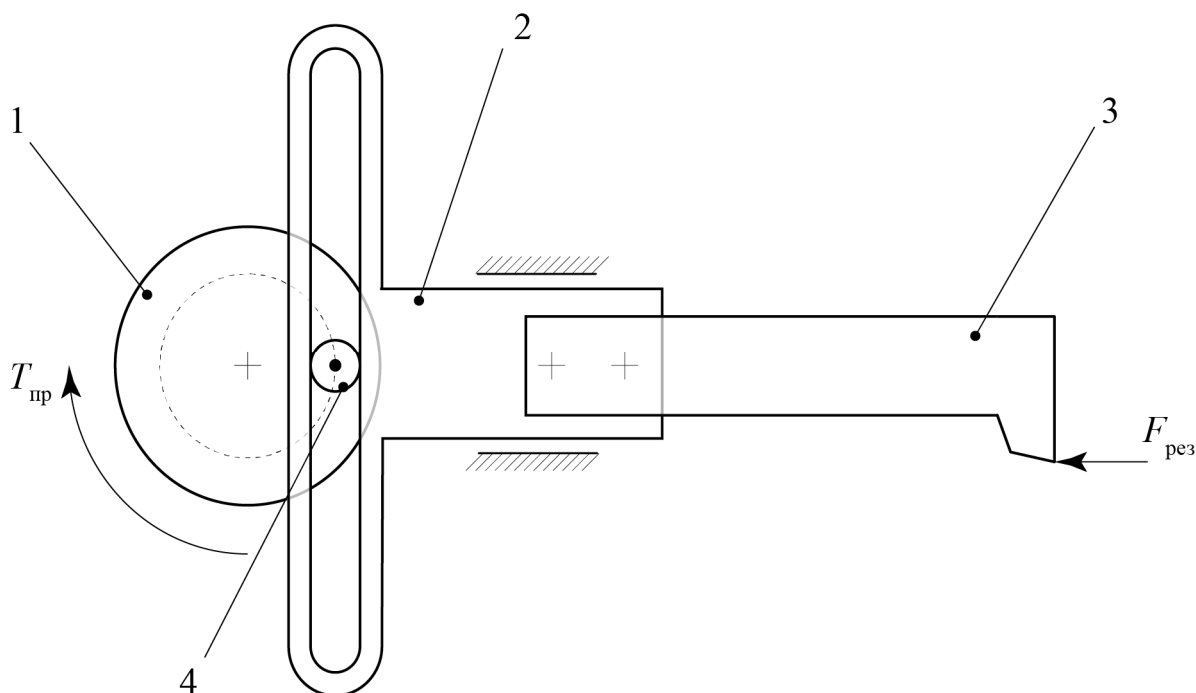


Рис. 1. Принципиальная схема работы шотландского механизма: 1 – приводной диск, 2 – шток, 3 – режущий инструмент, 4 – приводной ролик

Одной из причин выхода из строя данного механизма является усталостное выкрашивание рабочих поверхностей штока [3]. Для оценки ресурса работы штока необходимо провести усталостные расчеты и определить количество циклов работы до разрушения. Для этого необходимо иметь данные по контактной выносливости материала, из которого изготавливается шток.

Для получения данных по контактной выносливости материала необходимо провести усталостные испытания при циклическом контактном взаимодействии. Для этого необходимо разработать установку, на которой имитировалось бы взаимодействие ролика и штока в процессе работы механизма.

В данной установке образец плоской формы, который будет повторять форму рабочей поверхности штока, должен линейно перемещаться с реверсом. На образец должен давить ролик и обкатываться без скольжения по поверхности образца. Эскиз разработанной установки приведен на рисунке 2.

Установка собирается на столе винтового пресса. Усилие создается при помощи штока пресса и передается через оправку на ролик, который давит на поверхность образца. Образец закрепляется на каретке, которая перемещается вдоль направляющей благодаря электрическому линейному двигателю.

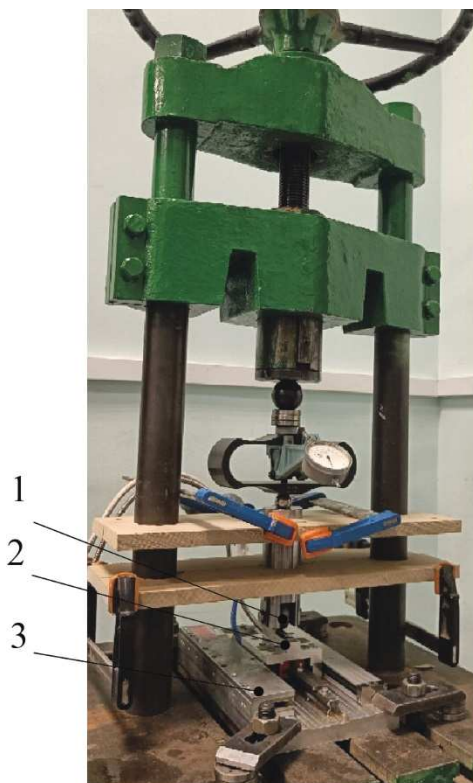


Рис. 2. Вид экспериментальной установки: 1 – ролик, 2 – образец, 3 – линейный электрический двигатель

Выводы. Разработанная экспериментальная установка позволяет с достаточной точностью воспроизвести условия контактного взаимодействия ролика и штока в процессе работы механизма.

Список литературы

1. Lasemi A., Xue D., Gu P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review // *Computer-Aided Design*. Elsevier. 2010, vol. 42, no. 7, pp. 641-654.
2. Adesola O.K. et al. An Automated Scotch Yoke Mechanism // *American Journal of Biomedical Science and Engineering*. 2017, vol. 3, no 1, pp. 8-14.
3. Arakelian V., Le Baron J.-P., Mkrtychyan M. Design of Scotch yoke mechanisms with improved driving dynamics // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. SAGE Publications Sage UK: London, England. 2016, vol. 230, no. 4, pp. 379-386.

Сведения об авторе:

Медовщиков Александр Вадимович – аспирант.

УДК 631.3

РЕМОНТ ОПОРНЫХ РОЛИКОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАКТОРОВ

Бураева Г.М., Шистеев А.В., Бураев М.К.

*Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Иркутск*

Ключевые слова: ремонт, восстановления деталей, ходовая часть, трактор, износ, опорный ролик.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования износов деталей ходовой системы гусеничных тракторов на примере опорных роликов. Была использована стандартная методика контроля размеров рабочих поверхностей роликов с помощью индикаторного нутромера, штангенциркулей и глубиномером, обеспечивающих необходимую точность. Одновременно выявлялись трещины, сколы, односторонние износы и др. Результаты измерений показали, что при сравнении допустимых требований на ремонт опорных роликов с результатами измерений изношенных поверхностей значения износа выходят за рамки технических требований. Учитывая износ деталей при выборе метода восстановления, предпочтение отдается механизированной наплавке с получением, значительного по толщине наплавочного слоя.

REPAIR OF SUPPORT ROLLERS OF CHASSIS TRACTOR TRACTORS

Buraeva G.M., Shisteev A.V., Buraev M.K.

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk

Keywords: repair, restoration of parts, chassis, tractor, wear, support roller.

Abstract. The article presents the results of a study of wear on parts of the running system of tracked tractors using support rollers as an example. A standard technique was used to control the dimensions of the working surfaces of the rollers using an indicator bore gauge, calipers and a depth gauge, providing the necessary accuracy. At the same time, cracks, chips, one-sided wear, etc. were detected. The measurement results showed that when comparing the permissible requirements for the repair of support rollers with the results of measurements of worn surfaces, the wear values go beyond the technical requirements. Taking into account the wear of parts when choosing a restoration method, preference is given to mechanized surfacing to obtain a surfacing layer of significant thickness.

Введение. Гусеничный парк тракторов на селе практически выведен из эксплуатации в виду того, что в стране их массовый выпуск прекратили. Однако в целом ряде сельскохозяйственных предприятий гусеничные тракторы по-прежнему занимают свое заслуженное место в производстве сельскохозяйственной продукции [1, 2]. Машины изнашиваются, особенно узлы и детали, работающие в абразивной среде, к которым относятся опорные ролики ходовой системы. В этой связи повторное использование изношенных деталей после надлежащего восстановления рабочих параметров до сих пор является актуальной задачей [1, 3] для инженерной службы села. Проблема в том, что восстановление деталей осуществляется в малом количестве и лишь на некоторых отраслевых предприятиях. По этой причине при ремонте машин в основном используют новые запасные части [4]. Другой не менее важной причиной является отсутствие научно-обоснованных прогнозных данных об

использовании изношенных деталей в качестве вторсырья в рамках экономики замкнутого цикла и рециклинга [5, 6]. Добиться этого можно при постоянном мониторинге технического состояния узлов и деталей. Исследования характера и степени износа рабочих поверхностей опорных роликов ходовой системы гусеничных тракторов проводится путем контроля и замера размеров.

Цель работы. Провести исследования степени износа основных поверхностей деталей полужесткой подвески ходовой части тракторов на примере опорных роликов.

Методика исследований. Исследования характера и степени износа основных поверхностей деталей ходовой части проводились путем контроля и замера их размеров у тракторов Т-170М, поступивших на ремонт в ЗАО «Октан» (г. Иркутск). Эти машины работали в основном на траншейной укладке силоса и сенажа, на рыхлении заброшенных земель, на мелиоративных и планировочных работах, на сельских стройобъектах и других работах, т.е. они работали в условиях абразивного изнашивания деталей ходовой части.

При проведении исследования были применены стандартные методики оценки технического состояния рабочих поверхностей изношенных деталей [7, 8] тракторов. Замеры размеров рабочих поверхностей роликов производились стандартными мерительными инструментами (индикаторными нутромерами, штангенциркулями и др.), обеспечивающими необходимую точность в пределах от 0,01 до 0,10 мм. Одновременно с замерами размеров выявлялись другие дефекты деталей (трещины, сколы, односторонние износы и др.).

На рисунке 1, на примере опорных роликов, показаны места измерения размеров изношенных поверхностей беговых дорожек 1 (рис. 1), наружных 5 и 6, внутренних буртов 6 и внутренней поверхности 2 отверстий роликов. Аналогичные измерения выполнены по натяжному и ведущему колесам и поддерживающему ролику.

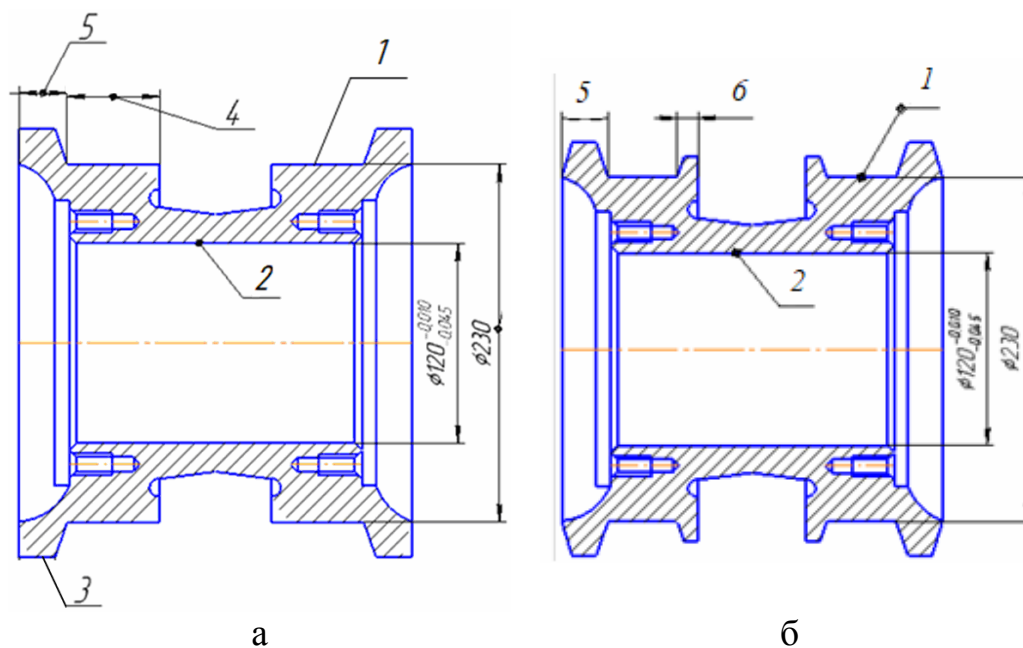


Рис. 1. Опорные ролики ходовой части гусеничного трактора:
а – однобортный; б – двубортный

Необходимое количество измерений, обеспечивающее заданную надежность P определялось по таблице 2 [9]. Так, при отношении доверительной оценки точности ε к будущему эмпирическому стандарту ошибки s равном 0,5 необходимое количество измерений будет равно $n = 13$ ($P = 0,90$), $n = 18$ ($P = 0,95$) и $n = 31$ ($P = 0,99$).

Проверка достаточности количества фактических измерений производилось по формуле

$$n \geq \left[\frac{t(p)}{\varepsilon} \right]^2 \cdot s^2,$$

где $t(p)$ – показатель достоверности при вероятности p [9].

Результаты и их обсуждение. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Табл. 1. Средние размеры и статистические характеристики по элементам изношенных деталей ходовой части тракторов ЧТЗ

Наименование деталей	Число измерений	Номера позиций по рис. 1	Средний размер по позиции, мм	Средний износ, \bar{x} , (мм)	Средне-квадратическое отклонение, s , (мм)	Дисперсия оценки, $s_{\bar{x}}$, (мм)
1. Ролик двубортный	46	5	13,86	6,14	1,02	0,15
		6	12,43	5,56	0,85	0,125
		2	120,26	0,26	0,02	0,038
		1	219,76	10,24	3,62	0,53
2.Ролик однобортный	55	1	213,9	16,1	3,79	0,51
		2	120,17	0,17	0,03	0,004
		3	14,01	0,99	0,16	0,02
3.Ролик поддерживающий	50	2	216,45	9,85	2,52	0,35
		3	12,37	0,17	0,06	0,008
		4	55,38	0,1	0,03	0,004
		5	19,42	0,12	0,07	0,009
4.Колесо ведущее	50	1	1,9	0,1	0,02	0,002
		2	85,19	0,19	0,05	0,007
5.Колесо натяжное	44	2	12,8	0,1	0,03	0,004
		3	94,66	1,53	0,51	0,007
		4	120,16	0,01	0,005	0,001

Допустимые требования на геометрические параметры однобортного и двубортного роликов согласно [8] следующие.

1. Нормальный диаметр беговых дорожек 230 мм. Допустимый диаметр 224 мм.

2. Нормальная толщина: наружных буртов (А) – 20 мм, внутренних буртов (Б) – 18 мм. Допустимая толщина: наружных буртов 16,7 мм, внутренних буртов 13,6 мм.

3. Нормальный диаметр под втулку подшипника (120 ± 1) мм.

Из таблицы 1 следует, что средние фактические размеры изношенных поверхностей этих деталей по позициям, приведенным на рисунках, при сопоставлении с нормативными показывают значения износов, выходящих за рамки технических требований:

- 1) ролик двубортный: (5) – 6,14 мм; (6) – 5056 мм; (2) – 0,26 мм; (1) – 10,24 мм;
2) ролик однобортный: (1) – 16,1 мм; (2) – 0,17 мм; (3) – 0,99 мм.

При сравнении допустимых требований на ремонт поддерживающего ролика с результатами измерений изношенных поверхностей (табл. 1) видно, что ресурс поддерживающего ролика лимитируют рабочая поверхность беговой дорожки, значения износа которой выходит за рамки технических требований: (1) – 9,85 мм.

Восстановление поверхности беговой дорожки роликов до номинального значения проводят с применением технологии автоматической наплавки, позволяющей получать значительный по толщине наплавочный слой с достаточной степенью прочности и износостойкости. Из способов восстановления на основе металлопокрытий преимущественное применение получили различные виды дуговой наплавки, обеспечивающие восстановление широкой номенклатуры деталей [7]. Применимость методов наплавки в зависимости от величины износа восстанавливаемых деталей представлена в таблице 2 показывает наиболее эффективные методы восстановления деталей с большими более 2 мм износами рабочих поверхностей. Это наплавка под слоем флюса, наплавка самозащитными порошковыми проволоками, заливка жидким металлом, электрошлаковая наплавка. Эти методы имеют довольно большую долю стоимости работ в себестоимости восстановления (до 70-80%), высокий коэффициент использования наплавленного металла и высокий уровень механизации работ.

Табл. 2. Применимость методов наплавки в зависимости от износа восстанавливаемых деталей [6, 7]

Основные методы наплавки при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники	Износ восстанавливаемых деталей		
	до 0,5 мм наиболее массовая по номенклатуре и объему группа	0,5-2 мм коленчатые валы, оси, шкивы, валы гладкие, шлицевые и др.	2-10 мм опорные катки и ролики, направляющие и ведущие, колеса, звенья гусениц и др.
Наплавка под слоем флюса	+	+	+
Наплавка в среде CO ₂	+	+	-
Вибродуговая наплавка	+	+	-
Наплавка самозащитными порошковыми проволоками	-	+	+
Заливка жидким металлом	-	-	+
Электрошлаковая наплавка	-	-	+

Табл. 2. Продолжение

Основные методы наплавки при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники	Износ восстанавливаемых деталей		
	до 0,5 мм наиболее массовая по номенклатуре и объему группа	0,5-2 мм коленчатые валы, оси, шкивы, валы гладкие, шлицевые и др.	2-10 мм опорные катки и ролики, направляющие и ведущие, колеса, звенья гусениц и др.
Доля стоимости наплавочных работ в себестоимости восстановления деталей, %	20-40	25-40	70-80
Коэффициент использования наплавленного металла	0,2-0,3	0,5-0,6	0,9-1,0
Уровень механизации наплавочных работ, %	около 75	80	85

При выборе способа наплавки необходимо учитывать:

- величину и степень неравномерности износа;
- конструктивно-технологические характеристики детали и поверхностей трения;
- условия работы детали и ее восстанавливаемой поверхности в соответствующем сопряжении (нагрузку, скорость, температуру, вид смазки, контакт с абразивом и др.);
- технологичность способа, его доступность и условия труда.

Вывод. Поступающие на капитальный ремонт тракторы Т-170М имеют значительный износ деталей их ходовой части, в особенности поверхности беговых дорожек опорных роликов. Значения их износов превышают в два и более раза допустимые значения. Результаты этих исследований можно принять за основу при разработке технологии восстановления деталей и проведения технико-экономических расчетов при проектировании наплавочных процессов путем насыщения ремонтной базы высокотехнологичным оборудованием, использованием в ремонтном производстве машиностроительных технологий.

Список литература

1. Бураев М.К. Производственно-техническая эксплуатация машинно-тракторного парка в АПК Байкальского региона. – Иркутск: Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. – 219 с.
2. Логинов И.С., Шуханов С.Н. Анализ тягово-сцепных и почвосберегающих свойств движителей тракторов // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы всероссийской студенческой научно-практической конференции: в IV томах, Иркутск, 17-18 февраля 2022 года. Том IV. – Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2022. – С. 97-101.
3. Бураев М.К., Охотин М.В. Вторичный рынок машин в системе агротехсервиса // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2008. – № 3. – С.41-44.

4. Бураев М.К. Оценка износа и годности деталей тракторов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. – № 6. – С.13-16.
5. Егоров И.Б., Бураева Г.М. Рециклинг технических объектов в АПК // Аграрная наука в инновационном развитии агропромышленного комплекса Иркутской области: Материалы очно-заочной научно-практической конференции посвященной Дню Российской науки, п. Молодежный, 09 февраля 2023 года. – Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. – С. 37-38.
6. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
7. Ли Р.И. Технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования перерабатывающих предприятий: учеб. пособ. – Липецк: МичГАУ, 2008. – 322 с.
8. Трактор Т-130М. Руководство по капитальному ремонту. – Челябинск, 1984. – 170 с.
9. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка его результатов: монография. – Краснодар: Изд-во КГАУ, 2004. – 239 с.

Сведения об авторах:

Бураева Галина Михайловна – ассистент кафедры «Технический сервис и общеинженерные дисциплины»;

Шистеев Алексей Валерьевич – к.т.н., доцент кафедры «Технический сервис и общеинженерные дисциплины»;

Бураев Михаил Кондратьевич – д.т.н., профессор кафедры «Технический сервис и общеинженерные дисциплины».

АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

*Гавричев И.В., Пенев М.В., Шишленин А.Н., Шматко А.Д.
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: керамоматричные композиты, карбидокремниевая матрица, углеродные и керамические волокна, слоистые и функционально-градиентные материалы.

Аннотация. В процессе работы был проведен анализ: основных особенностей волокнисто армированных керамоматричными композитами с SiC матрицей, используемых для их армирования волокнистых наполнителей и технологических процессов их получения; базовых технологических процессов производства изделий из керамоматричных композитов с карбидокремниевой матрицей, которые рассматриваются как основа для получения модифицированных функционально-градиентных и слоистых композитов.

ANALYSIS OF THE FIELD OF RESEARCH OF FIBROUS FILLERS OF CERAMIC COMPOSITES WITH A SILICON CARBIDE MATRIX

*Gavrichev I.V., Penev M.V., Shishlenin A.N., Shmatko A.D.
Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint-Petersburg*

Keywords: ceramic matrix composites, silicon carbide matrix, carbon and ceramic fibers, layered and functionally gradient materials.

Abstract. In the process of work, an analysis was carried out: the main features of fiber-reinforced ceramic matrix composites with a sic matrix, used for their reinforcement of fibrous fillers and technological processes for their production; basic technological processes for the production of products from ceramic matrix composites with a silicon carbide matrix, which are considered as the basis for obtaining modified functional-gradient and layered composites.

В настоящее время особое внимание во всем мире уделяется развитию конструкционных керамических материалов [1, 2]. Серьезным недостатком конструкционных материалов на основе монолитной керамики является низкая трещиностойкость и ударная вязкость, что существенно ограничивает возможности их применения в изделиях, работающих в условиях вибраций, механических и тепловых ударов. Особенно сильно этот недостаток сказывается в крупногабаритных и тонкостенных изделиях. Необходимо отметить, что проблема трещиностойкости является одной из ключевых в общей проблеме технической керамики, поскольку тугоплавким неметаллическим соединениям присущ общий недостаток – хрупкость в широком диапазоне температур. Армирование волокнистыми элементами (т.е. создание волокнисто-армированных керамоматричных композитов – КМК) представляет собой эффективный способ повышения сопротивления хрупкому разрушению керамики. КМК предназначены, прежде всего, для работы в экстремальных условиях.

Наибольшие практические успехи здесь достигнуты в направлении создания КМК на основе SiC керамики, армированной углеродными или карбидокремниевыми волокнами. В настоящее время для производства композитов с карбидокремниевой матрицей практическое применение нашли ряд технологических методов, основанных на твердо-, жидко- и газопарофазных процессах, а также их комбинациях. Эти технологические процессы получения КМК и сами материалы относятся к высокотехнологичным, наукоемким продуктам самого последнего поколения, потенциальные возможности которых еще предстоит реализовать в практических разработках.

Комплекс эксплуатационных свойств этих материалов определяется, прежде всего, фазовым составом и особенностями микроструктуры, которые, в свою очередь, зависят от достаточно большого числа разнообразных факторов. Эффект предполагается получить от модифицирования КМК микро- и наноразмерными компонентами – микро порошками, вискерами, керамическими и углеродными наночастицами (нанопорошки различной природы, углеродные нанотрубки и нановолокна и др.). Многообразие доступных микро- и наноматериалов, широкий диапазон их свойств и почти неограниченные возможности модифицирования позволяют говорить о возможности получения КМК с принципиально новыми значительно более высокими эксплуатационными свойствами.

Одним из путей создания поверхностных функциональных слоев, обеспечивающих высокую износо- и коррозионную стойкость, являются моно- и градиентные покрытия из металлов и различного рода керамики, наносимые различными технологическими способами. Кроме того, повышение износо- и коррозионной стойкости поверхностных слоев, непосредственно контактирующих с агрессивной средой, возможно за счет их микро- и наномодифицирования различными функциональными микро- и наночастицами. Анализ программ ведущих промышленно развитых стран показывает, что в настоящее время более 80% производимых изделий используется с покрытиями различного назначения. При этом одними из главных задач являются разработка технологий подготовки поверхностей под нанесение покрытий и технологические процессы нанесения самих различного рода покрытий с заданными эксплуатационными свойствами. При этом должна решаться задача совместности работы (главным образом прочного сцепления) всего объема КМК и наносимых на него покрытий, учитывая, что SiC-матрица является химически инертным материалом, а сам КМК имеет очень низкий (близкий к нулю) коэффициент линейного термического расширения. Поэтому необходимы подбор материалов покрытий и разработка технологических схем нанесения этих покрытий, обеспечивающих возникновение минимальных внутренних и межслоевых напряжений как в поверхностном слое, так и в зоне его контакта с КМК, как на стадии нанесения, так и при эксплуатации изделия в условиях высоких механических нагрузок, агрессивных сред и высоких температур.

Следует отметить, что большой спектр задач, стоящих перед функциональными покрытиями и многообразие используемых при этом материалов накладывает принципиальные требования по методам нанесения

покрытий, представляющим значительный интерес для научного анализа. Одной из первых задач является анализ результатов исследований в области разработки и создания модифицированных функционально-градиентных и слоистых КМК с SiC матрицей.

Проведен анализ волокнистых наполнителей [2-5] перспективных для армирования карбидокремниевой матрицы. Для армирования КМК с SiC матрицей в настоящее время практическое применение нашли углеродные волокна (углерод-керамические КМ – УККМ) и керамические волокна на основе различных карбидных, нитридных, боридных и оксидных соединений. Среди последней группы волокон подробно проанализированы волокна карбида кремния и оксида алюминия, которые нашли относительно широкое промышленное применение для армирования данных типов КМК. Кроме непрерывных керамических волокон рассмотрены и дискретные волокнистые наполнители на основе нитевидных монокристаллов (вискеры или «усы»).

Показано, что в настоящее время при создании волокнисто-армированных КМК с карбидокремниевой матрицей наиболее перспективными армирующими материалами все-таки являются углеродные волокна. Они обладают низкими коэффициентом термического расширения, высокими значениями прочности и модуля упругости, малой пластичностью. Немаловажным фактором является также их относительно большой объем производства и низкая стоимость по сравнению с карбидокремниевыми волокнами. В C_f/SiC композитах SiC матрица обеспечивает твердость и износостойкость материала, а армирующие углеродные волокна обеспечивают повышение прочности и ударной вязкости материала.

Список литературы

1. Третьяков Ю.Д. Керамика в прошлом, настоящем и будущем // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 53-59.
2. Saito S. Fine ceramics. – Elsevier: Tokyo, 1988. – 347 p.
3. Advanced ceramics US industry study with forecast to 2010 & 2015. – Desember 2006. – 226 p.
4. Fitzer E., Gadow R. Fiber-reinforced silicon carbide // Am. Ceram. Soc. Bull. 1986, vol. 65, pp. 326-335.
5. Гаршин А.П., Чулкин С.Г. Реакционноспеченные карбидокремниевые материалы конструкционного назначения. Физико-механические и трибологические свойства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 84 с.

Сведения об авторах:

Гавричев Иван Владимирович – аспирант;

Пенев Максим Викторович – аспирант;

Шшленин Александр Николаевич – аспирант;

Шматко Алексей Дмитриевич – д.т.н., профессор.

УДК 534.08

ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Соболев И.А.^{1,2}, Рожков М.С.², Азанов Д.А.², Шматко А.Д.²

¹ООО «Аэроакустические технологии», Санкт-Петербург;

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова; Санкт-Петербург

Ключевые слова: акустическая эмиссия, неразрушающий контроль, поиск дефектов, амплитуда, импульсы, упругие волны.

Аннотация. В работе рассматривается вопрос перспективных направлений использования метода акустической эмиссии. Приводится краткое описание метода и его сравнение с аналогами. Автор описывает проведенный эксперимент с ответственным полым изделием для газовой системы и обращает внимание на результаты эксперимента. В работе обосновывается предположение о возможности применения неразрушающего метода акустической эмиссии в областях авиации и космонавтики за счёт полученных натуральных данных.

AN INNOVATIVE METHOD OF ACOUSTIC EMISSION IN ENSURING THE QUALITY OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS

Sobolev I.A.^{1,2}, Rozhkov M.S.², Azanov D.A.², Shmatko A.D.²

¹Aeroacoustic Technologies LLC;

²Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg

Keywords: acoustic emission, non-destructive testing, defect detection, amplitude, pulses, elastic waves.

Abstract. The paper considers the issue of promising directions for using the acoustic emission method. A brief description of the method and its comparison with analogues are provided. The author describes the conducted experiment with a responsible hollow product for a gas system and draws attention to the results of the experiment. The paper substantiates the assumption about the possibility of using a non-destructive acoustic emission method in the fields of aviation and cosmonautics due to the obtained field data.

Ответственные изделия машиностроения всё больше и больше усложняются в своей конструкции, а также повышаются требования к их эксплуатационной надежности. В связи с этим повышаются требования к качеству конструкций и качеству контроля элементов этих конструкций. Современная наука преподносит исследователям широкие возможности в выборе методов и способов проведения анализа. Одними из самых перспективных являются методы неразрушающего контроля (МНК). С помощью них исследователь может проверить конструкцию на целостность без нарушения или повреждения исследуемого объекта. К МНК относят: визуальный контроль, ультразвуковой контроль, радиографический контроль, капиллярный контроль, магнитный контроль, тепловой контроль, вихретоковый контроль, акустикоэмиссионный контроль. Указанные методы обладают как своими сильными сторонами, так и слабыми [1].

Исследователи обнаружили, сравнив несколько неразрушающих методов между собой, преимущество метода акустической эмиссии (МАЭ) по отношению к остальным НМК. Авторы статьи указали следующие преимущества. С помощью МАЭ можно обнаруживать самый опасный вид дефектов – развивающийся дефект. При контроле не требуется оператор, который будет сканировать 100% поверхности исследуемого объекта. Он нужен только для установки датчиков один раз. Для анализа всей конструкции требуется доступ только к небольшой части поверхности объекта контроля. Это подтверждается проведенными экспериментами в статье. Помимо того, что метод может обнаруживать развивающиеся дефекты, можно определять их точное положение. Это особенно актуально в больших конструкциях, таких как самолёты и космические аппараты. В приведённых конструкциях даже дефект в виде трещины размерами в 5 мкм ($5 \cdot 10^{-6}$ м) может приводить к значительным поломкам. Поскольку подобный дефект очень маленький, то стандартные НМК испытывают большие проблемы при обнаружении таких повреждений. В случае МАЭ это является стандартной практикой для анализа. С помощью метода, помимо сталей можно исследовать алюминий и иные металлы, а также пластики.

Следует отметить, что для метода не требуется источник сигнала. Исследуемый объект сам является источником сигналов за счёт генерации упругих волн при развитии или возникновении дефектов. Указанные положительные стороны метода позволяют предположить, где лучше всего его применять сегодня. Более детально теоретическая и реальная область применения (на сегодняшний день) представлена ниже.

Акустической эмиссией называется явление возникновения упругих волн в структуре исследуемого материала, которые вызываются какой-либо перестройкой в структуре объекта исследования. Эта группа методов начала своё существование с конца XIX столетия, а именно в 1928 году наш соотечественник С.Я. Соколов впервые предложил использовать ультразвук для обнаружения внутренних несплошностей в изделиях [2; 3]. Открытие же непосредственно метода акустической эмиссии связано с именем немецкого исследователя Джозефа Кайзера, впервые применившего этот метод в 50-е годы XX века [2].

К середине 60-х этот метод обрел невероятную популярность во всём мире и продолжил своё активное развитие в Японии и США. Поэтому историческим контекстом возникновения рассматриваемого метода акустической эмиссии в рамках данного исследования будем считать XX век. Сегодня МАЭ применяется в целях: проверочного контроля; контроля изменений нагрузки во время работы объекта; испытания на усталость; комплексного нагружения [4].

Если говорить о конкретных сферах применения (где сегодня применяется), то сюда входит: контроль сварки; контроль износа; регистрация соприкосновения оборудования; обнаруживание течей и потоков жидкостей. Потенциальными областями являются: авиация, космонавтика, беспилотники и т.д. Ниже в статье будет дано объяснение сути метода и приведён пример работы с методом, который подтверждает (в теории) его применение в указанных областях.

Применение метода акустической эмиссии для локации дефекта на корпусе полого изделия

В качестве объекта исследования выступает полый цилиндр с отверстием на дне, используемый в газовых установках. Изделие является ответственным. К данному цилиндру приварены ручки и фланцевые элементы. Фотография изделия показана на рисунке 1. На рисунке 2 приведена фотография подготовленного оборудования для проведения эксперимента. Модель с установленными датчиками можно увидеть на рисунке 3.



Рис. 1. Фотографии изделия для исследования



Рис. 2. фотография подготовленного оборудования для исследования:
1 – ноутбук для вывода результатов; 2 – предусилитель; 3 – тензометрический датчик;
4 – кронштейн крепления; 5 – акустико-эмиссионная система

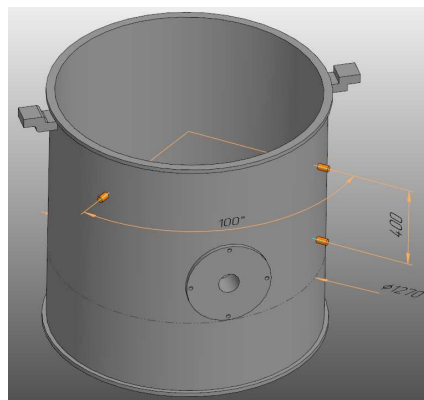


Рис. 3. Упрощённая модель изделия с установленными тензометрическими датчиками

На изделие были установлены тензометрические датчики. Положение датчиков показано на рисунке 3. В ходе эксперимента была произведена

настройка стенда для поиска локаций с последующим сбором данных и оценкой качества изделия. Во время исследования в структуре изделия возникали упругие волны, регистрируемые тензометрическими датчиками (3). Данные преобразовывались в электрический сигнал и усиливались через предусилитель (2). Далее сигнал поступал в систему (5). Сохранялись лишь результаты, которые преодолевали пороговое значение в 40 дБ. Далее был произведён расчёт локации с потенциальным дефектом в структуре. Примеры рассчитанных локаций (от потенциальных дефектов) на изделии показаны на рисунке 4.

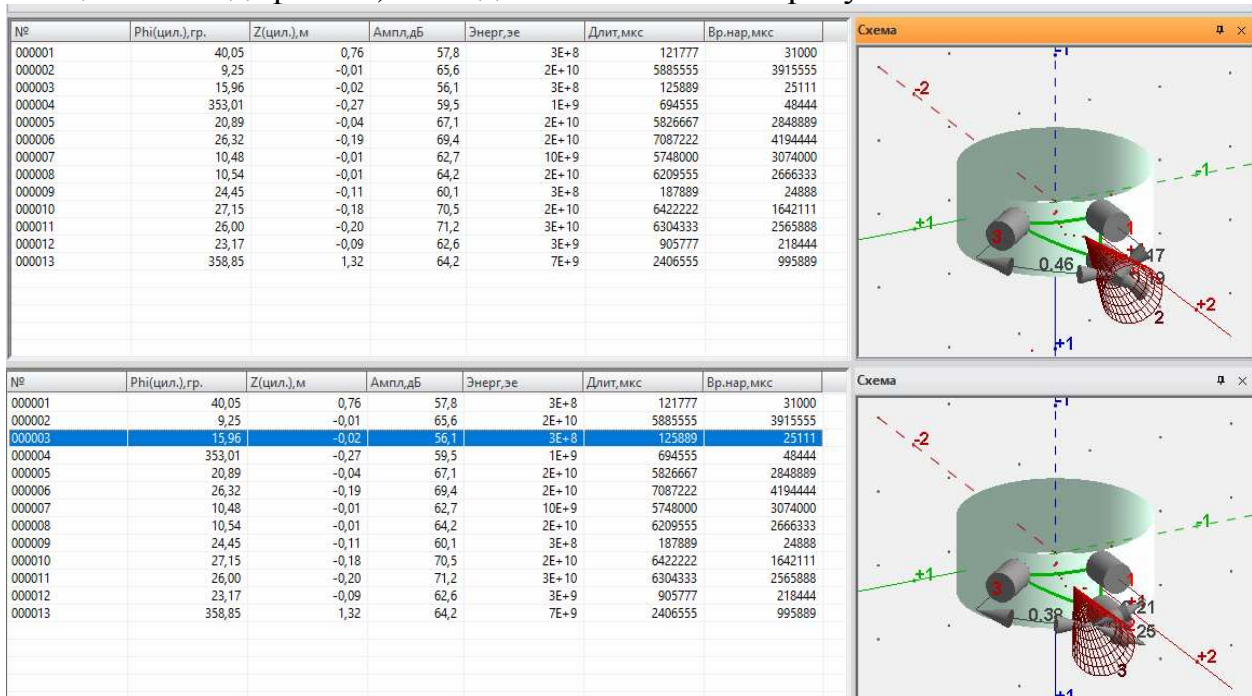


Рис. 4. Результаты расчёта положения дефекта

Как видно из рисунка 4 система не только смогла зафиксировать силовые, амплитудные и энергетические параметры упругих волн от дефектов в заданной области, но и лоцировать дефект объекта исследования. Даже с учётом того, что изделие сварное и имело ряд полостей в конструкции, были найдены нужные локации. Помимо этого, исследуемое изделие, само по себе габаритное. Диаметр 1270 мм, высота 630 мм. Сигнал в ходе эксперимента, в целом, не рассеивался.

Из выше указанного следует, что системой можно исследовать сложные конструкции как изготовленные сваркой, так и имеющие сквозные или полые элементы. Изделия могут быть габаритными. Для дальнейшего уточнения данных требуются дополнительные исследования в данной области.

Финансирование. Проект поддержан Фондом содействия инновациям. Договор 2443ГССС15-L/89986 от 08.12.2023. Название проекта: «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической эмиссии».

Список литературы

1. Ремшев Е.Ю., Соболев И.А., Олехвер А.И., Лукичев В.Ю. Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля конструкции летательного аппарата методом акустической эмиссии // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, №2(24). – С. 65-82.

2. Оглезнева Л.А., Кулешов В.К. Акустико-эмиссионный контроль, его особенности и обеспеченность // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – Т. 312, №2. – С. 205-210.
3. Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021), 13-16 апреля 2021, Санкт-Петербург: сборник материалов / Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов и др.; редакционная коллегия: д.т.н. Федоров А.В. и др. – СПб.: Свен, 2021. – 144 с.
4. Оглезнева Л.А., Кулешов В.К. Акустико-эмиссионный контроль, его особенности и обеспеченность // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – №2. – С. 205-210.
5. Попов А.А., Баранец А.С., Губанов Д.В., Петухов В.Л. Положительные и отрицательные стороны акустико-эмиссионного способа диагностики при проведении неразрушающего контроля оборудования // Современные научные исследования и инновации. –2016. – №4. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/04/67330>.

Сведения об авторах:

Соболев Илья Александрович – генеральный директор, аспирант;

Рожков Михаил Сергеевич – аспирант;

Азанов Дмитрий Александрович – аспирант;

Шматко Алексей Дмитриевич – д.т.н., профессор.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ПАМЯТНЫХ ЗНАКОВ

Силаев С.М.¹, Гаврилов А.Д.¹, Расулов З.Н.², Силаев М.Ю.²

¹ООО «НПЦ Технологическое обеспечение и контроль»;

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

Ключевые слова: медаль, чеканка, обработка давлением, инструмент, моделирование.

Аннотация. В работе по изготовлению медалей рассматриваются художественные произведения из металла, изготовленные с применением способов обработки давлением, показаны основные технологические приемы подготовки заготовок, особенности процесса чеканки, основные этапы по созданию эскизных проектов художественных изделий, а также проектированию рабочего инструмента.

TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION IN THE DESIGN AND MANUFACTURE OF COMMEMORATIVE SIGNS

Silaev S.M.¹, Gavrilov A.D.¹, Rasulov Z.N.², Silaev M.Yu.²

¹Technological support and control LLC;

²Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint-Petersburg

Keywords: medal, embossing, pressure treatment, tool, modeling.

Abstract. In the work on the manufacture of medals, artistic works made of metal made using pressure treatment methods are considered, the main technological techniques for preparing blanks, features of the embossing process, the main stages for creating sketch designs of artistic products, as well as designing working tools are shown.

Рельефная чеканка с обработкой рельефа различной высоты и степени детализации широко используется с древних времен по настоящее время. В литературе описаны специальные требования, предъявляемые к медалям как особому виду памятника. Медаль отражает в миниатюрном рельефе важные исторические события. Процесс чеканки используется при изготовлении монет, медалей, металлической посуды, различных художественных обрамлений, памятных знаков. Технологическая подготовка производства является сложным и энергоёмким процессом, требующим тщательного подхода к выбору инструментария для создания изделия. Но с появлением новых способов воплощения математических моделей в жизнь производство продукции становится намного проще и быстрее. Один из таких способов применен в создании памятных медалей (рис. 1). В работе изложены основные положения разработки технологических процессов изготовления памятных знаков.

Опираясь на существующие памятные знаки, мы создаем векторные двухмерные модели памятных медалей и их ориентировочные макеты в системе ArtCAM. В программе ArtCAM используя векторные примитивы, строим модель лицевой и тыльной части памятной медали. Используя стандартные методы построения рельефа, строим макет медали для визуализации конечного продукта.

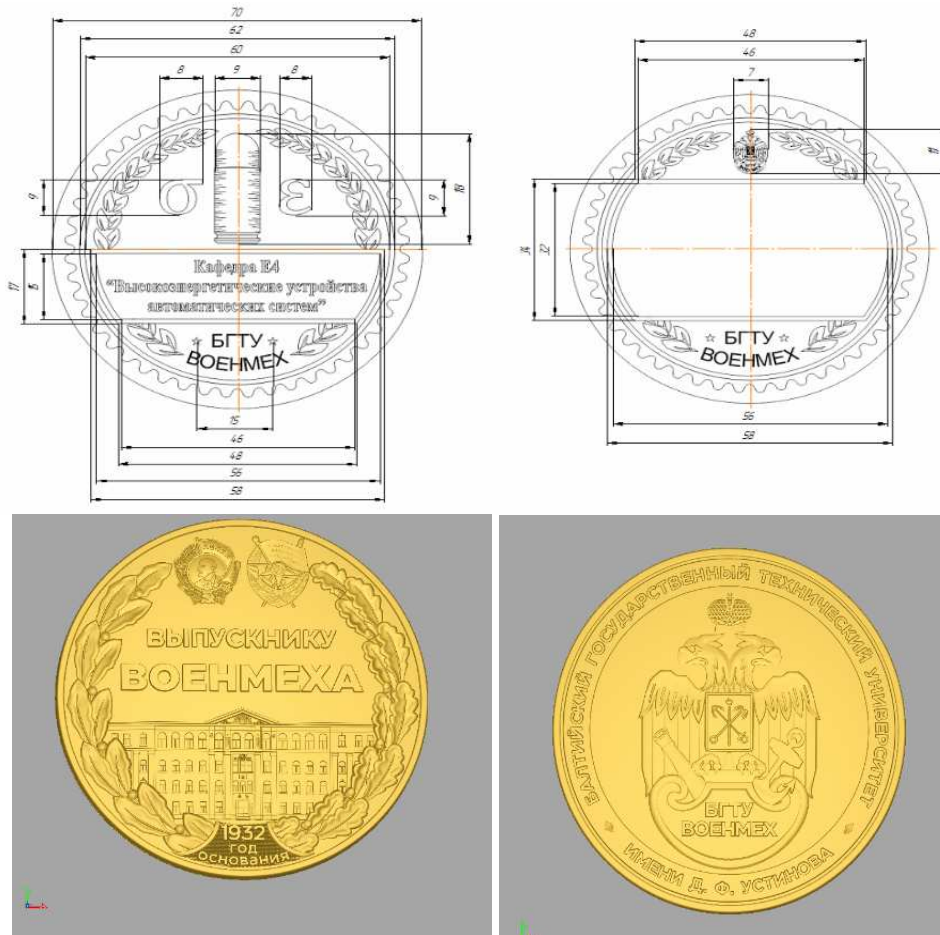


Рис. 1. Элементы моделирования памятных знаков

Качество изделия, изготовленного штамповкой, в значительной мере определяется качеством инструмента [1, 2]. Для изготовления инструмента чеканки требуется пять операций, из них: одна операция обработки резанием – токарная обработка цилиндрического прутка, две механические операции – шлифовка торцевых поверхности заготовки и полировка рабочей поверхности заготовки, одна операция электроэрозионной обработки – прожиг рельефа на рабочей поверхности пуансон-матрицы и одна операция термической обработки – вакуумная закалка пуансон-матрицы. Вакуумная термообработка является основой передовых технологий в термической обработке для инструментальной промышленности. После проведения любого процесса термообработки на поверхности детали появляется окисление, когда они подвергаются воздействию воздуха. Это приводит к последующей трудоёмкой и дорогостоящей обработке. Поэтому, термообработку предпочтительно проводить в бескислородной атмосфере. В дополнение к использованию высокочистых защитных газов, используют вакуум как лучшую защиту против окисления, и который является наиболее эффективной атмосферой. Процесс полирования введен в «технологический процесс изготовления инструмента для чеканки», для получения зеркальной поверхности инструмента и соответственно зеркальной поверхности готовой медали. Полированию подвергается только рабочая поверхность инструмента для чеканки, так, как только она вступает в контакт с заготовкой при осуществлении рабочей операции. Процесс полирования показан на рисунке 2.

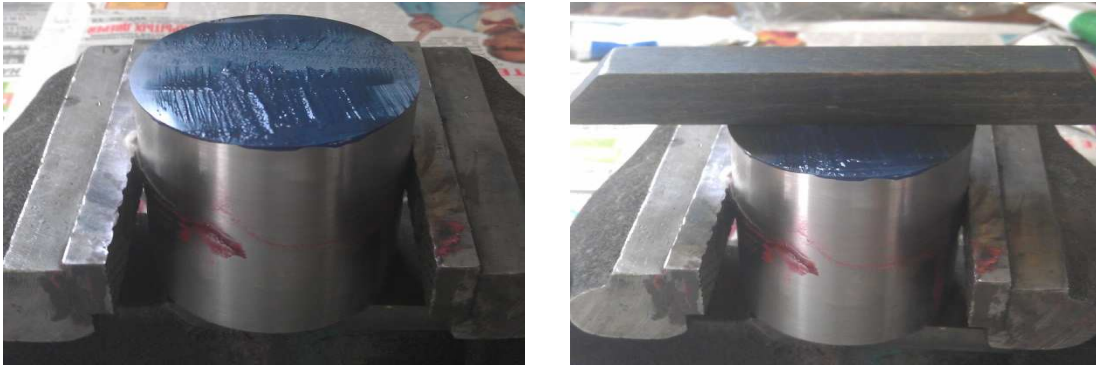


Рис. 2. Нанесение полировальной пасты

Процесс электроэрозионной обработки основан на свойстве электрического разряда расплавлять и удалять металл. В результате взаимодействия двух электродов, находящихся в жидкой диэлектрической среде и подключенных к источнику электрического тока, образуются искровые разряды. В роли первого электрода выступает заготовка из токопроводящего материала, второго – инструмент из тугоплавкого материала или же материала с высокой теплопроводностью. Разряды возникают в импульсном режиме, чтобы позволить удаляемому металлу охладиться и предотвратить его воссоединение с основой. Для осуществления процесса электроэрозионного прожига, необходим инструмент. В случае прожига заготовки для чеканки инструментом является – электрод. Электрод изготовлен гальваническим методом и показан на рисунке 3.



Рис. 3. Инструмент для электроэрозионного прожига

После изготовления инструмента и получения заготовки вырубкой необходимо провести подготовку заготовок для придания им зеркальной поверхности. Операции, применяемые для этой обработки: шлифование и полирование. Студенты под руководством преподавателя проводят эти операции в лаборатории на специализированном оборудовании. Качество изделия, изготовленного штамповкой, в значительной мере определяется качеством инструмента. В практике производства медалей реализуются различные технологии для получения рельефа инструмента. Окончательным этапом изготовления художественных изделий является отделка. Под отделкой художественных изделий понимается комплекс различных технологических операций, которые придают изделиям законченный вид. Различают следующие способы отделки: механические, химические, электрохимические (гальванические) [3-5].

Список литературы

1. Расулов З.Н., Ремшев Е.Ю. Особенности модификации поверхности рабочего инструмента при обработке тугоплавких металлов // Научные исследования: итоги и перспективы. – 2021. – Т. 2, № 3. – С. 52-62.
2. Маликов В.Н., Ишков А.В., Войнаш С.А., Соколова В.А., Ремшев Е.Ю. Исследование процессов упрочнения стальных деталей методом индукционной наплавки // Metallurg. – 2021. – № 11. – С. 69-75.
3. Одноралов Н.В. Техника медальерного искусства. – М.: Изобразительное искусство, 1983. – 158 с.
4. Флеров А.В., Демина М.Т., Елизаров А.Н., Шеманов Ю.А. Техника художественной эмали, чеканки иковки. – М.: Высшая школа, 1986. – 191 с.
5. Флеров А.В. Материаловедение и технология художественной обработки металлов. – М.: Высш. школа, 1981. – 288 с.

Сведения об авторах:

Силаев Станислав Михайлович – инженер;

Гаврилов Александр Дмитриевич – инженер;

Расулов Зайнодин Нурмагомедович – к.т.н., доцент кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем»;

Силаев Михаил Юрьевич – заведующий лабораторией кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем».

ВЕРИФИКАЦИЯ И ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ТРАВЕРСЫ ДЛЯ МОНТАЖА ВЕРТИКАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Чаржова К.Ю., Демченко М.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: траверса для монтажа, метод предельных состояний, оценка напряженно-деформированного состояния конструкции, верификация модели, топологическая оптимизация изделия.

Аннотация. В статье рассмотрена универсальная конструкция траверсы для возведения колонных аппаратов, которая позволяет распределить груз на несколько подъемных механизмов, либо распределить нагрузку с одного подъемного сооружения на несколько точек аппарата. Она состоит из 12 модулей, которые могут формировать различную длину под типоразмер аппарата. Проведен аналитический расчёт стержня траверсы и подобраны сечения узлов их соединения по методу предельных состояний; проведена оценка напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в библиотеке APM FEM программного комплекса КОМПАС 3D, а также в модуле Static Structural программы ANSYS. Рассмотрен модуль топологической оптимизации в программе ANSYS для уменьшения массы и габаритов траверсы. Верификация результатов аналитического и прочностных расчетов показала правильность заложения граничных условий и нагружения конструкции траверсы.

VERIFICATION AND TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE SPREADER BEAM MODEL FOR MOUNTING VERTICAL EQUIPMENT

Charzhova K.Yu., Demchenko M.V.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Keywords: spreader beam for mounting, limit state method, assessment of the stress-strain state of the structure, model verification, topological optimization of the product.

Abstract. The article considers a universal design of a spreader beam for the construction of column devices, which allows you to distribute the load on several lifting mechanisms, or distribute the load from one lifting structure to several points of the device. It consists of 12 modules that can form different lengths for the standard size of the device. The analytical calculation of the spreader beam rod was carried out and the sections of the nodes of their connection were selected using the limit state method; the stress-strain state was evaluated by the finite element method in the APM FEM library of the КОМПАС 3D software package, as well as in the Static Structural module of the ANSYS program. The module of topological optimization in the ANSYS program for reducing the mass and dimensions of the spreader beam is considered. Verification of the results of analytical and strength calculations showed the correctness of the boundary conditions and loading of the spreader beam structure.

Топологическая оптимизация конструкции – это метод инженерного проектирования, который позволяет оптимизировать форму и распределение материала в конструкции для достижения заданных целей, таких как минимизация веса при сохранении необходимой прочности.

Идея топологической оптимизации заключается в уменьшении массы и объема конструкции, но также в минимизации деформации при максимизации жесткости. Это достигается при правильном распределении материала. Для

оптимизации топологии необходимо произвести прочностной расчет конструкции.

Целью данной работы является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) существующего технологического решения траверсы с переменной длиной от 1,5 до 7,5 метров и грузоподъемностью 400 тонн, а также верификация модели путем сопоставления результатов прочностных расчетов с аналитическим для топологической оптимизации конструкции.

Аналитический расчет траверсы проводился по методу предельных состояний [1-4], в ходе которого было подобрано сечение профильной двутавровой балки 30К1 СТО АЧСМ 20-93, посчитано суммарное сжимающее усилие на траверсе N_1 , которое составило около 140 тс, и выполнена проверка на прочность по формуле

$$\frac{N_1}{\varphi \cdot F_{mp}} \leq m \cdot R, \quad (1)$$

$$\frac{1,1 \cdot 1,1 \cdot 139719 \text{ кгс}}{0,91 \cdot 110,8 \text{ см}^2} = 167 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \leq 0,85 \cdot 2300 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 1955 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} - \text{условие выполнено.}$$

При создании электронной модели траверсы использовалась программа КОМПАС 3D и ее специализированные библиотеки и модули, в частности модуль прочностного анализа АРМ FEM. Дополнительно прочностной расчет проводился в программе ANSYS.

Были заложены граничные условия и выполнен статический расчет траверсы методом конечных элементов (МКЭ) [5]. Материал конструкции – Ст3 ГОСТ 380. В качестве опор закреплены верхние пальцы (рис. 1,а). Нагрузка величиной 200 тс прикладывается к нижним пальцам (рис. 1,а), поверхность которых разделена на четыре сектора. В соединениях пальцев с пластинами установлен скользящий контакт с коэффициентом трения 0,15 [4]. Конечно-элементная сетка в АРМ FEM состоит из 4-узловых тетраэдров, максимальная и минимальная длина которых составляет 50 и 10 мм соответственно (рис. 1,б). Расчетная сетка в ANSYS построена автоматически, но задан контакт сетки в соединениях пальцев с пластинами (рис. 1,б).

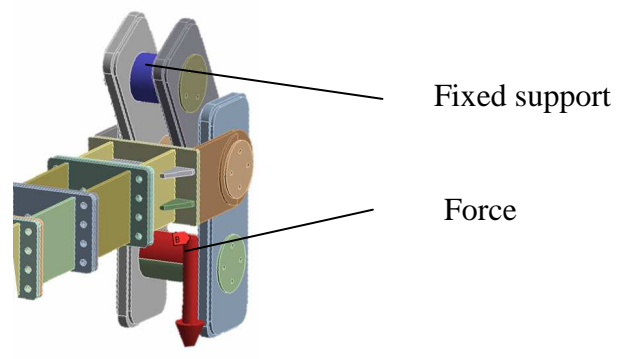
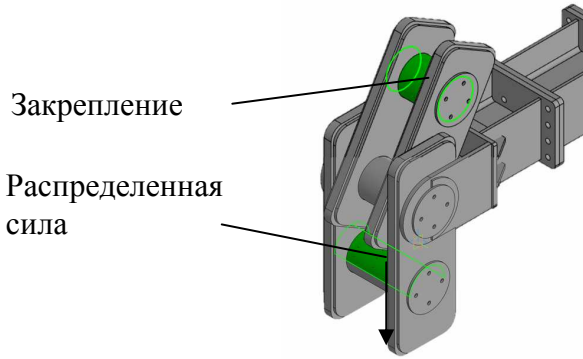
Результаты оценивались по критерию прочности и жёсткости [6]. Напряжения по Мизесу не превышают расчетного сопротивления по пределу текучести материала (230 МПа), таким образом, условие прочности выполняется (рис. 1,в) [2]. По критерию жёсткости прогибы в плоскости изгиба составляют 4 мм, что не превышает допустимых значений ($L/400 = 2500/400 = 6,25$ мм) (рис. 1,г) [1].

На рисунке 1 представлена сравнительная характеристика программных комплексов КОМПАС 3D и ANSYS по оценке НДС траверсы.

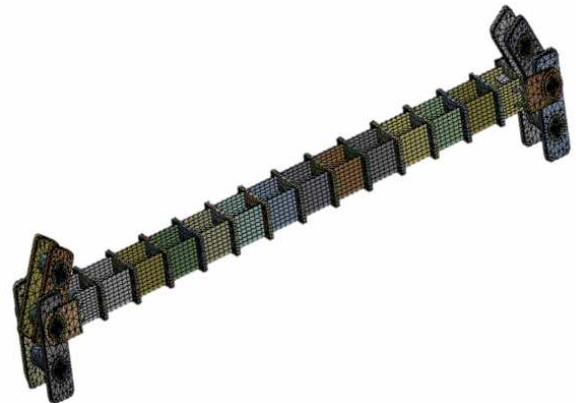
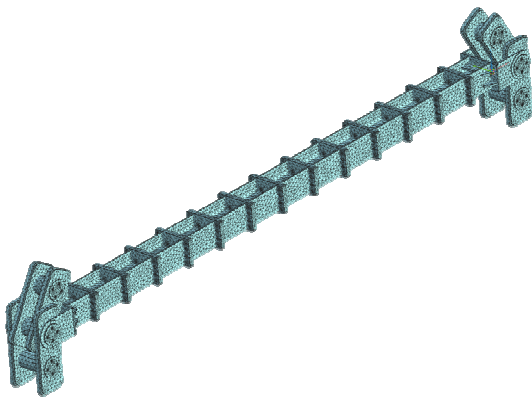
По результатам прочностных расчетов напряжения по Мизесу в АРМ FEM и ANSYS составили 166,7 МПа и 159,5 МПа соответственно, что совпадает с результатом аналитического расчета – 167,7 МПа, с учетом погрешности. Деформационные перемещения в АРМ FEM составило 3,78 мм, что примерно равно результатам в ANSYS – 3,89 мм.

APM FEM KOMPAS 3D

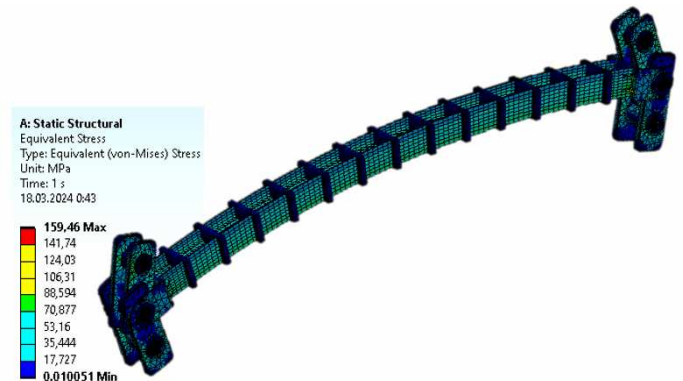
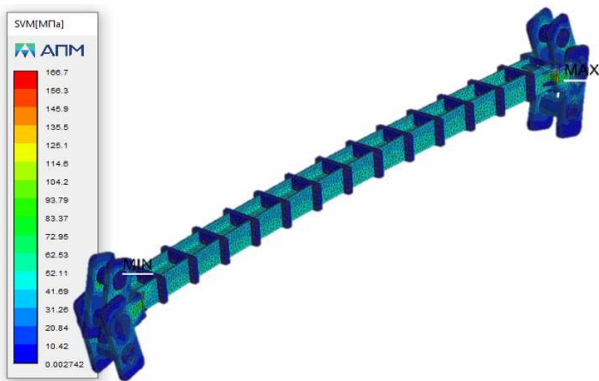
ANSYS



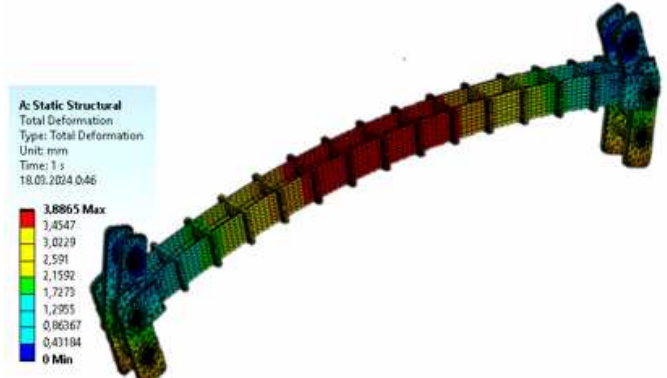
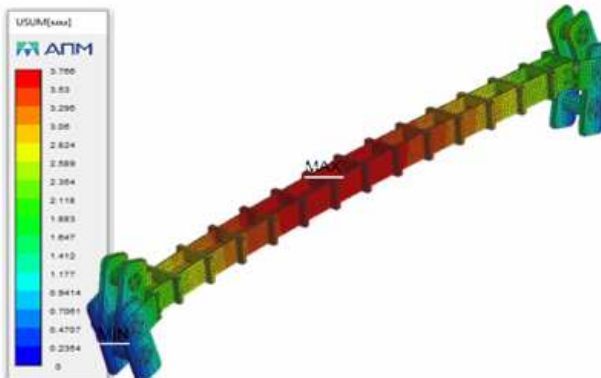
а



б



в



г

Рис. 1. Карта результатов оценки НДС: а – граничные условия, б – сетка КЭ, в – напряжения по Мизесу, г – деформация

Таким образом, была проведена верификация модели через сравнения результатов расчета НДС траверсы методом конечных элементов с ее аналитическим расчетом по правилам строительной механики.

Оптимизация топологии конструкции траверсы проводилась в программном комплексе ANSYS. Были выбраны области, которые будут подвержены оптимизации: стержень и крепления траверсы, за исключением пальцев. Также были заложены условия оптимизации модели через функцию «Ограничения Реакции» (Response Constraint), а именно: ограничения по уменьшению массы – 40% и по локальным нагрузкам – 230 МПа (предел текучести материала Ст 3). Ограничения необходимы для того, чтобы обеспечить прочность конструкции после уменьшения ее массы.

На рисунке 2 представлена первичная топологическая оптимизация траверсы.



Рис. 2. Результаты оптимизации

По результатам оптимизации удалось уменьшить массу на 1298 кг.

Таким образом, была проведена первичная топологическая оптимизация конструкции траверсы. В дальнейшем планируется создание перфорированной стенки стержня для уменьшения веса и габаритов модели на основе результатов оптимизации.

Список литературы

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Минстрой России, 2016. – 105 с.
2. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 11-23-81*. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 173 с.
3. Матвеев В.В. Примеры расчета такелажной оснастки: Учеб. пособие для учащихся монтажных техникумов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1979. – 320 с.
4. ОСТ 36-128-85 Устройства и приспособления монтажные. Методы расчета и проектирования. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 103 с.
5. Чаржова К.Ю., Демченко М.В. Оценка напряженно-деформированного состояния траверсы для монтажа вертикального оборудования // Актуальные проблемы науки и техники-2023: сб. материалов XVI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, г. Уфа, 27-31 марта 2023 г.: в 2 т.– Уфа: УГНТУ, 2023. – Т. 2. – С. 63-66.
6. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкции и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.

Сведения об авторах:

Чаржова Карина Юрьевна – магистрант;

Демченко Мария Вячеславовна – к.т.н., доцент кафедры «Технологические машины и оборудование».

Научное периодическое издание

Машиностроение: инновационные аспекты развития:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№ 7

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 5,70.

Подписано в печать 29.03.24г. Заказ №24-07.

<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2024-7>

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: spbf@srcms.ru