



Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Омский государственный университет
путей сообщения

Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств

Омск 2021

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Омский государственный университет путей сообщения



**«ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ И ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ»**

Материалы четвертой всероссийской
научно-технической конференции
(22 октября 2021 г.)

УДК 621
ББК 34в06
И66

Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств:
Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2021. 194 с.

В октябре 2021 года в Омском государственном университете путей сообщения прошла четвертая всероссийская научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств».

В конференции приняли участие обучающиеся и сотрудники ОмГУПСа и других вузов России, Республики Узбекистан, Республики Беларусь.

В сборник вошли статьи, в которых рассмотрены основные совершенствования технологий машиностроительных производств, включая технологическое проектирование, получение и использование инновационных материалов и технологий, управление системами и процессами, математическое моделирование.

Материалы конференции могут быть полезны для студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых, научных сотрудников и специалистов, работающих в области машиностроения.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Библиогр.: 143 назв. Табл. 10. Рис. 68.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук, доцент С. Г. Шантаренко (отв. редактор);

доктор техн. наук, профессор В. В. Харламов;

доктор техн. наук, профессор А. Ю. Попов;

кандидат техн. наук Е. В. Пономарев.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор А. П. Моргунов;

доктор техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

В. А. Аксенов.

ISBN 978-5-949-41288-6

© Омский гос. университет
путей сообщения, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Обрывалин А. В., Супчинский О. П., Сутковая О. А. Повышение эффективности контроля межцентровых расстояний отверстий	5
Муравьев Д. В., Измestьева Е. О. Оптимизация технологического процесса гальванического цинкования деталей тяговых механизмов.....	15
Капустьян М. Ф., Буркут Г. С. Анализ дефектов кузова грузового полувагона и пути снижения их количества	28
Белан Д. Ю., Кофанова Л. Ю. Разработка конструкторских и технологических решений в области обеспечения качества метрологического обеспечения технологического процесса ремонта автосцепного устройства пассажирского вагона	38
Петроченко С. В., Абляимов О. С., Кодиров Н. С., Рахмаев Р. И. Определение оптимальных режимов электроэрозионной обработки замковых пазов детали «диск» малогабаритного двухконтурного турбореактивного двигателя	48
Аверков К. В., Уракова Д. В., Кочура В. С., Бунькова Т. Г. Анализ возможности использования аддитивных технологий при изготовлении корпусных деталей	56
Шкодун П. К. Совершенствование методики контроля качества ремонта коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава.....	67
Ларин Е. С. Система управления привода продорожки коллектора тягового двигателя	76
Бисерикан М. И., Кашбулина А. Ш. Совершенствование лезвийной обработки материалов с усталостными и термомеханическими дефектами	83
Соколов П. С., Попов Д. И. Разработка подхода к проектированию электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин.....	93
Макаров Ю. И., Плешаков С. М., Верисокина А. А., Верисокина М. А. Обзор требований, предъявляемых к машиностроительной продукции, и оценка соответствия с целью контроля качества продукции.....	100
Кутень М. М. Акустическая эмиссия, возникающая в стальных объектах трубопроводного транспорта, при статическом нагружении.....	105
Скворцов О. Б., Сташенко В. И., Троицкий О. А. Вибрационные процессы в металлических проводниках при воздействии импульсных электрических токов.....	113
Шарков О. В., Пацкан В. П. Анализ возможности использования мехатронных комплексов для имитационного моделирования машиностроительных процессов.....	121
Жигар В. И. Повышение производительности эксплуатируемых звеносборочных линий.....	128
Жигар В. И., Моисеенко В. Л. Программа расчета укорочений звеньев железнодорожного пути и порядка их укладки.....	136
Харитонов, А. С. Штрапенин Г. Л. Автоматизированный учет выработки сотрудников на рабочих местах для автоагрегатного предприятия.....	142

Бобров А. Л., Волобуев Д. В. К вопросу совершенствования мониторинга технического состояния грузовых вагонов	149
Еловенко Д. А., Минаев Ф. М. Моделирование технологического процесса формообразования многослойной цилиндрической конструкции и оценка остаточных напряжений. Обзор подходов и методов	155
Муртазалиев Г. М., Айдемиров К. Р., Омаров Ш. А., Пайзулаев М. М., Муртузов М. М. Математическое моделирование энергосиловых параметров магнитно-эластоимпульсной формовки	165
Скворцов О. Б. Аддитивные высокочастотные вибрации и синергичность усталостной прочности.....	172
Клюка В. П., Мосол С. А., Курманов А. М. К вопросу разработки устройства зарядки и опробования тормозов поезда с функциями их диагностики и мониторинга в пути следования на базе использования кранов дистанционного управления тормозами № 130 и микропроцессорных систем управления современными локомотивами	181

А. В. Обрывалин, О. П. Супчинский, О. А. Сутковая
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ МЕЖЦЕНТРОВЫХ РАССТОЯНИЙ ОТВЕРСТИЙ

В статье выполнен анализ существующих способов и средств измерений межосевых расстояний отверстий в деталях машин и оценена погрешность измерений при их применении в технологическом процессе изготовления изделий, разработан способ и схема измерения межосевых расстояний отверстий в деталях машин с обоснованием норм точности, определены оптимальные размеры конических измерительных элементов и градуационные размеры контролируемых отверстий.

Ключевые слова: средство измерения, погрешность измерения, контрольная операция, межцентровые расстояния отверстий.

Aleksey V. Obryvalin, Oleg P. Supchinsky, Olga A. Sutkovay
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

INCREASING THE EFFICIENCY OF INSPECTION OF INTERCENTER DISTANCES OF HOLES

The article analyzes the existing methods and instruments for measuring the center distance of holes in machine parts and estimates the measurement error when they are used in the technological process of manufacturing products, developed a method and scheme for measuring the center distance of holes in machine parts with justification of accuracy standards, determined the optimal dimensions of tapered measuring elements and gradation sizes of the controlled holes.

Keywords: measuring instrument, measurement error, control operation, center-to-center distances of holes.

В настоящее время к деталям машин предъявляются достаточно высокие требования по точности и качеству изготовления, особенно в авиационной и ракетно-космической промышленности, представляющих собой одну из наиболее технически развитых отраслей машиностроения. Производство

высококачественной авиационной и ракетно-космической продукции является важной военно-экономической задачей. В результате чего между производителями данной продукции не прерывно растет конкуренция, что приводит к поиску наиболее производительных способов ее изготовления [1].

Качество и производительность изготавливаемой продукции машиностроительных предприятий во много зависит от эффективности проведения технического контроля, который неотрывно связан с технологическим процессом механической обработки деталей. Поэтому повышение эффективности проведения технического контроля изготавливаемых изделий, является актуальной задачей [2].

При проведении операций промежуточного и выходного контроля в ходе выполнения технологического процесса изготовления детали проверяются форма, размеры и качество поверхности на предмет соответствия указанных параметров требованиям операционных эскизов или чертежа.

В соответствие с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 под точностью измерений следует понимать степень близости результата измерений к принятому опорному значению [3].

Принятое опорное значение – это значение, которое служит в качестве согласованного для сравнения и получено как:

1) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

2) приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;

3) согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы;

4) математическое ожидание измеряемой характеристики, то есть среднее значение заданной совокупности результатов измерений – лишь в случае, когда 1), 2) и 3) недоступны (ИСО 3534-1) [4].

В отечественной метрологии погрешность результатов измерений, как правило, определяется сравнением результата измерений с истинным или действительным значением измеряемой физической величины (являющимися фактически эталонными значениями измеряемых величин, выраженными в узаконенных единицах).

Точность измерений зависит от следующих факторов, связанных с измерительным процессом, таких как: объект измерения, субъект измерения (оператор), метод (способ) измерения, средство измерений, условия измерений [5].

Объект измерения должен быть достаточно изучен и сформирована его модель, степень детализации которой (глубина изучения объекта измерения) должна быть адекватна цели измерения.

Субъект измерения (контролер) вносит в измерительный процесс субъективизм, который, по возможности, должен быть уменьшен. Субъективизм оператора зависит от его квалификации, психофизиологического состояния, комфортности (санитарно-гигиенических) условий труда и многого другого, что может оказывать существенное влияние на точность измерений [6].

Используемые методы и способы измерений оказывают существенное влияние на точность измерений. Зачастую измерения одной и той же величины разными способами дают совершенно различные результаты.

При выборе средств измерений должны руководствоваться целью измерительного процесса и условиями его проведения, так как любое средство измерений имеет ограниченную точность.

Одним из контролируемых размеров при изготовлении деталей машин является межцентровое расстояние отверстий. От точности измерения данного параметра во многом зависит в конечном итоге качество сборки узла в целом.

На сегодняшний день в условиях единичного и мелкосерийного производства для измерений межцентровых расстояний отверстий применяются следующие способы [7]:

кронциркулем и линейкой;

непосредственно штангенциркулем по схеме, приведенной на рисунке 1;

штангенциркулем с применением сменных калиброванных втулок и валиков по схеме, приведенной на рисунке 2.

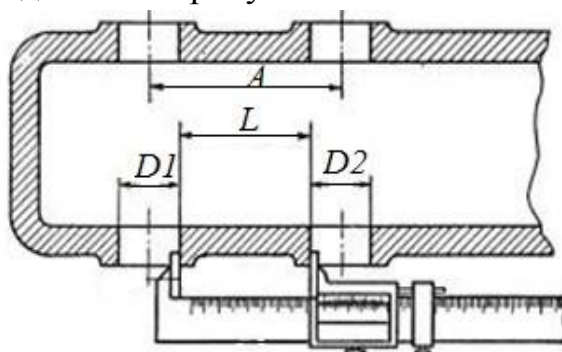


Рисунок 1 – Схема измерения межцентрового расстояния штангенциркулем

Указанные способы являются косвенными и требуют расчета для определения межцентрового расстояния отверстий (размера A) по формулам (1) для способа, приведенного на рисунке 1, и (2) или (3) для способа, приведенного на рисунке 2.

$$A = L + \frac{D1}{2} + \frac{D2}{2}, \quad (1)$$

где $D1$ – диаметр первого отверстия, мм;

$D2$ – диаметр второго отверстия, мм;

L – минимальное расстояние между образующими отверстий, мм.

$$A = L_2 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2}, \quad (2)$$

где d_1 – диаметр калиброванного валика, мм;

d_2 – диаметр калиброванного валика, мм;

L_2 – максимальное расстояние между образующими валиков, мм.

$$A = L_1 + \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}, \quad (3)$$

где L_1 – минимальное расстояние между образующими валиков, мм.

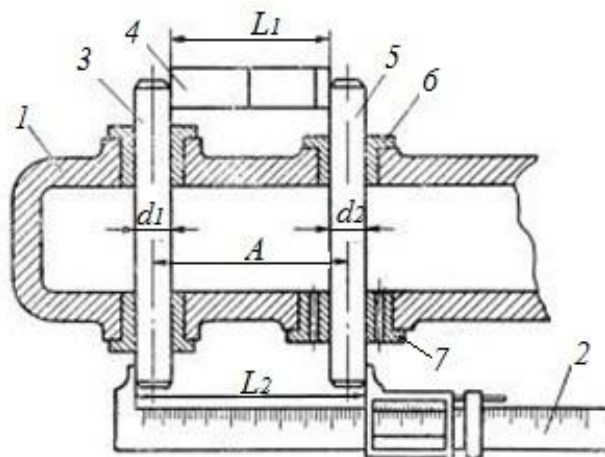


Рисунок 2 – Схема измерения межосевого расстояния штангенциркулем с применением сменных калиброванных втулок и валиков:

1 – контролируемая деталь; 2 – штангенциркуль; 3,5 – калиброванные валики;

4 – мера концевая; 6,7 – калиброванные валики

Указанные выше способы применяются при измерении межцентровых расстояний отверстий при точности измерений в пределах 0,05 – 0,08 мм.

Преимущество данных способов в том, что не требуется специальных средств измерений.

Недостатки: сложность процесса проведения измерения; высокая трудоемкость; увеличивается количество звеньев размерной цепи; увеличивается количество измерительных элементов, что удорожает операцию контроля; необходимость производить расчет контролируемого размера А.

Кроме того, при указанных способах контроля значительно проявляется субъективизм измерительного процесса, который приводит к возникновению погрешностей измерений.

Под погрешностью измерений понимают отклонение измеренного значения величины от её истинного (действительного) значения. Погрешность измерения является характеристикой точности измерения [8].

Выяснить с абсолютной точностью истинное значение измеряемой величины, как правило, невозможно, поэтому невозможно и указать величину отклонения измеренного значения от истинного. Это отклонение принято называть ошибкой измерения.

Погрешности классифицируют следующим образом [8]:

- по форме представления;
- по причине возникновения;
- по характеру проявления;
- по способу измерения;
- по зависимости от инерционности прибора;
- по зависимости от входной величины.

Особое внимание следует уделять категории погрешностей по причине возникновения, которые подразделяются на:

инструментальные / приборные погрешности – погрешности, которые определяются погрешностями применяемых средств измерений и вызываются несовершенством принципа действия, неточностью градуировки шкалы, не наглядностью прибора;

теоретические – погрешности, возникающие из-за неверных теоретических предпосылок при измерениях;

методические погрешности – погрешности, обусловленные несовершенством метода, а также упрощениями, положенными в основу методики;

субъективные / операторные / личные погрешности – погрешности, обусловленные степенью внимательности, сосредоточенности, подготовленности и другими качествами оператора [8].

Наиболее значимой и вероятной погрешностью при измерении межцентровых расстояний отверстий штангенциркулем является погрешность, возникающая в результате неверного приложения измерительных губок инструмента к контактным точкам измеряемого размера. Это приводит к повороту оси инструмента относительно измерительной оси на определенную величину. Для определения погрешности измерения межцентрового расстояния отверстий непосредственно штангенциркулем, разработана расчетная схема, приведенная на рисунке 3.

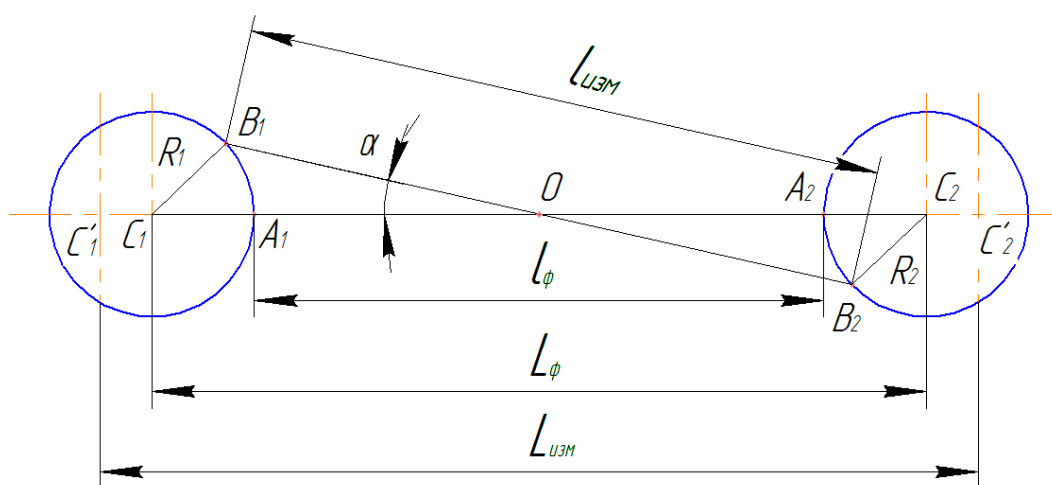


Рисунок 3 – Расчетная схема погрешности измерений межцентрового расстояния отверстий непосредственно штангенциркулем

Ее анализ и решение с применением теоремы синусов и косинусов для двух произвольных треугольников OB_1C_1 и OB_2C_2 , позволили получить формулу для определения величины погрешности измерения (формула справедлива для двух отверстий одинакового диаметра, при этом $R_1 = R_2 = R$):

$$\Delta_{изм} = 2\sqrt{2R^2 + 2Rl_\phi + l_\phi^2 - 2R^2 \cos(180^\circ - \alpha - \arcsin a \frac{(R + l_\phi)}{R} \sin \alpha)} - L_\phi, \quad (4)$$

где R – радиус окружности, мм;

l_ϕ – фактическое расстояние между измерительными точками, образующих окружности, мм;

L_ϕ – фактическое межосевое расстояние отверстий, мм.

В качестве примера формирования и определения величины погрешности рассмотрен случай измерения межцентрового расстояния двух отверстий диаметром 20 мм при изменении угла α в диапазоне от 0 до 5° и фактическом межцентровом расстоянии 100 мм. Результаты расчетов величины погрешности измерения, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета величины погрешности измерения
межцентрового расстояния двух отверстий

Угол смещения оси инструмента от измерительной оси, градус	Погрешность измерения, мм
0	0
1	0,06
2	0,25
3	0,55
4	1,0
5	1,6

Полученные результаты позволили построить график изменения величины погрешности измерения межцентрового расстояния двух отверстий диаметром 20 мм и фактическом межосевом расстоянии 100 мм в зависимости от изменения угла α в диапазоне от 0 до 5° (рисунок 4).

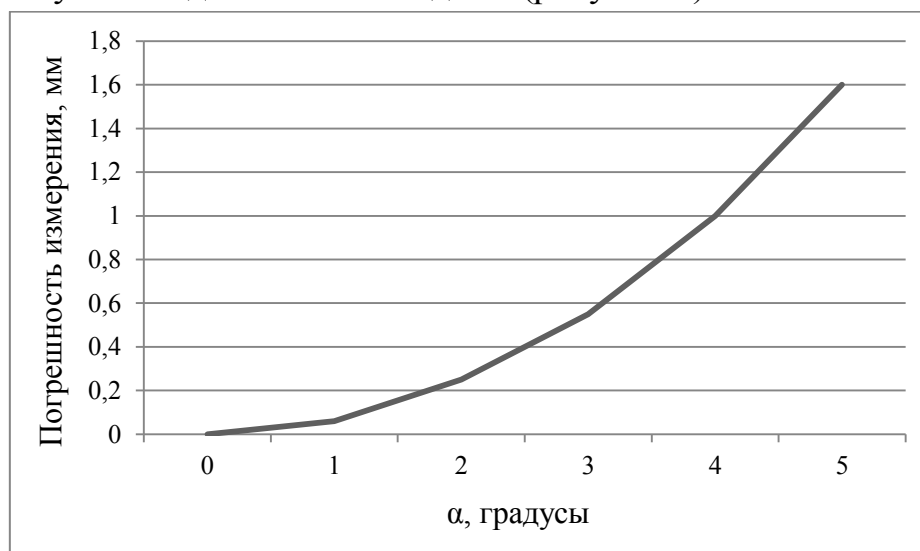


Рисунок 4 – График изменения величины погрешности измерения межцентрового расстояния двух отверстий диаметром 20 мм при изменении угла α в диапазоне от 0 до 5° и фактическом межосевом расстоянии 100 мм

Из графика видно, что при несовпадении измерительной оси и оси инструмента при выполнении измерения межцентрового расстояния отверстий более, чем на один градус, уже возникает погрешность измерения и принимает значение более 0,1 мм, а если несовпадение осей достигает значения в пять градусов, то величина погрешности составит более 1,6 мм.

Для оптимизации измерений межцентровых расстояний отверстий в деталях машин путем повышения их точности и производительности за счет минимизации влияния субъективного фактора и исключения необходимости проведения расчетов для определения величины межосевого расстояния, разработан способ измерений типовая схема, которого приведена на рисунке 5.

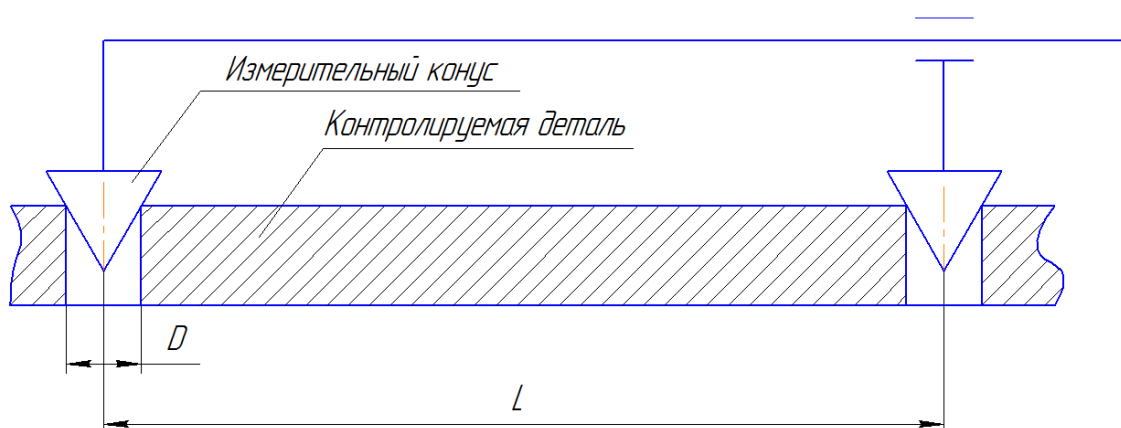


Рисунок 5 – Схема измерений межцентрового расстояния отверстий

Он заключается в непосредственном измерении межосевого расстояния отверстий штангенциркулем с коническими измерительными элементами (губки штангенциркуля).

Графоаналитическое моделирование в среде КОМПАС позволило определить градационные размеры отверстий и размеры конических измерительных элементов, которые приведены на рисунке 6.

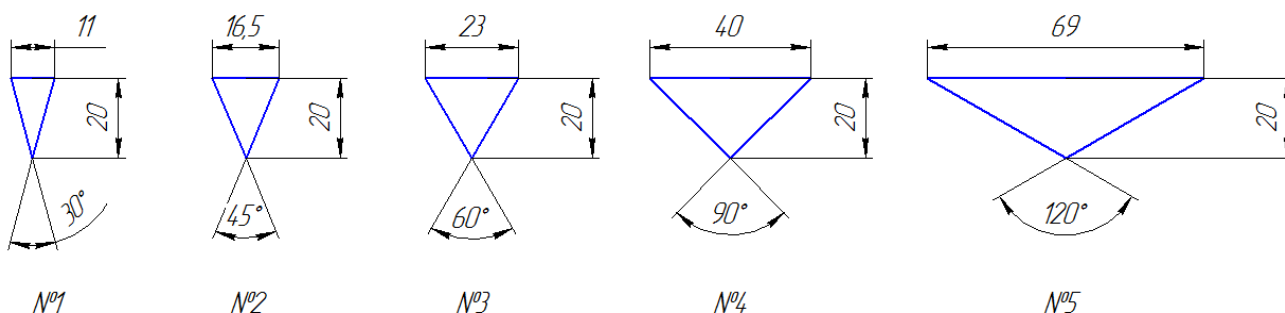


Рисунок 6 – Размеры конических измерительных элементов

Наиболее оптимальными являются конуса под номерами №№3 – 5 так, как обеспечивают наибольший диапазон измерений по сравнению с номерами №№1,2.

Измерительный конус №3 рекомендуется использовать при измерении межосевых расстояний отверстий диаметром от 2 – 20 мм и межосевом расстоянии по чертежу не менее 20 мм.

Измерительный конус №4 рекомендуется использовать при измерении межосевых расстояний отверстий диаметром от 2 – 40 мм и межосевом расстоянии по чертежу не менее 40 мм.

Измерительный конус №5 рекомендуется использовать при измерении межосевых расстояний отверстий диаметром от 2 – 65 мм и межосевом расстоянии по чертежу не менее 65 мм.

Применением указанных технических решений позволит снизить погрешности измерений межцентровых расстояний отверстий, а также сократить затраты времени на проведение технического контроля за счет исключения процедуры расчета значения межосевого расстояния.

Список литературы

1. Беляков, Н. Н. Система контроля выполнения технологических процессов изготовления литых заготовок в ТНА. / Н. Н. Беляков, П. В. Анциферов. – Текст : непосредственный / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Том 1. №14. – С. 409-410.

2. Васин, А. Н. Влияние припуска на точность изготовления деталей машин / А. Н. Васин. – Текст : непосредственный / Вестник науки и образования северо-запада России. – 2015. – Том 1. №1. – С. 1-5.

3. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.

4. ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей.

5. МИ 1317-2004. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

6. Миронов, Э. Г. Метрология и технические измерения: учебное пособие/ Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – Екатеринбург : УГТУ, 2005. – 299 с. – Текст : непосредственный.

7. Тартаровский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов / Д. Ф. Тартаровский, А. С. Ястребов. – Москва : Высшая школа, 2002. – 350 с. – – Текст : непосредственный.

8. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Обрывалин Алексей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: av.obr@yandex.ru

Супчинский Олег Павлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: sunchinyan@mail.ru

Сутковская Ольга Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Студент ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: ttmirps@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Obryvalin Aleksey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
«Technology of transport engineering and repair
of rolling stock» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: av.obr@yandex.ru

Supchinsky Oleg Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
«Technology of transport engineering and repair
of rolling stock» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: sunchinyan@mail.ru

Sutkovay Olga Aleksandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Student OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-18.
E-mail: ttmirps@gmail.com

Д. В. Муравьев¹, Е. О. Измestьева²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация,

²ООО «ПКФ-Сиблифт», г. Омск, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦИНКОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЯГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса гальванического цинкования детали «тяга», которая входит в конструкцию противовеса лифта. Проведенные исследования направлены на поиск оптимальных режимов цинкования для получения покрытия повышенной прочности и коррозионной стойкости с целью улучшения эксплуатационной надежности деталей, работающих в условиях негативного воздействия окружающей среды. В ходе научной работы на основе теории планирования эксперимента был проведен полный факторный эксперимент, в котором в качестве параметра оптимизации рассматривалась толщина цинкового покрытия детали и влияние на нее таких факторов, как время цинкования и плотность тока. Результаты эксперимента позволили определить оптимальные значения выбранных факторов для обеспечения требуемой по нормативной документации толщины цинкового покрытия при изготовлении детали «тяга» в условиях действующего производства.

Ключевые слова: цинкование, коррозия, плотность тока, покрытие, толщина, деталь, температура, электролит, эксперимент, оптимизация, технологический процесс.

Dmitry V. Muraviev¹, Ekaterina O. Izmet'eva²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²PKF-Sibliff LLC, Omsk, the Russian Federation

OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF GALVANIC ZINC PLATING OF TRACTION MECHANISM PARTS

The article presents the results of an experimental study of the galvanic galvanizing process of the "traction" part, which is included in the design of the lift counterweight. The conducted research is aimed at finding the optimal galvanizing modes for obtaining a coating of increased strength and corrosion resistance in order to improve the operational reliability of parts operating in conditions of negative environmental impact. In the course of scientific work, based on the theory

of experimental planning, a full factorial experiment was carried out, in which the thickness of the zinc coating of the part and the influence on it of such factors as the galvanizing time and current density were considered as an optimization parameter. The results of the experiment made it possible to determine the optimal values of the selected factors to ensure the thickness of the zinc coating required by the normative documentation in the manufacture of the “thrust” part under the conditions of the existing production.

Keywords: galvanizing, corrosion, current density, coating, thickness, part, temperature, electrolyte, experiment, optimization, technological process.

Долговечность деталей, объединённых в единую конструкцию, определяется не только качеством их изготовления, но и эксплуатационными свойствами рабочей среды, поэтому надёжность деталей во многом зависит от интенсивности развития коррозии. Особенно сильно проявляя себя при повышенных механических и температурных напряжениях, коррозионные процессы наносят существенный ущерб стальным конструкциям, поскольку вследствие коррозии они теряют требуемую пластичность, прочность, герметичность, тепло- и электропроводность, отражательную способность и другие важные свойства.

Методом экспертных оценок установлено, что не менее 15% годового объема производства стали расходуется на замену корродированного металла. При этом безвозвратно теряется металл в виде изделий и сооружений, стоимость которых значительно превышает стоимость исходного металла. Убытки от коррозии составляют 5-10 % национального дохода во всех промышленно развитых странах.

Потери от коррозии ежегодно увеличиваются, в том числе в связи с загрязнением окружающей среды. Анализ последствий, вызванных отходами, загрязняющими окружающую среду, показывает, что те же самые вредные вещества, которые опасно влияют на экологическое равновесие в природе, вызывают и коррозию металлов. Так, например, атмосфера интенсивно загрязняется эмиссией различных газов, пыли, дыма. Наряду с вопросами рационального использования материальных ресурсов, создания экономически эффективных технологических процессов, охрана окружающей среды остается одной из актуальных проблем современности.

Таким образом, в ходе анализа априорной информации была сформулирована основная цель исследования: необходимость

совершенствования технологии нанесения цинковых покрытий при изготовлении деталей для снижения скорости развития коррозии.

В качестве объекта исследования была рассмотрена технология гальванического цинкования детали «тяга», которая входит в узел подвески для каната балки противовеса лифта. Противовес предназначен для уравнивания массы кабины и частично массы перемещаемого груза, что позволяет уменьшить мощность приводного электродвигателя.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые проведено исследование технологии гальванического цинкования детали «Тяга» завода-изготовителя ООО «ПКФ Сиблифт» в г. Омске с использованием методов планирования промышленного эксперимента с целью оптимизации режимов нанесения цинкового покрытия.

Теоретическая и практическая значимость выполнения исследования заключается в использовании полученных результатов для совершенствования технологического процесса гальванического цинкования детали «тяга» в условиях производства на предприятии-изготовителе.

Деталь «тяга» должна сохранять свои параметры в пределах норм, в течение срока службы при воздействии таких климатических факторов, как:

- воздействие кислорода на металл, способствующее его окислению;
- высокая влажность воздуха, ведущая к коррозии металла;
- высокая загрязненность воздуха, провоцирующая деструкцию металла.

Материалом для изготовления объекта производства является сталь 20, химический состав которой сбалансирован. Однако содержащиеся в составе стали никель (до 0,3%), хром (до 0,2%) и медь (до 0,3%) в целом положительно влияя на механические свойства стали, не оказывают существенного повышения коррозионной стойкости сплава ввиду малой концентрации. Таким образом, для усиления сопротивляемости стали 20 воздействию коррозии в технологический процесс изготовления детали «тяга» включена операция гальванического цинкования.

Цинковое покрытие является анодным по отношению к черным сплавам и защищает сталь от коррозии электрохимически при температурах до 70 °С, а при более высоких температурах – механически. Помимо этого, цинк в сравнении с другими металлами мало токсичен для человека.

При гальванической обработке в качестве контролируемого параметра оптимизации электролитического процесса была выбрана толщина цинкового

покрытия, которую возможно можно регулировать в диапазоне от 3 до 40 мкм путем изменения различных технологических параметров, таких как:

- сила тока в амперах;
- плотность тока;
- рабочая температура электролита;
- концентрация активных составляющих рабочего раствора.

При гальваническом цинковании состав и температура электролита при заданной плотности тока напрямую влияют на скорость осаждения и структуру цинкового покрытия.

Выбор и обеспечение в процессе цинкования неоптимальных значений времени выдержки, температуры рабочего раствора и плотности тока приводят к возникновению дефектов цинкового покрытия, среди которых выделяют:

1) Недостаточная адгезия на поверхности детали «тяги» (рисунок 1, а).

Отслаивание и непрочность цинкового покрытия в основном связаны с низким качеством подготовки жирной поверхности. Кроме того, причиной адгезии может быть неточное время выдержки детали в растворе электролита.

2) Питтинг на поверхности (рисунок 1, б).



а)



б)

Рисунок 1 – Дефекты цинкового покрытия детали «тяги»:

а) недостаточная адгезия; б) питтинг на детали «тяги»

3) Шероховатость на ребрах детали.

4) Разнотипность внешнего вида покрытия.

5) Хрупкость цинкового покрытия.

6) Темный (преимущественно коричневатый или чёрный) цвет – возникает при загрязнении электролитической ванны и превышении допустимого количества отходов.

Дефекты возникают от различных причин, среди которых:

- недостатки в подготовке поверхности перед нанесением цинка;
- нарушения в технологии изготовления электролита;
- несоблюдение рабочих параметров гальванического процесса.

Помимо всего вышесказанного, на качество цинкования влияет конфигурация и пространственная ориентация детали в электролите, а также размещение и состояние плоскостей основных и вспомогательных анодов.

Дефекты приводят к разрушению целостности цинкового покрытия детали «тяга», ухудшению защитных свойств и к возникновению коррозии.

Вследствие действия межкристаллитной коррозии металлические детали теряют требуемую прочность, герметичность, тепло- и электропроводность, отражательную способность и другие важные свойства.

Анализ возникающих в процессе изготовления детали «тяга» дефектов цинкового покрытия выявил необходимость экспериментального обоснования оптимальных режимов нанесения цинкового покрытия методом гальванизации, способствующих повышению качества цинкования.

С этой целью на производстве был спланирован и проведен промышленный полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа $N = 2^2$, предполагающий постановку четырех основных опытов. В качестве параметра оптимизации y была выбрана толщина цинкового покрытия h , мкм, а в качестве факторов, влияющих на данный параметр: x_1 – время цинкования T , мин; x_2 – плотность рабочего тока j , А/дм².

С учетом производственных условий и на основе анализа априорной информации были определены уровни факторов x_1 и x_2 для варьирования в процессе эксперимента, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименования факторов и уровни их варьирования

№ п/п	Факторы			
	Время цинкования T , мин		Плотность рабочего тока j , А/дм ²	
	натуральное значение	кодированное значение	натуральное значение	кодированное значение
Интервал варьирования	5	Δx_1	1	Δx_2
Основной уровень	10	0	2	0
Верхний уровень	15	+1	3	+1
Нижний уровень	5	-1	1	-1

Оптимизация толщины цинкового покрытия проводилась на основании оценки параметров математической модели исследуемого технологического процесса, которая была разработана по результатам полного факторного эксперимента для двух факторов x_1 и x_2 в кодированных значениях, и в общем виде представляет собой алгебраический полином второй степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1)$$

где b_0, b_1, b_2, b_{12} – оценки коэффициентов математической модели первого порядка (коэффициентов регрессии).

Для определения числовых значений коэффициентов искомой математической модели и с учетом выбранных уровней факторов была составлена матрица планирования ПФЭ, содержащая условия проведения опытов и представленная в табл. 2, на основании которых был проведен эксперимент при всех возможных сочетаниях уровней факторов.

Электрохимический процесс осаждения цинка на детали «тяга», подключенной к отрицательному полюсу источника питания, проводился в растворе сернокислого и хлористого цинка, а также фторбората цинка.

Толщина покрытия измерялась при измененных параметрах электролитического процесса толщиномером Etari ET555, принцип работы которого основан как на магнитной индукции, так и на эффекте Холла, позволяющем проводить измерения плотности магнитного поля.

Таблица 2

Матрица планирования полного факторного эксперимента типа $N = 2^2$

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y_{1j}	y_{2j}	y_{3j}	\bar{y}_j	S_y^2	\hat{y}_j
1	+	+	+	+	17	18	19	18	1	18
2	+	–	+	–	11	11	12	11,3	0,335	11,3
3	+	+	–	–	10	12	15	12,3	6,335	12,3
4	+	–	–	+	10	11	12	11	1	11
b	b_0	b_1	b_2	b_{12}						
	13,15	2	1,5	1,35						

Деталь «тяга» без визуальных дефектов до и после экспериментального гальванического цинкования представлена на рисунке 2.

Воспроизводимость опытов оценивалась по результатам трех параллельных опытов y_{1j}, y_{2j}, y_{3j} при проверке однородности дисперсий S_{yj} (2) по критерию Кохрена.

Оценка дисперсии n параллельных опытов для каждой i -й точки факторного пространства определялась по формуле:

$$S_{yi}^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_{ti} - \bar{y}_i)^2}{n - 1}, \quad (2)$$

где y_{ti} – значение параметра оптимизации для i -й вектор-строки матрицы планирования в t -м параллельном опыте;
 t – номер параллельного опыта, $t = 1, \dots, n$;
 n – число параллельных опытов.



Рисунок 2 – Деталь «тяга» до и после гальванического цинкования

Гипотезу о воспроизводимости опытов проверяют с помощью критерия Кохрена, расчетное значение которого вычисляли по формуле:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{y_{\text{max}}}^2}{\sum_{i=1}^4 S_{yi}^2} = 0,731. \quad (3)$$

Сравнение расчетного значения $G_{\text{расч}}$ критерия Кохрена с табличным значением $G_{\text{расч}}$ для выбранного уровня значимости, равным 0,77, подтвердило гипотезу о воспроизводимости опытов, поскольку $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$.

Таким образом, было установлено, что выбор факторов и уровней их варьирования выполнен правильно.

Расчет значений искомых коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_{12} математической модели был выполнен с использованием формул:

$$b_0 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{0j} \bar{y}_j; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{ij} \bar{y}_j; \quad (5)$$

$$b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_{ij} x_{lj} \bar{y}_j, \quad (6)$$

где x_{ij}, x_{lj} – кодированное значение i -го и l -го фактора в j -м опыте;

x_{0j} – кодированное значение фиктивного фактора, соответствующего коэффициенту b_0 , в j -м опыте эксперимента.

В результате проведенных расчетов (см. табл. 2) была получена промежуточная математическая модель исследуемого технологического процесса в кодированных значениях факторов x_1 и x_2

$$y = 13,15 + 2x_1 + 1,5x_2 + 1,35x_{12}. \quad (7)$$

Оценка дисперсии воспроизводимости эксперимента S_y (дисперсии параметра оптимизации) рассчитывалась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^4 S_{yj}^2}{N} = \frac{8,67}{4} = 2,1675. \quad (8)$$

Проверка значимости коэффициентов полученной математической модели проводилась по t -критерию Стьюдента построением доверительного интервала коэффициентов.

Прежде всего, была рассчитана дисперсия коэффициента регрессии S_{bi} по следующей формуле:

$$S_{bi}^2 = S_{bil}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N} = \frac{2,1675}{3 \cdot 4} = 0,1806. \quad (9)$$

Далее строился доверительный интервал коэффициентов b_i и b_{il} :

$$\Delta b_{il} = \Delta b_{il} = \pm t_{\text{табл}} S_{bi} = \pm 2,306 \cdot 0,425 = \pm 0,9801. \quad (10)$$

где $t_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Стьюдента, выбирается в зависимости от числа степеней свободы, с которым определялось значение S_y , и выбранного уровня значимости α ;

S_{bi} – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

$$S_{bi} = + \sqrt{S_{bi}^2}. \quad (11)$$

Все коэффициенты уравнения регрессии (7) считаются значимыми, поскольку их абсолютная величина больше доверительного интервала.

Проверка адекватности полученного неполного квадратичного уравнения регрессии проводилась с помощью критерия Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2}, \quad (12)$$

где $S_{\text{ад}}^2$ – оценки дисперсии адекватности полученной математической модели.

Оценка дисперсии адекватности математической модели определялась по следующей формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n}{N - (k + 1)} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 =$$

$$= \frac{3((18 - 18)^2 + (11,3 - 11,3)^2 + (12,3 - 12,3)^2 + (11 - 11)^2)}{4 - (2 + 1)} = 0, \quad (13)$$

где \hat{y}_j – предсказанное значение функции отклика по проверяемой математической модели в каждой j -й вектор-строке матрицы ПФЭ.

По формуле (12) было установлено, что

$$F_{\text{расч}} = \frac{0}{2,1675} = 0.$$

Таким образом, гипотеза об адекватности математической модели была принята, поскольку $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, где $F_{\text{табл}} = 4,46$.

После расчёта и построения математической модели в кодированных значениях факторов x_1 и x_2 , был выполнен переход от кодированной к натуральной форме записи факторов в соответствии с выражением

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (14)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора;

\tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора (в единицах измерения);

\tilde{x}_{i0} – натуральное значение «нулевого» уровня i -го фактора;

Δx_i – интервал варьирования натурального значения i -го фактора, задающий значения верхнего и нижнего уровней фактора.

Таким образом, были получены формулы для перехода к натуральной форме записи факторов x_1 , x_2 , влияющих на величину параметра оптимизации y

$$x_1 = \frac{T - \tilde{x}_{10}}{\Delta x_1} = \frac{T - 10}{5}; \quad (15) \quad x_2 = \frac{j - \tilde{x}_{20}}{\Delta x_2} = \frac{j - 2}{1}. \quad (16)$$

После преобразования математическая модель приняла вид

$$h = 11,55 - 0,14T - 1,2j + 0,27jT. \quad (17)$$

Полученная математическая модель (17) предоставила возможность построить график зависимости толщины цинкового покрытия h от рабочих параметров режима гальванического цинкования: времени цинкования T и плотности рабочего тока j , представленный на рисунке 3, а кроме того, позволила прогнозировать значения толщины покрытия при значениях факторов, которые не изучались экспериментально.

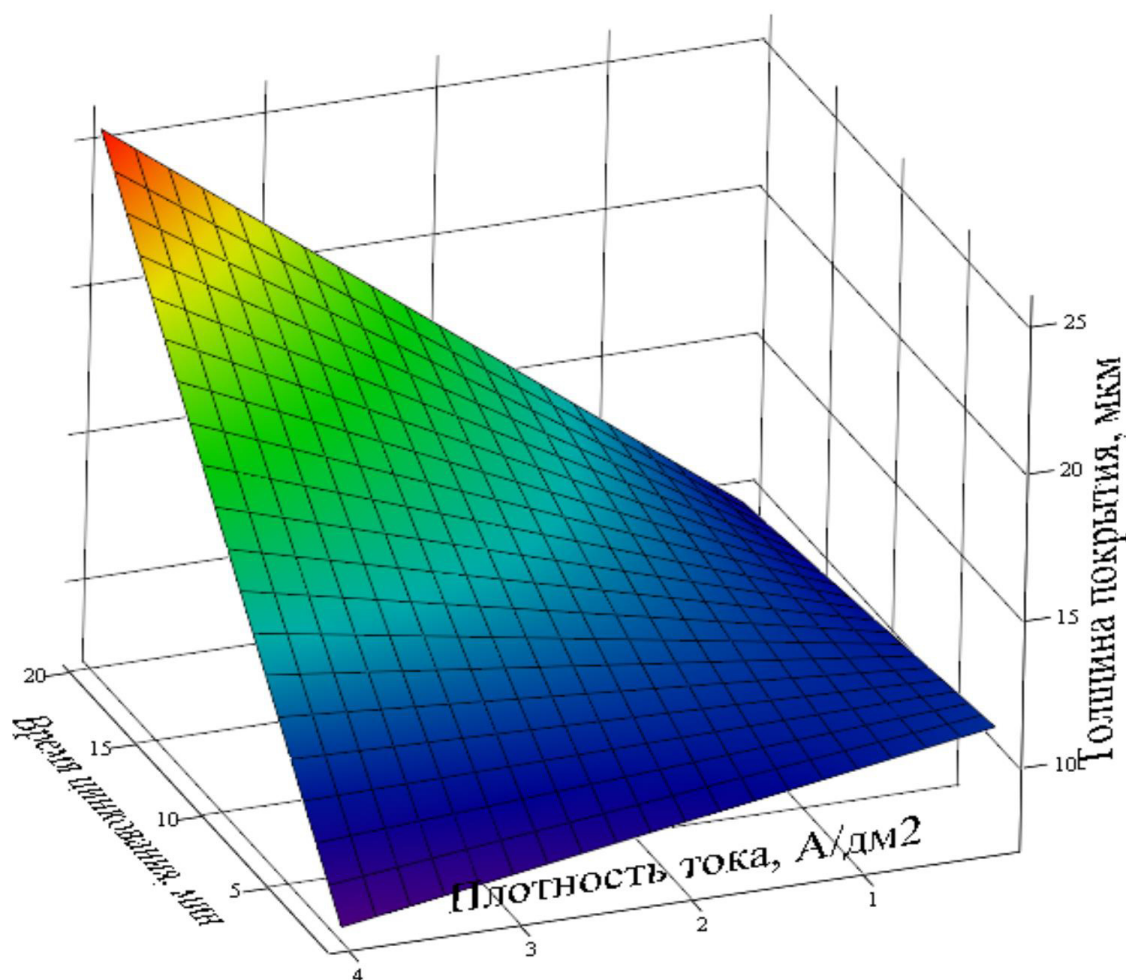


Рисунок 3 – График зависимости толщины цинкового покрытия от времени цинкования и плотности рабочего тока

Анализ графика позволил сделать вывод о наличии прямой зависимости толщины цинкового покрытия от рассматриваемых технологических параметров электролитического процесса цинкования детали «тяги».

Установленный диапазон оптимальных значений параметров технологического процесса позволил скорректировать режимы цинкования на производстве для получения равномерного покрытия толщиной 8-18 мкм в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Внешний осмотр деталей после цинкования на установленных режимах показал отсутствие на поверхности детали «тяга» таких дефектов, как отложение шлака, непокрытые полосы или пятна и царапины, доходящие до основного металла.

По данным эксперимента и построенной математической модели можно сделать вывод о том, что плотность рабочего тока в пределах от 1 до 2 А/дм² и время выдержки при цинковании 15-20 минут, являются достаточными величинами для получения покрытия толщиной 9-12 мкм.

Однако, по предложенному технологическому процессу, при одновременном цинковании 100 деталей, необходимо увеличить силу тока для достижения требуемой плотности тока.

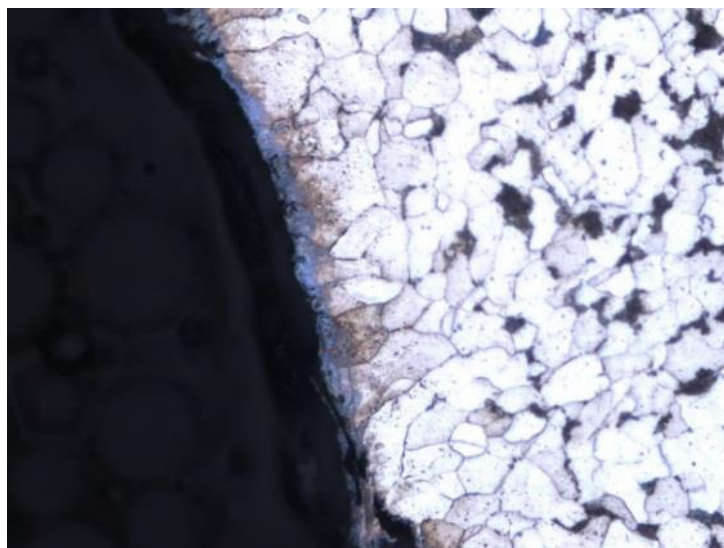
Металлографические исследования цинкового покрытия проводились на Анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS800, состоящем из инвертированного металлографического микроскопа OLYMPUS GX41 с максимальным увеличением $\times 1000$, снабженного микроскопной видеокамерой и подключенного к персональному компьютеру с инновационным программным обеспечением для панорамной микроскопии.

Микроструктура стали 20 на границе раздела основного металла и нанесенного цинкового покрытия представлена на рисунке 4, а – при 500-кратном увеличении; на рисунке 4, б – при 1000-кратном увеличении.

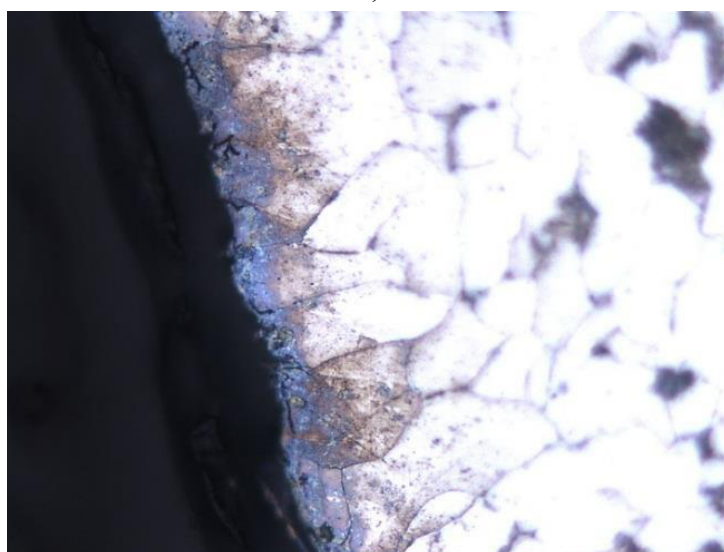
Четко прослеживается феррито-перлитная структура основного металла низкоуглеродистой стали 20 и слой цинкового покрытия с радужными оттенками.

По рисунку 4 можно сделать вывод о том, что удалось получить однородное и равномерное цинковое покрытие, и наблюдается прочное сцепление покрытия с основным металлом.

Несмотря на тот факт, что полный факторный эксперимент позволил получить лишь ограниченный диапазон оптимальных значений параметров режима цинкования, в ходе дальнейших исследований на основе планирования эксперимента второго порядка планируется установить точные оптимальные значения времени цинкования и плотности тока для достижения определенной толщины покрытия.



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура раздела границ стали 20 и цинкового покрытия при 500-кратном (а) 1000-кратном увеличении (б)

Список литературы

1. Ковенский, И. М. Металловедение покрытий : учебник для вузов / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – Москва: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. – 296 с. – Текст : непосредственный.
2. Гамбург, Ю. Д. Гальванические покрытия : справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – Москва: Техносфера, 2006. – 215 с. – Текст : непосредственный.
3. Герасимова, Н. С. Химико-термическая обработка сталей и сплавов: учебное пособие по курсу «Материаловедение» / Н. С. Герасимова. – Калуга:

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 48 с. – Текст : непосредственный.

4. Кофанова, Н. К. Коррозия и защита металлов : учебное пособие / Н. К. Кофанова. – Алчевск, 2003. – 181 с. – Текст : непосредственный.

5. Гиссин, В. И. Планирование эксперимента и обработка результатов : учебное пособие / В. И. Гиссин. – Текст : электронный. – Ростов-на-Дону: Издательско-полиграфический комплекс РГЭУ (РИНХ), 2018. – 131 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=567016>.

6. Математическое планирование эксперимента : учебное пособие / П. В. Медведев, В. А. Федотов. – Текст : электронный. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. – 98 с. – URL : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481785>.

7. Методы планирования эксперимента при моделировании технологических процессов. Ч. 1. Метод. указания по дисциплине «Математическая статистика и планирование эксперимента» для студентов третьего и пятого курсов / М. Ф. Капустьян, Д. В. Муравьев. – Текст : электронный – 2011. – Ч. 1. – 38 с. – URL : <http://bibl.omgups.ru/METMAT/Капустьян-19.59.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

К.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.

Тел.: +7(905) 096-51-55

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Измest'ева Екатерина Олеговна

ООО «ПКФ-Сиблифт».

ул. Индустриальная, 11, г. Омск, 644027,

Российская Федерация.

Инженер-технолог участка термообработки и металлопокрытий.

Тел.: +7(951) 410-47-44

E-mail: izmestcat@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Muraviev Dmitry Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Transport Engineering and Rolling Stock Repair» OSTU.

Phone : +7(905) 096-51-55

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Izmest'eva Ekaterina Olegovna

PKF-Sibliff LLC.

11, Industrialnaya st., Omsk 644027, the Russian Federation.

Process Engineer, Heat Treatment and Metal Coating Section.

Phone: +7(951) 410-47-44

E-mail: izmestcat@mail.ru

М. Ф. Капустьян, Г. С. Буркут

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ КУЗОВА ГРУЗОВОГО ПОЛУВАГОНА И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ КОЛИЧЕСТВА

В статье выполнен анализ неисправностей кузова грузового полувагона. Рассмотрены причины их возникновения, а также технология ремонта сваркой. Приведены рекомендации для качественного выполнения сварных работ с учетом климатических режимов работы вагона.

Ключевые слова: грузовой вагон, технология ремонта, сварка, остаточные напряжения.

Mikhail F. Kapustian, Galina S. Burkut

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF DEFECTS OF THE BODY OF A CARGO GONDOLA AND WAYS TO REDUCE THEIR QUANTITY

The article analyzes the malfunctions of the body of a freight gondola car. The reasons for their occurrence are considered, as well as the technology of repair by welding. Recommendations are given for the high-quality performance of welded works, taking into account the climatic conditions of the car.

Keywords: freight car, repair technology, welding, residual stresses.

По данным ОАО «РЖД» за 2020 год произведено порядка 70 тыс. отцепок грузовых вагонов. Большее количество отцепок приходится на зимний период (рисунок 1).

На рисунке 2 представлено процентное соотношение отказов основных узлов грузового вагона, поступающих на ТР-1. Основная доля приходится на кузов (80,8%). Неисправности тележек (8,8%), рамы (6,9 %) и других узлов встречаются значительно реже.

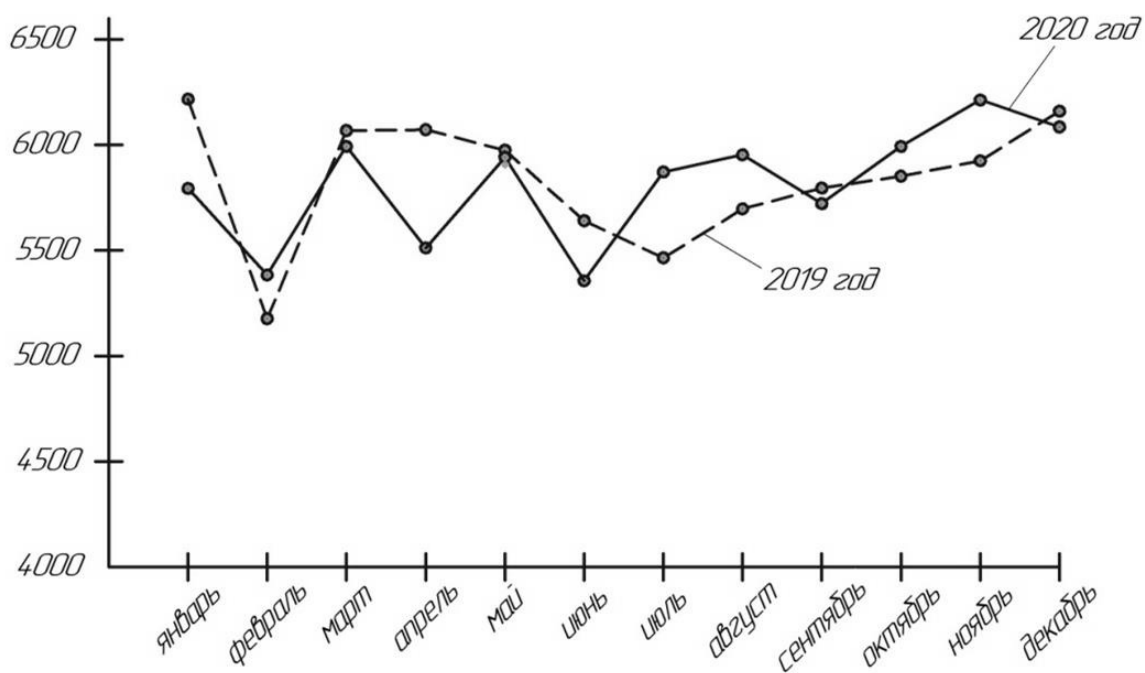


Рисунок 1 – Количество отцепок грузовых вагонов за 2019-2020 год

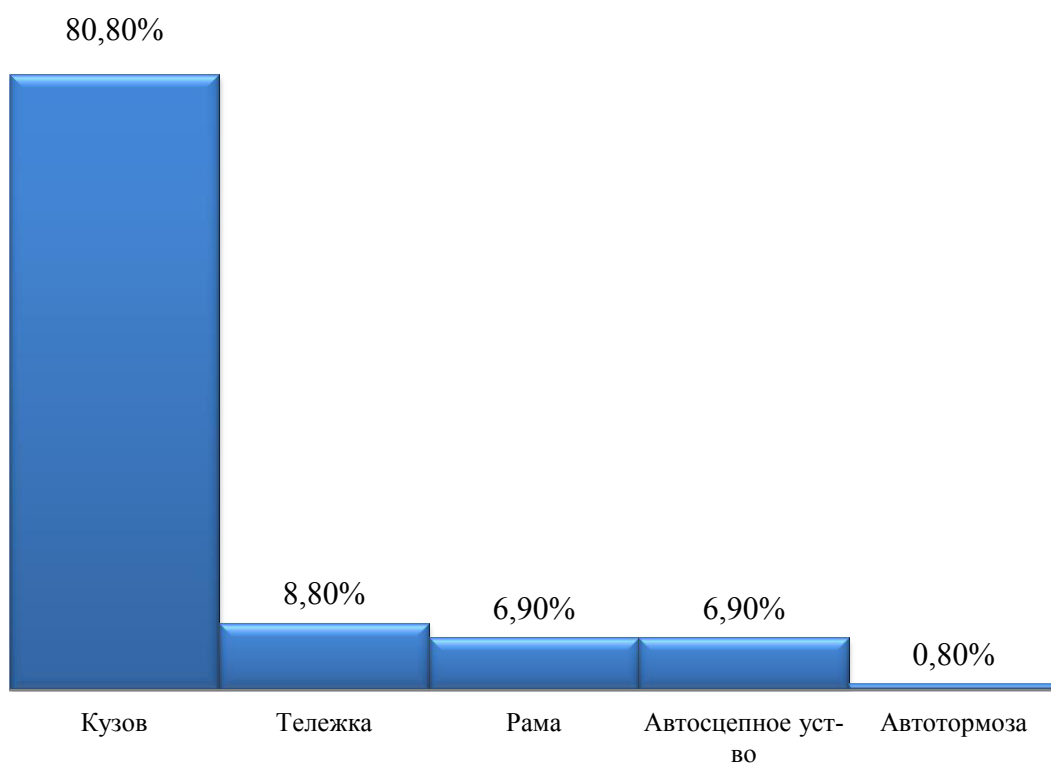


Рисунок 2 – Причины отцепок грузовых вагонов в ТР-1

Наиболее характерными неисправностями кузова являются трещины, пробоины, прогибы, вмятины, коррозионные повреждения металлических деталей. В процентном соотношении наибольшее количество неисправностей приходится на механизм запора люка и погрузочно-разгрузочные механизмы (рисунок 3).

Основными причинами возникновения неисправностей в эксплуатации являются интенсивное ведение погрузочно-разгрузочных работ с применением механизмов, конструктивно не соответствующих условиям их взаимодействия с подвижным составом, нарушения технологии грузовой работы, а также отклонения в эксплуатационной работе.

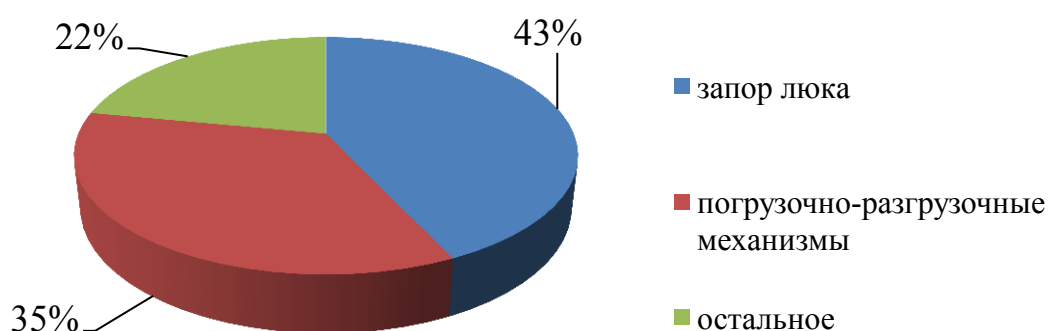


Рисунок 3 – Основные причины неисправности кузова грузового вагона

При погрузке и разгрузке длинномерных грузов в кузова полувагонов применяют ряд механизмов. При этом кузов полувагона может получить повреждения при перемещении груза и при нарушении правил отстроповки и закрепления груза. Погружаемый пакет груза может раскачиваться из-за изменения направления движения (поворот стрелы), скорости или давления ветра. И эти раскачивания гасятся ударами груза о кузов, в результате чего деформируется и пробивается обшивка, стойки и верхняя обвязка.

С целью увеличения степени использования грузоподъемности вагона, лесоматериалы часто грузят с выходом концов груза за сечение торцевых дверей. Двери в этом случае прижаты к боковым стенам и всю нагрузку от распора кузова воспринимают стойки в зоне приварки их к раме вагона, что приводит к образованию трещин в этой зоне и отрыву стоек от рамы.

Высок уровень повреждаемости кузовов полувагонов при экскаваторной

и грейферной погрузке насыпных грузов. К этой работе должны допускаться экскаваторы с емкостью ковшей не более 3 м^3 .

С целью повышения производительности труда и недопущения повреждений верхней обвязки экскаваторщик часто поднимает ковш на большую высоту над кузовом вагона и раскрывает ковш. В этом случае груз падает с большой высоты, повреждая крышки люков, обшивку кузова и заделки стоек в виде разрушения сварных швов в местах стыковки стоек с поперечными и шкворневыми балками.

Для повышения производительности разгрузки грейферами за счет более полного заполнения ковша грейфер бросают на груз. Часто это происходит, когда поворот стрелы крана еще не завершен и поэтому часто сопровождается ударами раскрытого грейфера о верхнюю обвязку полувагона или об обшивку. При разгрузке нижней части груза в кузове при смыкании челюстей часто происходит повреждение горизонтальных полок поперечных балок. Все эти трудности резко увеличиваются при разгрузке слежавшихся и особенно смерзшихся в процессе транспортировки грузов. Другим массовым При повороте платформа с вагоном смещается под действием собственной массы и пружин тележек до прилегания боковой стены полувагона к привалочной стенке вагонопрокидывателя. В результате могут появиться деформации кузова (сужение), изгибы стоек, повреждения сварных швов, верхних запоров дверей. Другим видом разгрузки является разгрузка на вагонопрокидывателях. Наиболее часто применяются роторные вагонопрокидыватели, на которых вагон поворачивается относительно своей продольной оси на 180° .

Для разрыхления грузов применяют различные вибрационные машины, которые сообщают колебания кузову вагона. Такой способ приводит к разрушению сварных швов на верхней обвязке и в зонах приварки стоек к поперечным балкам, появлению трещин по основному металлу верхних обвязок и стоек, ослаблению резьбовых соединений в различных сборочных единицах.

При ремонте механизма закрывания крышек люков (рисунок 4), детали независимо от технического состояния снимают, предварительно срезают гайки, вынимают болты, тщательно проверяют [1]. Изношенные детали запорного механизма восстанавливают наплавкой до чертежных размеров. Болты, гайки и пружины с изломом и потерявшие упругость устанавливают

новые. Стопорение болтов с гайками запорных механизмов крышек люков производится дуговой сваркой катетом 3 мм длиной от 5 до 10 мм. Способ сварки полуавтоматический или ручной.

Скобы запорных механизмов установленные на заклепках, при необходимости восстановления размеров отверстий снимают с вагона. Местные зазоры между крышкой люка и плоскостью ее прилегания допускаются не более 4 мм. Для устранения зазоров более 4 мм, разрешается приварка не более одной планки на запорных угольниках крышек люков толщиной не более 12 мм, шириной 50 мм, длиной от 60 до 100 мм и наложением бокового и торцового сварных швов.

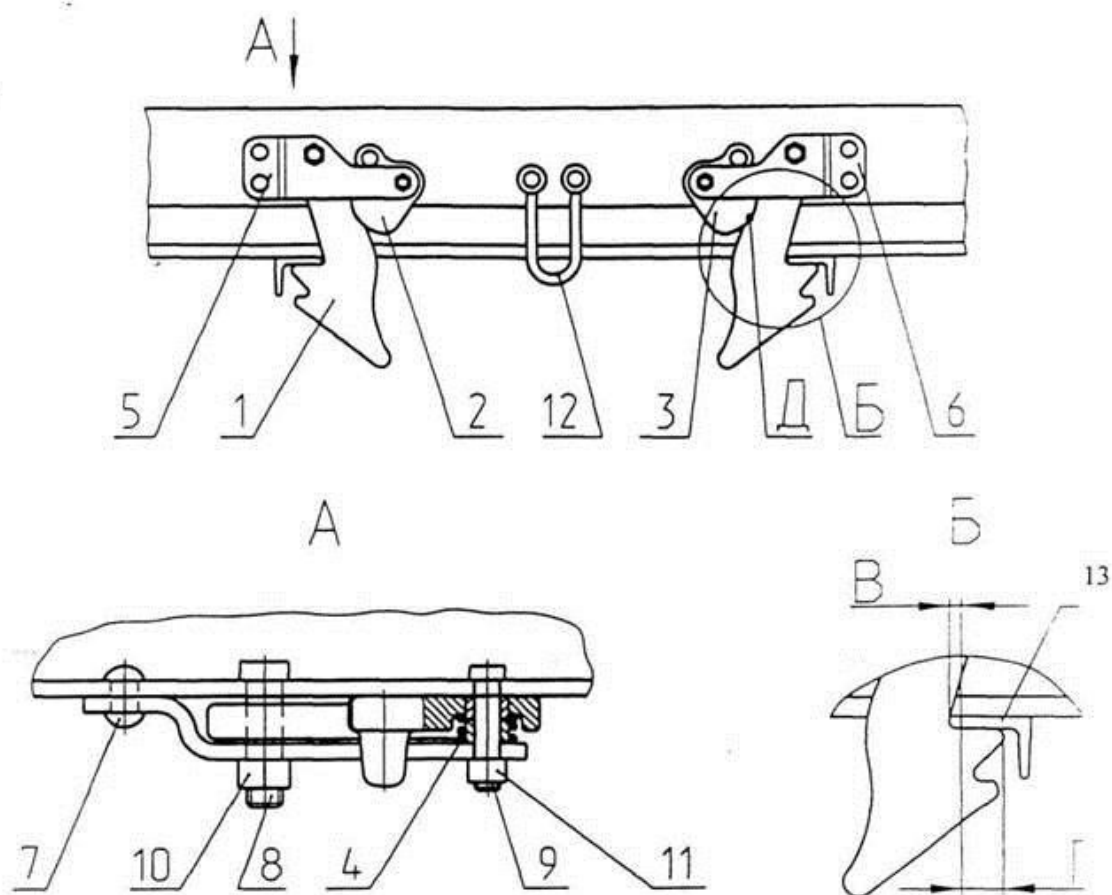


Рисунок 4 – Механизм закрывания крышек люков:

- 1 – закидка; 2 – сектор левый; 3 – сектор правый; 4 – пружина; 5 – скоба левая;
 6 – скоба правая; 7 – заклепка; 8,9 – болт; 10,11 – гайка; 12 – скоба;
 13 – кронштейн крышки люка

В рабочем состоянии зазор между литым пальцем запорного сектора и

скобой запорного механизма В (рисунок 4) должен быть от 0 до 8 мм. При зазоре В более указанного значения необходимо производить наплавку валика дуговой сваркой на опорной поверхности сектора длиной не менее 30 мм влево от точки Д сопряжения сектора с закидкой, шириной 12 – 15 мм и высотой не более 5 мм с плавным переходом в начале и в конце сварного шва, с зачисткой неровностей наплавленного металла или произвести замену изношенных секторов. При этом детали запорного механизма должны плотно прилегать друг к другу.

Для качественного выполнения сварных работ необходимо учитывать климатические режимы работы вагона. Так, по данным Н.П. Мельникова, А.В. Сильвестрова, С.Д. Шафрая среднестатистическая температура максимальной интенсивности отказов находится в диапазоне от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как для северной строительно-климатической зоны температура наиболее холодных суток опускается ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 3]. Теоретические основы существующих методов оценки хладостойкости стали и элементов конструкций не позволяют в полной мере учитывать их типичные конструктивно-технологические несовершенства, так как ориентированы на описание микромеханизма разрушения металла в простейших условиях. Предпринимаемые попытки развить их применительно к стальным строительным конструкциям имели в основном внесистемный характер, зачастую без должного научного обоснования и в отрыве от реального состояния производства. Как следствие, на сегодняшний день нет единой точки зрения относительно критериев и метода определения температуры хрупкости стали, что приводит к существенным расхождениям при оценке ее хладостойкости в составе конструкции. Нормативные требования по допустимой дефектности сварных соединений, с одной стороны, являются чрезмерно жесткими по отношению к малозначительным дефектам, что приводит к необоснованным затратам на ремонт, а с другой - не гарантируют их сопротивления хрупкому разрушению. Методы расчета на прочность с учетом хрупкого разрушения не учитывают реального состояния дефектности сварных соединений, а также особенностей технологических и эксплуатационных воздействий на металл, являющихся причинами порядка 60...70% аварий, произошедших при низкой температуре окружающей среды [4].

Существующая нормативная база на проектирование, изготовление, ремонт и усиление сварных металлоконструкций, эксплуатируемых при воздействии низких температур, не имеет достаточного научного обоснования. Как следствие, при снижении температуры окружающей среды ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2...3 раза увеличивается интенсивность потока отказов, в 3 и более раз снижаются показатели наработки конструкций, существенно увеличивается тяжесть экономических и экологических последствий от аварий. По причине непригодности сварных конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей к эксплуатации в северной строительноклиматической зоне происходит около 20% от общего числа отказов.

Негативное влияние исправления дефектных участков на надежность сварного соединения известно давно [5], однако исследований по количественной оценке снижения трещиностойкости сварного шва после проведения ремонтно-восстановительных работ практически не проводилось. В этой связи не совсем ясна мотивация нормативных ограничений на количество ремонтов одного и того же участка, его механические свойства, размеры и количество допустимых на данном участке дефектов. Для изучения этого вопроса проведены испытания на ударную вязкость (рисунок 5), а также на растяжение и статический изгиб заваренных и отремонтированных сварных соединений разной толщины и марки стали в диапазоне климатических температур [6]. Обработка результатов показала, что на величину ударной вязкости значимо (на уровне 0,95) влияют линейные эффекты ремонта и температуры, а также квадратичный эффект ремонта. При этом влияние температуры близко к линейному, а количества ремонтов к экспоненциальному закону. Снижение степени влияния последнего начинает проявляться при количестве ремонтов более двух. Следует отметить увеличение степени влияния температуры на ударную вязкость с ростом толщины свариваемых деталей, что полностью согласуется с общеизвестными представлениями о роли масштабного фактора и косвенно подтверждает достоверность полученных результатов. На основании проведенных исследований установлено существование статистически значимого влияния количества ремонтов на ударную вязкость металла сварного соединения, которое удовлетворительно описывается уравнениями типа:

$$KCV_6 = KCV_6^{+20} \left[60,5 + 30,5 \left(1 - \frac{T}{20} \right) - 25,6 \left(1 - \frac{R}{2} \right) + 14 \left(1 - \frac{R}{2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$KCV_{12} = KCV_{12}^{+20} \left[61,9 + 24,5 \left(1 - \frac{T}{20} \right) - 25,8 \left(1 - \frac{R}{2} \right) + 9,7 \left(1 - \frac{R}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где KCV_6 , KCV_{12} – ударная вязкость,

T – температура,

R – количество ремонтов.

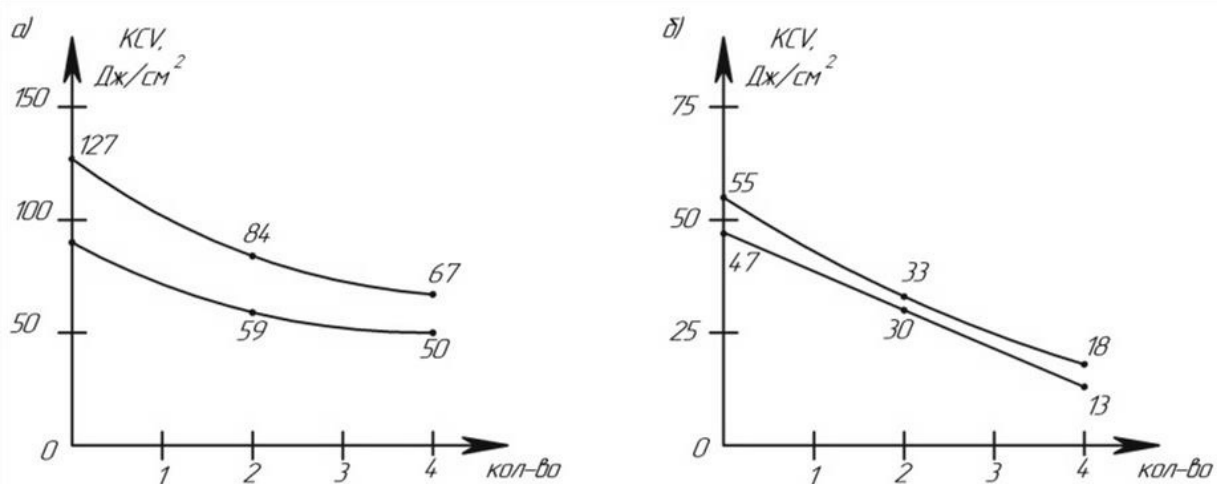


Рисунок 5 – Зависимость ударной вязкости металла шва при температуре $+20^\circ\text{C}$ (а) и -40°C (б) от количества ремонтов

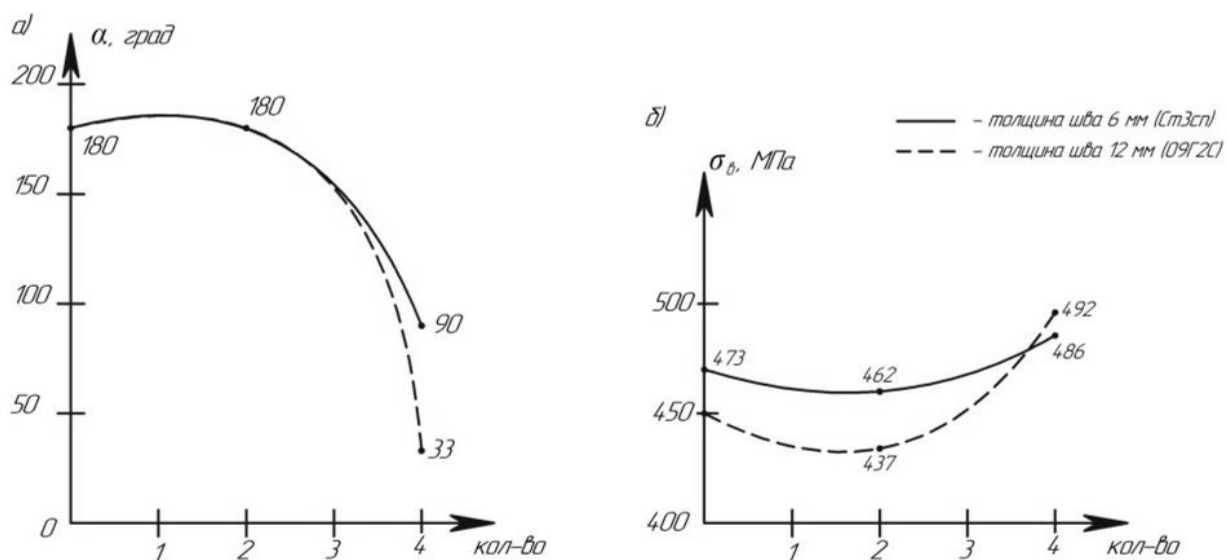


Рисунок 6 – Зависимости угла изгиба и временного сопротивления сварного соединения от количества ремонтов

При регламентации технологии ремонтно-восстановительных работ с использованием сварки необходимо учитывать, что два ремонта следует считать характерной точкой смены интенсивности процесса деградации механических свойств. Применение дополнительных технологических мероприятий по повышению служебных свойств металла шва до нормативных требований позволяет увеличить количество ремонтов для сварных соединений.

Предварительный подогрев свариваемых кромок до 120...160°C снижает величину остаточных сварочных напряжений на 15...20% . Для снижения более чем на 50% величина $T_{\text{п}}$, в зависимости от толщины и класса прочности стали, должна составлять 200...450°C [7].

Таким образом, необходимо при организации ремонтных работ кузова полувагона во-первых фиксировать порядковый номер ремонта постановкой клейма, во-вторых в случае третьего и последующего ремонта обеспечить дополнительные операции по предварительному подогреву восстанавливаемой поверхности.

Список литературы

1. «Руководства по текущему отцепочному ремонту грузовых вагонов» № 717-ЦВ-2009 (РД 32 ЦВ 056-97).

2. Шафрай, С. Д. К вопросу хрупкого разрушения сварных стальных конструкций, эксплуатирующихся на севере / С. Д. Шафрай, А. В. Сергеев. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 1995. – №11. – С. 11-13.

3. Мастобаев, Б. Н. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с V-образными элементами / Б. Н. Мастобаев, А. К. Гумеров, С. А. Сильвестров // Сварка в России-2020: Современное состояние и перспективы : сборник трудов II Международной конференции в рамках IX Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур "EURASTRENCOLD-2020", посвященной 50-летию образования ИФТПС СО РАН «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». – Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, 2020. – С. 110-118.

4. Тиньгаев, А. К. Критерии оценки и метод обеспечения хладостойкости стальных конструкций с дефектами сплошности в сварных швах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, 2004.

5. Панов, В. И. Особенности выполнения ремонтной сварки массивных конструкций тяжело нагруженного оборудования / В. И. Панов. – Текст : непосредственный // Сварщик. – 2017. – №2. – С.19-23.

6. Губайдулин, Р. Х. Определение трещиностойкости сварных соединений малоуглеродистых и низколегированных сталей. Материалы докладов конференции / Р. Х. Губайдулин, А. С. Тиньгаев, Е. А. Пожидаев // Сварка-Контроль. Итоги XX века. 19-я научно-техническая конференция сварщиков Урала. – Челябинск: ЦНТИ, 2000. – С.151-153.

7. Тиньгаев, А. К. Метод определения критических температур хрупкости элементов металлоконструкций / А. К. Тиньгаев. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – №3. – С.46-51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Капустьян Михаил Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: ttmirps@gmail.com

Буркут Галина Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Студент ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: ttmirps@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kapustian Mikhail Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department

«Technology of transport engineering and repair of rolling stock» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: ttmirps@gmail.com

Burkut Galina Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Student OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: ttmirps@gmail.com

Д. Ю. Белан, Л. Ю. Кофанова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА РЕМОНТА АВТОСЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА
ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА**

Данная статья посвящена совершенствованию существующего технологического процесса ремонта автосцепного оборудования – спроектирована система контроля, учета наличия и неисправностей автосцепного устройства нетяговых единиц подвижного состава и спроектирован специальный инструмент «Шаблон 8кл-5299» для контроля замка автосцепного устройства.

Ключевые слова: пассажирский вагон, автосцепное устройство, корпус автосцепки СА-3, механизмы сцепления, замок, контроль, шаблон, специальный измерительный инструмент.

Dmitry Y. Belan, Lyubov Y. Kofanova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

**DEVELOPMENT OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN
THE FIELD OF ENSURING THE QUALITY OF METROLOGICAL
SUPPORT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF REPAIR
OF A COUPLING UNIT OF A PASSENGER CAR**

This article is devoted to improving the existing technological process of repairing automatic coupler equipment - a system for monitoring, accounting for the presence and malfunctions of an automatic coupler of non-traction rolling stock units has been designed and a special tool "Template 8kl-5299" has been designed to control the lock of an automatic coupler.

Keywords: passenger car, automatic coupler, automatic coupler body CA-3, clutch mechanisms, lock, control, template, special measuring tool.

Для повышения качества ремонта и надежности единиц подвижного состава большое значение имеет уровень ремонта локомотивов и вагонов. Поэтому предусмотрено внедрение на вагоноремонтных предприятиях новых технологических процессов восстановления деталей и сборочных единиц вагонов.

Железнодорожный транспорт является одной из ведущих отраслей экономики нашей страны. Надежность работы подвижного состава определяется качеством его ремонта. В последнее время подвижной состав обновляется в неполной мере. Потребности в подвижном составе из-за увеличения транспортных потоков все время возрастает. Поэтому на ремонтные предприятия железнодорожного транспорта возлагаются большие задачи по совершенствованию технологического процесса и увеличению объемов ремонта с повышением его качества.

Согласно «ГОСТ 22703-2012 Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия», автосцепка СА-3 (рисунок 1) служит для сцепления единиц подвижного состава, а также передачи тяговых и ударных нагрузок.

Автосцепное устройство вагона состоит из следующих пяти частей:

- корпуса и расположенного в нем механизма;
- расцепного привода;
- ударноцентрирующего прибора;
- упряжного устройства с поглощающим аппаратом;
- опорных частей.

В эксплуатации, при сцепленном состоянии автосцепок, проверить все размеры, определяющие надежность действия автосцепного устройства, практически невозможно. Поэтому при осмотрах в поездах дается только общая оценка работоспособности и состояния устройства в целом. Методы такого осмотра, разработанные работниками ряда дорог, применяются на станциях массовой погрузки и выгрузки на сортировочных и участковых станциях.

Автосцепка СА-3 является тягово-ударной нежесткого типа. Она состоит из корпуса и деталей механизма сцепления: замка, замкодержателя, предохранителя, подъемника, валика подъемника.

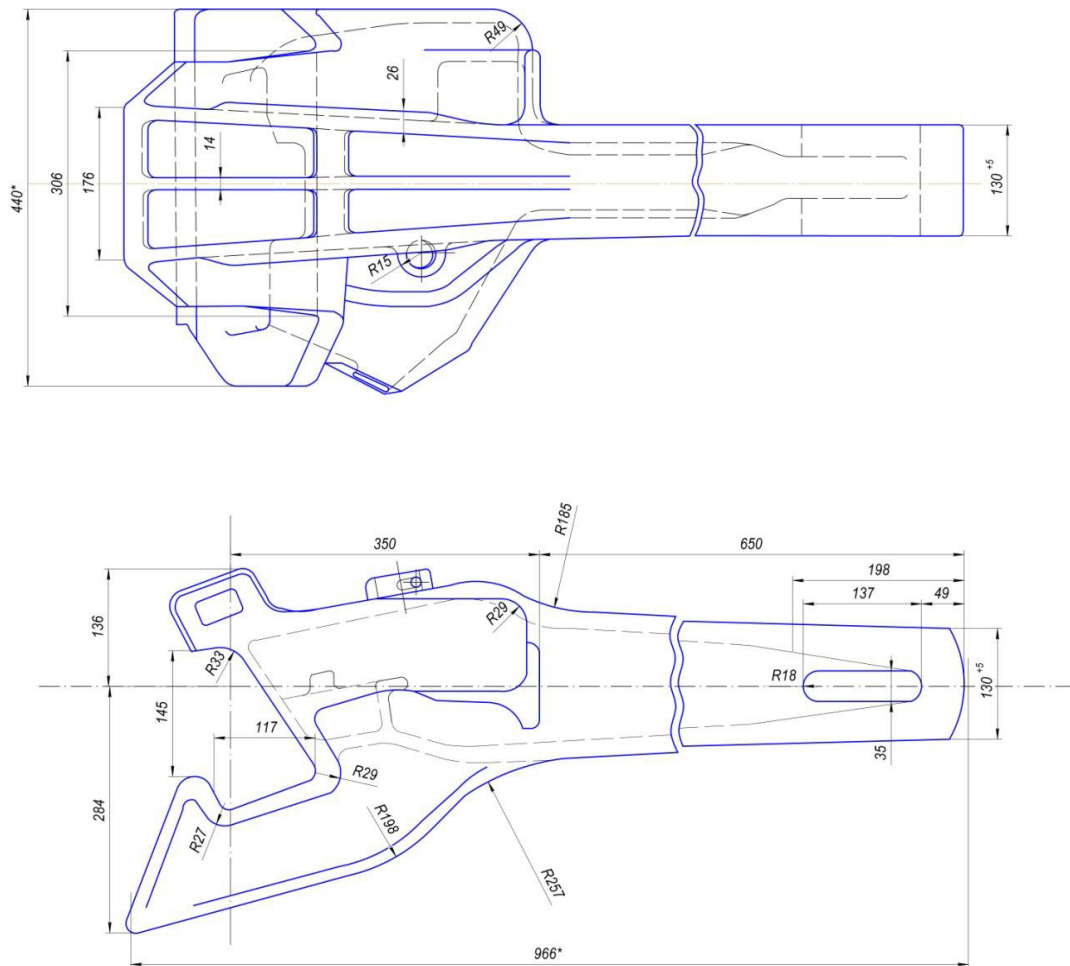


Рисунок 1 – Автосцепка СА-3

Автосцепное устройство относится к ударно-тяговому оборудованию вагона и предназначено для сцепления вагонов между собой и локомотивом, удержания их на определенном расстоянии друг от друга, восприятия, передачи и смягчения воздействия растягивающих и сжимающих усилий, возникающих во время движения. От исправного состояния этого оборудования во многом зависит безопасность движения поездов [1, 2].

Автосцепное устройство подвижного состава должно постоянно находиться в исправном состоянии. Чтобы своевременно обнаружить и устранить возникшие неисправности, кроме проверки устройства в поездах, установлены наружный осмотр - без снятия с подвижного состава узлов и деталей и полный осмотр - со снятием с подвижного состава съемных узлов и деталей. Наружный осмотр автосцепного устройства производится во время текущего отцепочного ремонта вагонов, единой технической ревизии пассажирских вагонов, промывочного ремонта паровозов, текущего ремонта

ТР-1 тепловозов, электровозов и вагонов электро- и дизель-поездов - для определения работоспособности устройства в целом, проверки взаимодействия его узлов и деталей без конкретной оценки состояния каждой детали [3].

Полный осмотр автосцепного устройства производится при капитальном и деповском ремонтах вагонов, капитальном ремонте локомотивов и вагонов электропоездов, текущих ремонтах ТР-2, ТР-3 тепловозов, электровозов и вагонов электро-поездов, дизель – поездов [3].

Автосцепное устройство перед наружным осмотром очищают от загрязнений или снега, выявляют трещины на деталях или их изгибы, проверяют соответствие узлов и деталей нормам, установленным для данного вида осмотра.

Действие механизма и состояние автосцепки проверяют шаблоном 940р.

Автосцепка СА-3 обеспечивает:

– автоматическое сцепление при соударении единиц подвижного состава с различными маневровыми скоростями;

– автоматическое запираение замка в нижнем положении у сцепленных автосцепок, что устраняет самопроизвольное расцепление на ходу поезда (саморасцеп);

– расцепление подвижного состава без захода человека между концевыми балками и удержание механизма в расцепленном положении до разведения автосцепок;

– автоматическое возвращение механизма в положение готовности к сцеплению после разведения автосцепок;

– восстановление сцепления у ошибочно расцепленных автосцепок без их разведения;

– маневровую работу толчками (работа «на буфер»), когда при соударении автосцепки не сцепляются [4].

При рассмотрении организационной и производственной структуры депо ЛВЧД-1 Омск, стало известно, что на предприятии нет формы учета наличия и неисправностей автосцепных устройств. Для улучшения качества обслуживания и упрощения ведения записей наличия неисправностей и дефектов автосцепных устройств была разработана форма учета для автосцепного оборудования, представленная в таблице 1.

Форма учета наличия неисправностей автосцепного устройства

ОАО «РЖД»					
Пассажирское Депо					
Форма учета наличия и неисправностей автосцепного устройства					
Дата поступления	№ автосцепки	Тип	Завод изготовитель	Место последнего ремонта	Вид требуемого ремонта
Проверяемые детали		Номера шаблонов	Наличие неисправности	Подлежит/ не подлежит ремонту	
Корпус автосцепки		893р			
Замок (до ремонта)		8кл-5299			
Замок (после ремонта)					
Замкодержатель		841р			
Предохранитель		800р-1			
Подъемник замка		847р			
Валик подъемника		919р			
<< >> 2021 г.		Подпись _____ (лица, производ. ремонт и освидет.)			

Согласно новой форме учета наличия и неисправностей автосцепное устройство принимается на учет путем оформления соответствующих граф формы, в которых указываются дата поступления, номер автосцепного устройства, завод изготовитель, место последнего ремонта. Указанными в форме шаблонами проверяется каждая деталь автосцепного устройства на наличие неисправности [2, 3]. Далее слесарь определяет, подлежит ли деталь ремонту, если подлежит, то наличие неисправности записывается в соответствующую графу.

Основная задача любой системы контроля – выявление дефектов и определение пределов прочности и надежности. Дефекты могут возникнуть в результате ошибки при конструировании, производстве или эксплуатации: дефекты литья, усталостное разрушение, атмосферная коррозия, изнашивание

сопряженных деталей, дефекты при нанесении покрытий, дефекты неразъемных соединений металла. В каждом конкретном случае применяются специальные методики, позволяющие определить степень влияния дефекта на качество изделия: насколько уменьшится надежность, рабочие характеристики, как изменятся сроки и условия эксплуатации, или дефект является критичным и предмет не может быть допущен к использованию. Различают две основные группы испытаний: разрушающего и неразрушающего контроля [5].

На основании разработанной формы учета наличия неисправностей автосцепного устройства были проанализированы различные шаблоны для проверки деталей автосцепного оборудования.

Шаблон №800Р-1 служит для проверки предохранителя замка (рисунок 2).

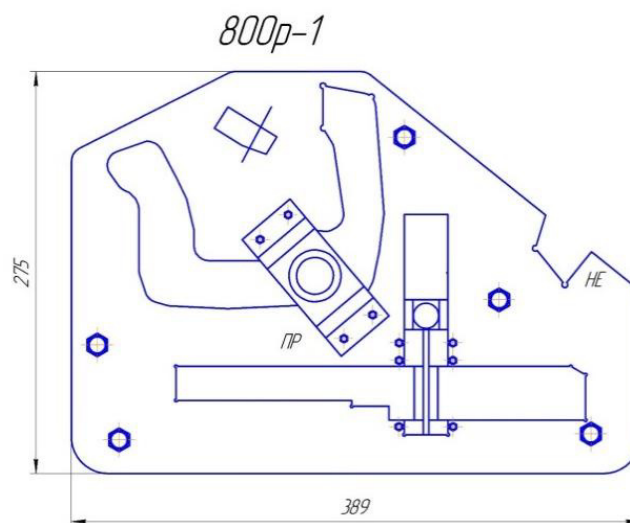


Рисунок 2 – Шаблон №800Р-1

Шаблон №841Р служит для проверки толщины замкодержателя автосцепки (рисунок 3).

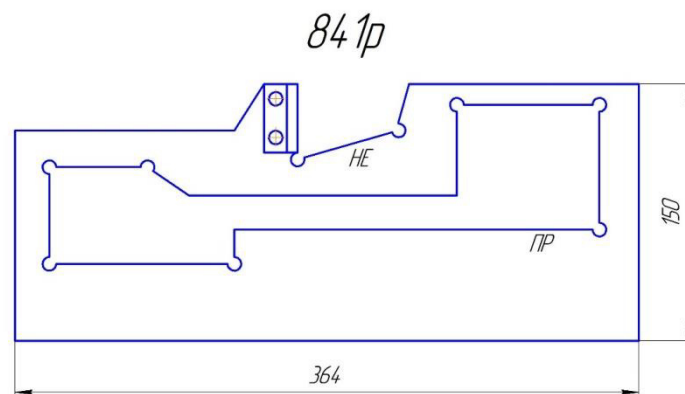
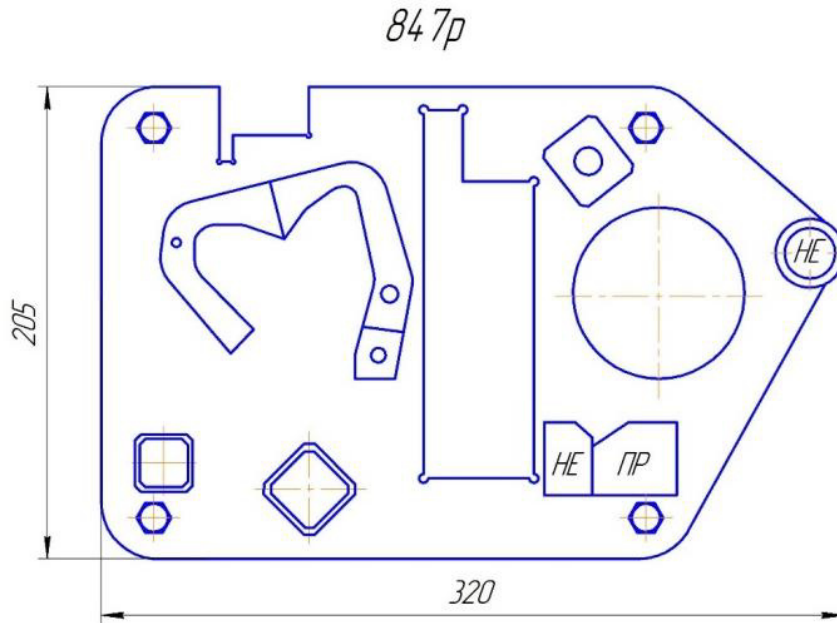
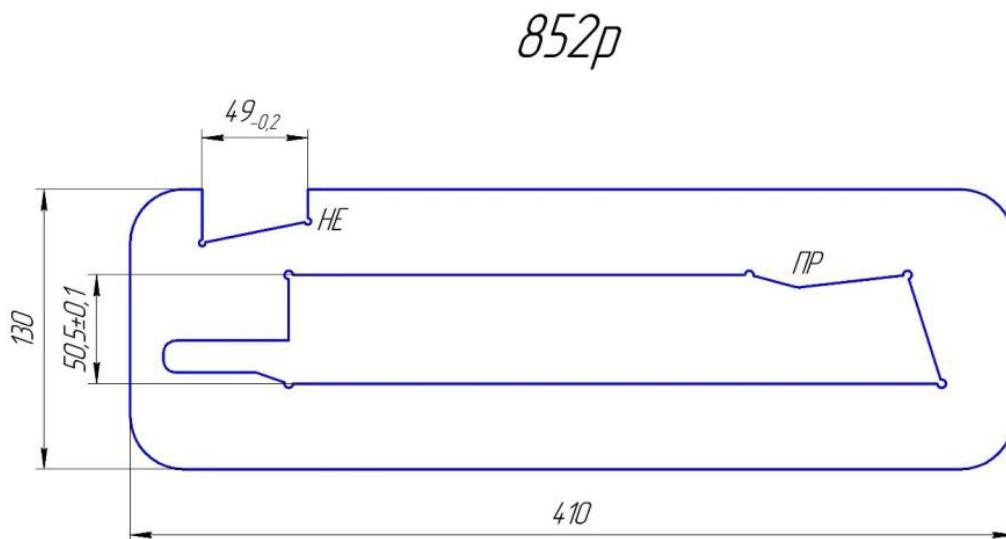


Рисунок 3 – Шаблон №841Р

Шаблон №847Р служит для проверки подъемника замка (рисунок 4).



Шаблон №852Р служит для проверки толщины замка и его замыкающей части после ремонта (рисунок 5).



Шаблон №893Р служит для проверки длины малого зуба корпуса и расстояния между ударной стенкой зева и тяговой поверхностью большого зуба при деповском ремонте вагона (рисунок 6).

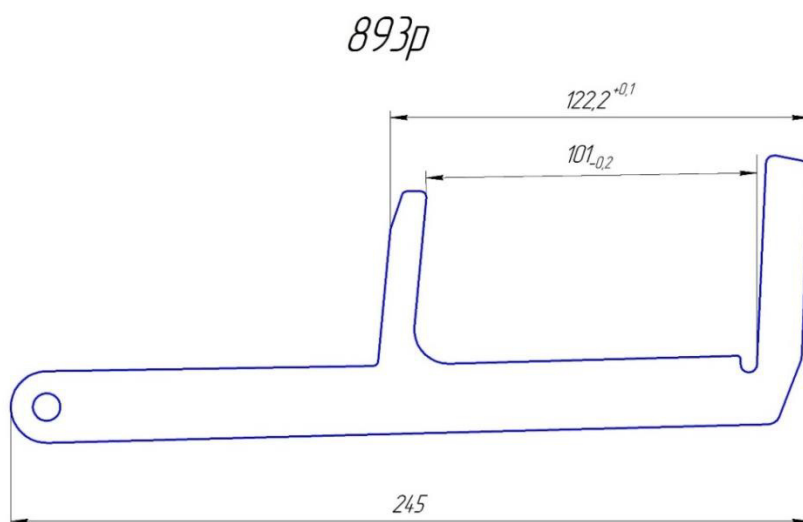


Рисунок 6 – Шаблон №893Р

Шаблон №919Р служит для проверки валика подъемника (рисунок 7).

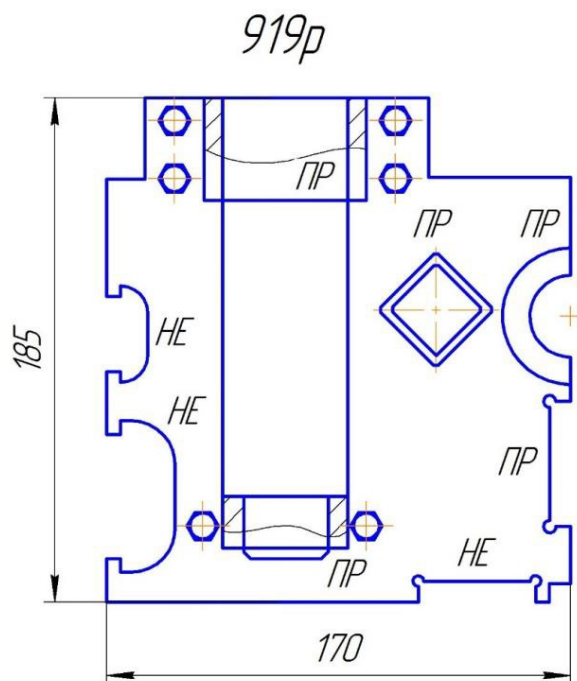


Рисунок 7 – Шаблон №919Р

Специально спроектированный инструмент шаблон 8кл-5299 (рисунок 8) представляет собой конструктивную совокупность двух шаблонов 852р и 899р.

Толщину замыкающей части замка по всей её высоте проверяют до ремонта непроходным шаблоном 8кл-5299; Замок признают годным после ремонта, если замыкающая часть его не входит в вырез б шаблона 8кл-5299 и негодным, если она входит в вырез б шаблона 8кл-5299 (рисунок 9).

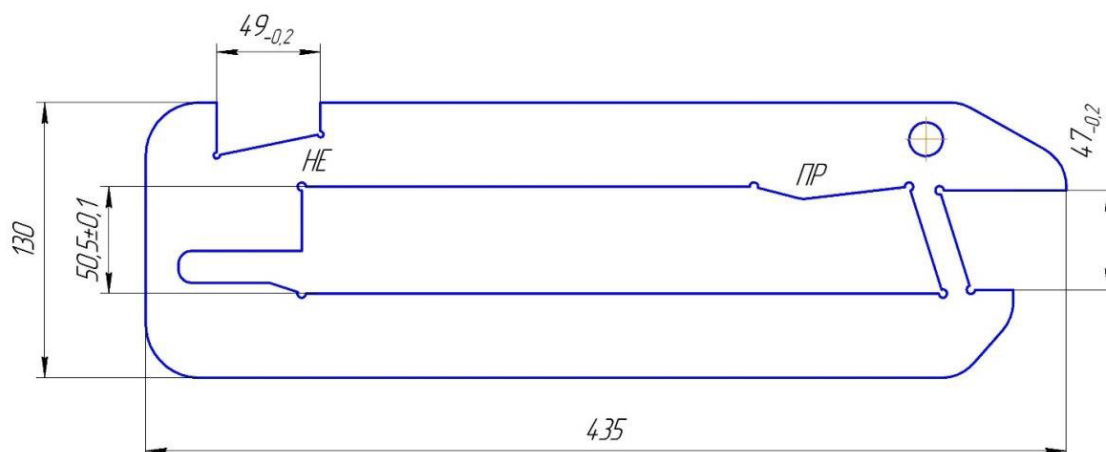


Рисунок 8 – Шаблон 8кл-5299

Проверяется замок шаблонами в соответствии с Инструкцией № ЦВ-ВНИИЖТ-494-97. При этом проверяют:

- проходной вырез а шаблоном 8кл-5299; Замок признают годным, если он свободно проходит через вырез а этого шаблона.

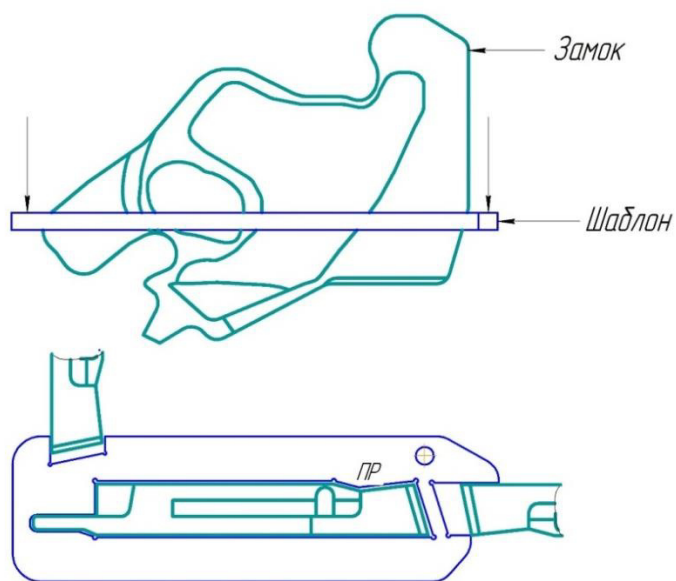


Рисунок 9 – Шаблон 8кл-5299

Таким образом, специально спроектированный инструмент шаблон 8кл-5299 позволяет сократить время на транспортировку и смену средств измерений для контроля автосцепки СА-3.

В данной работе был усовершенствован технологический процесс ремонта автосцепного устройства, а именно спроектирована система контроля и учета наличия и неисправностей автосцепного устройства пассажирских

вагонов, что позволило увеличить качество осмотра, ремонта и контроля автосцепки, а также спроектирован специальный инструмент «Шаблон 8кл-5299» для контроля замка автосцепного устройства.

Список литературы

1. Герасимов, В. С. Технология вагоностроения и ремонта вагонов / В. С. Герасимов. – Москва: Транспорт, 2005. – 381 с. – Текст : непосредственный.
2. Демьянович, И. В. Ремонт вагонов / И. В. Демьянович, Р. Г. Леонтьев. – 2009. – 340 с. – Текст : непосредственный.
3. Шибер, Р. А. Устройство и ремонт вагонов / Р. А. Шибер, Т. Т. Круглый. – Москва: Транспорт, 2006. – 350 с. – Текст : непосредственный.
4. Быков, Б. В. Технология ремонта вагонов / Б. В. Быков. – Москва : Желдориздат, 2009. – 559 с. – Текст : непосредственный.
5. Криворудченко, В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / В. Ф. Криворудченко. – Москва : Маршрут, 2005. – 436 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белан Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-11.
E-mail: nich.omgups@mail.ru

Кофанова Любовь Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Магистрант кафедры «Теплоэнергетика»
ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-11.
E-mail: nich.omgups@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belan Dmitry Yuryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of technical sciences, associate
professor of the department "Technologies of
transport engineering and rolling stock repair"
OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: nich.omgups@mail.ru

Kofanova Lyubov Yurievna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Undergraduate student of the department " Heat
power engineering" OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-11.
E-mail: nich.omgups@mail.ru

С. В. Петроченко¹, О. С. Аблялимов², Н. С. Кодиров², Р. И. Рахмаев¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация,

²Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ),
г. Ташкент, Республика Узбекистан

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАМКОВЫХ ПАЗОВ ДЕТАЛИ
«ДИСК» МАЛОГАБАРИТНОГО ДВУХКОНТУРНОГО
ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассмотрены конструктивные особенности детали «Диск» малогабаритного двухконтурного турбореактивного двигателя. Указаны проблемы, связанные с обработкой замковых пазов для крепления турбинных лопаток детали «Диск». Обосновано применение электроэрозионной проволочно-вырезной обработки вместо протягивания. В статье приведены результаты априорного ранжирования факторов, влияющих на шероховатость поверхности замковых пазов после электроэрозионной обработки. Значимые факторы в результате проведенного исследования – сила тока, расстояние между электродом и заготовкой, скорость промотки проволоки. Проведен промышленный эксперимент и получена математическая зависимость, описывающая связь шероховатости обработанной поверхности с силой тока, расстоянием между электродом и заготовкой, а также скоростью промотки проволоки. Определены оптимальные режимы обработки для достижения требуемой шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки.

Ключевые слова: турбореактивный двигатель, электроэрозионная обработка, априорное ранжирование, промышленный эксперимент, шероховатость поверхности.

**Sergei V. Petrochenko¹, Oleg S. Ablyalimov², Nozimjon S. Kodirov²,
Rakhimzhan I. Rakhmaev¹**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,
Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

**DETERMINATION OF OPTIMAL MODES OF ELECTRIC EROSION
TREATMENT OF LOCK GROOVES OF THE "DISC" DETAIL OF A
SMALL-SIZED TWO-CIRCUIT TURBOJET ENGINE**

The article discusses the design features of the "Disk" part of a small-sized by-pass turbojet engine. The problems associated with the processing of the locking grooves for fastening the turbine blades of the "Disk" part are indicated. The use of wire-cut EDM instead of broaching is substantiated. The article presents the results of a priori ranking of factors affecting the surface roughness of the locking grooves after electrical discharge machining. Significant factors as a result of the research are the current strength, the distance between the electrode and the workpiece, the wire winding speed. An industrial experiment was carried out and a mathematical dependence was obtained that describes the relationship between the roughness of the processed surface with the current strength, the distance between the electrode and the workpiece, and the wire winding speed. The optimal processing modes have been determined to achieve the required surface roughness after electrical discharge machining.

Keywords: turbojet engine, EDM, prior ranking, industrial experiment, surface roughness.

Авиадвигателестроение – важная отрасль авиационного машиностроения. Применение новых подходов в конструировании газотурбинного двигателя с целью обеспечения его большей тяговой способности на протяжении достаточно долгого времени требует применения новых, более совершенных конструкционных материалов и использования инновационных, высокотехнологичных и наукоемких технологий для изготовления деталей, которые входят в его конструкцию. Необходимо учитывать, что достаточно большое количество деталей авиационных двигателей работает при очень высоких температурах. Отсюда следует, что для производства таких деталей на сегодняшний момент используются специальные жаропрочные стали и сплавы, которые в то же время имеют низкую обрабатываемость резанием. Решить подобного рода противоречия между стремлением повысить эксплуатационные характеристики газотурбинного двигателя и одновременно достичь высокой эффективности изготовления входящих в него деталей, возможно, за счет широкого использования физико-химических методов обработки в авиадвигателестроении [1–5].

Деталь «Диск» входит в состав двигателя ТРДД-50 – малогабаритный двухконтурный турбореактивный двигатель (ДТРД) одноразового использования. Предназначен для установки на дозвуковых летательных аппаратах [6].

Назначение диска турбины высокого давления – передача крутящего момента от лопаток ротора на вал турбины. Также он является опорным

элементом для лопаток. По своему назначению и условиям эксплуатации диски являются наиболее нагруженными и ответственными частями роторов турбин.

Диски газотурбинных двигателей относятся к наиболее ответственным быстровращающимся деталям (10 000 об/мин и более) и требуют выполнения технических требований на изготовление со стопроцентной надежностью [7].

Турбинные диски работают в сложных напряженных состояниях с силовым воздействием на них разнообразных факторов:

- 1) центробежных сил вращающихся масс самих дисков и закрепленных в них лопаток;
- 2) температурных напряжений, вызываемых неравномерным нагревом дисков по радиусу и толщине;
- 3) напряжений, вызываемых изгибными усилиями потока газов;
- 4) резонансных колебаний и вибраций на разных режимах работы двигателя.

Конструктивно диск состоит из обода, полотна и ступицы. По периферии диска расположены замковые пазы, предназначенные крепления пятидесяти рабочих лопаток ротора, а также пазы для размещения пластинчатых замков для осевой фиксации лопаток (рисунок 1).

Материал – жаропрочный сплав ХН62БМКТЮ-ИД на основе никеля [8, 9]. Этот сплав используется для изготовления дисков наземных газотурбинных двигателей (газоперекачивающих агрегатов, газотурбинных приводов электростанций).

Наиболее ответственной в технологии обработки турбинных дисков является операция формирования замковых пазов. Обработка пазов производится традиционно методом протягивания, что и стало одним из недостатков технологического процесса изготовления детали «Диск». Так для предварительного формирования клинового паза требуется применение большого количества дорогостоящих протяжек в трудно автоматизируемом технологическом процессе обработки. В связи с малой долговечностью используемых протяжек и их высокой стоимостью было предложено заменить операцию протяжки канавок электроэрозионной проволоочной резкой и определить оптимальные режимы обработки для получения требуемого качества обрабатываемой поверхности.

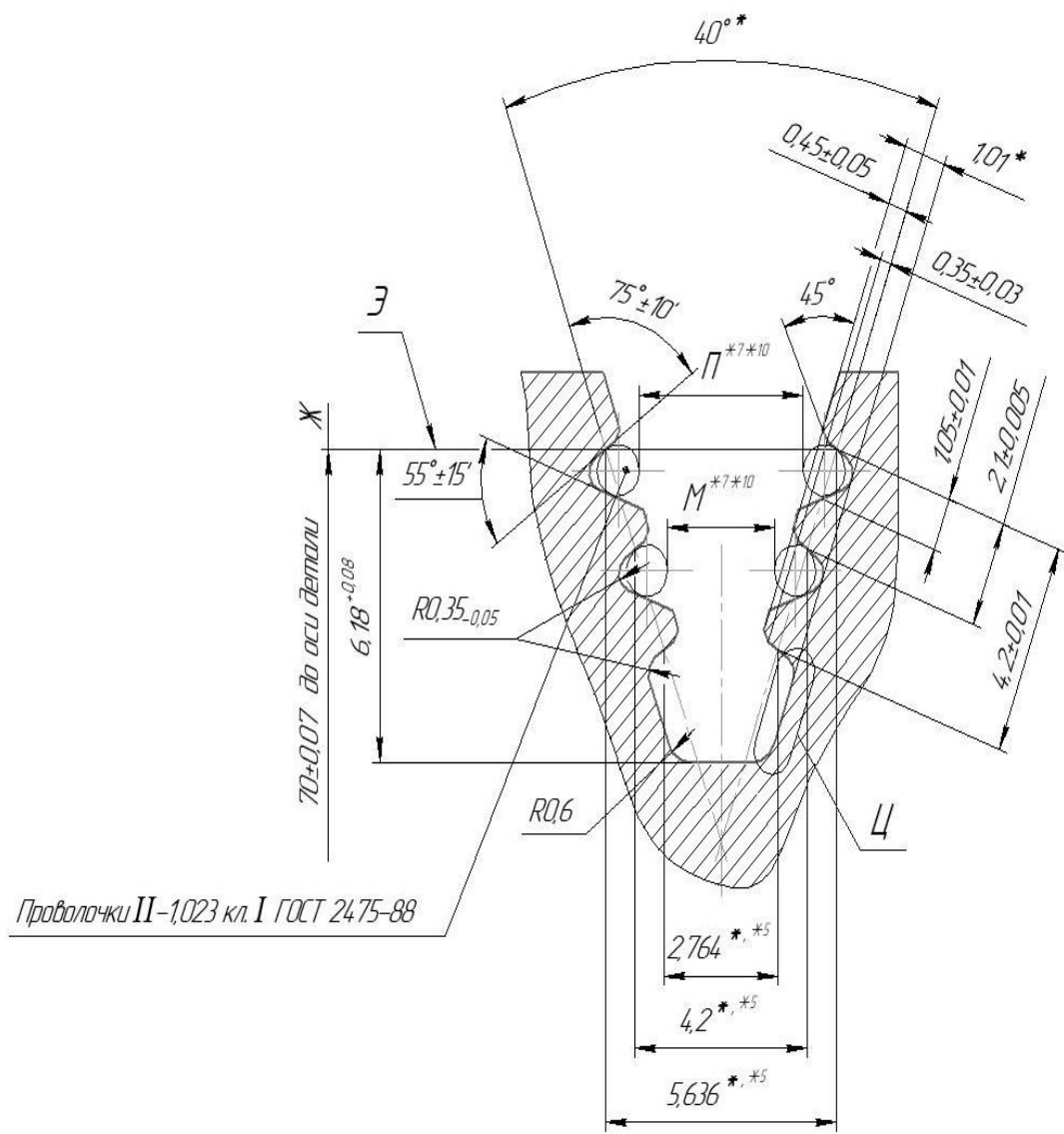


Рисунок 1 – Объект исследования – елочный паз детали «Диск»

Преимущества электроэрозионной проволочной резки по сравнению с протягиванием следующие [10]:

- возможность обработки материалов повышенной твердости;
- возможность формирования пазов с острыми углами сверхмалых радиусов;
- большая глубина обработки.

Первоначальной задачей проведенных исследований являлось установление значимых факторов, влияющих на шероховатость канавок детали

«Диск».

Для установления значимых факторов, влияющих на шероховатость канавок детали «Диск», авторы статьи провели априорное ранжирование факторов с привлечением специалистов в области электроэрозионной обработки [11].

В Результате априорного ранжирования факторов установлено, наиболее значимыми факторами являются: сила тока (x_1), расстояние между электродом и заготовкой (x_2), скорость промотки проволоки (x_3).

Для описания влияния параметров режима электроэрозионной обработки на шероховатость поверхности, было выполнено математическое моделирование с применением симплекс-решетчатого плана [12]. Промышленный эксперимент проводился на электроэрозионном проволочно-вырезном станке Sodick AG400L. В качестве электрода-инструмента использовалась латунная проволока диаметром 0,3 мм.

Факторы для проведения промышленного эксперимента – сила тока (x_1), расстояние между электродом и заготовкой (x_2), скорость промотки проволоки (x_3).

Уравнение регрессии описывается полином вида:

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2, \quad (1)$$

Математическая зависимость, описывающая влияние параметров режимов на шероховатость замковых пазов, была получена при помощи программного комплекса Statistica 6.0 и имеет следующий вид:

$$y = 1,475x_1 + 1,975x_2 + 1,75x_3 - 2,5x_1x_2 - 2,45x_1x_3 - 4,25x_2x_3. \quad (2)$$

Адекватность полученных математических моделей проверена путем сравнения расчетных значений t -критерия Стьюдента. $t_{pRa} = 1,46$ с табличным значением $t_{0,05;10} = 2,228$ при 5 % – уровне значимости. Т.к. расчетные значение t -критерия меньше табличного, следовательно, полученные уравнения регрессии следует признать адекватными.

Оптимальный режим обработки для достижения параметра шероховатости $Ra \leq 1,5$ мкм был определен решением уравнения (2) путем

переборки всех значений факторов x_1, x_2, x_3 .

Режим, обеспечивающие максимальную производительность обработки и позволяющие достигнуть требуемого значения параметра шероховатости $Ra = 1,5$ мкм: сила тока – 9 А, расстояние между электродом и заготовкой – 18 мкм, скорость промотки проволоки – 82,5 м/мин.

Выводы

1) наиболее значимыми факторами, влияющими на шероховатость замковых пазов детали «Диск» после электроэрозионной обработки являются – сила тока, расстояние между электродом и заготовкой, скорость промотки проволоки;

2) в результате проведения промышленного эксперимента с применением симплекс-решетчатого плана было получена математическая зависимость, описывающая влияние силы тока, расстояния между электродом и заготовкой, скоростью промотки проволоки на шероховатость замковых пазов детали «Диск» после электроэрозионной обработки;

3) в результате решения полученной зависимости были получены параметры режима электроэрозионной обработки замковых пазов детали «Диск», обеспечивающие максимальную производительность обработки и позволяющие достигнуть значения параметра шероховатости $Ra = 1,5$ мкм: параметр тока (сила тока) – 9 А, расстояние между электродом и заготовкой – 18 мкм, скорость промотки проволоки – 82,5 м/мин.

Список литературы

1. Турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания АЛ-31Ф / под ред. А. П. Назарова. – Москва: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1987. – 363 с. – Текст : непосредственный.

2. Зарипов, Н. Г. Перспективные материалы для авиационной техники. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. – 144 с. – Текст : непосредственный.

3. Анализ влияния конструктивного облика корпуса турбины на эффективность системы регулирования радиального зазора / И. Ф. Кравченко, Ю. А. Зелёный, Р. Р. Климик [и др.]. – Текст : непосредственный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 85-89.

4. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1024 с. – Текст : непосредственный.

5. Попок, Н. Н. Способы обработки поверхностей деталей и технологическое оснащение для их реализации / Н. Н. Попок, Р. С. Хмельницкий, Г. И. Гвоздь. – Текст : непосредственный // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. В 3 т.* – Новополюк: Изд-во ПГУ, 2009. – Т. 2. – С. 315-319. – ISBN 978-985-418-831-7.

6. Капалин, Н. Ю. Определение оптимальных режимов резания при обработке сферических поверхностей деталей турбореактивных двигателей / Н. Ю. Капалин, С. В. Петроченко, М. И. Бисерикан. – Текст : непосредственный // *Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств: материалы третьей Всерос. науч.-техн. конф., 10 окт. 2019 г.* / ОмГУПС. – Омск, 2019. – С. 52–58.

7. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузменко, В. Н. Крылов [и др.]. – Текст : непосредственный / 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2007. – 539 с. – ISBN 5-217-03366-5.

8. Probabilistic fatigue life prediction and reliability assessment of a high pressure turbine disc considering load variations / Zhu Sh.-P., Liu Q., Lei Q. [et al.]. // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2018. – Vol. 27, Issue 10. – PP. 1569-1588. – DOI: 10.1177/1056789517737132.

9. Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines / Ikpe A. E., Owunna I., Ebunilo P. O. [et al.] // *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. – 2016. Vol. 1, Issue 1. – P. 19. – DOI: 10.11648/j.ajmie.20160101.11.

10. Елисеев, Ю. С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин / под ред. Б. П. Саушкина. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 437 с. – ISBN 978-5-7038-3425-1.

11. Щекин А. В. Априорное ранжирование факторов / А. В. Щекин. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2004. – 12 с. – Текст : непосредственный.

12. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – Москва: Наука, 1976. – 390 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петроченко Сергей Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-18

E-mail: c.o.r.d.8477@gmail.com

Аблялимов Олег Сергеевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

ул. Адылходжаева, д. 1, г. Ташкент, 100067,

Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТГТУ.

Тел. +998 71-299-00-01

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Кодиров Нозимжон Солиевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

ул. Адылходжаева, д. 1, г. Ташкент, 100067,

Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство».

Тел. +99891-410-14-94

E-mail: nazimzhank@bk.ru

Рахмаев Рахимжан Имнахунович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Студент группы 18к ОмГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrochenko Sergei Valeryevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department « Technologies of transport engineering and rolling stock repair» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-18

E-mail: c.o.r.d.8477@gmail.com

Ablyalimov Oleg Sergeyeovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

st. Adylkhodzhaeva, 1, Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, professor of the department «Locomotives and locomotive economy» TSTU.

Phone: +998 71-299-00-01

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Kodirov Nozimjon Solievich

Tashkent State Transport University (TSTU).

st. Adylkhodzhaeva, 1, Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Assistant of the department «Locomotives and locomotive economy» TSTU.

Phone: +99891-410-14-94

E-mail: nazimzhank@bk.ru

Rakhmaev Rakhimzhan Imnakhunovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Student group 18k OSTU.

К. В. Аверков¹, Д. В. Уракова¹, В. С. Кочура², Т. Г. Бунькова¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация,

²Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Цель статьи – выбор способа селективного лазерного спекания, подходящего для изготовления корпусных деталей, а также анализ механических характеристик деталей, полученный с помощью селективного лазерного спекания в зависимости от технологических параметров изготовления.

Ключевые слова: аддитивная технология, корпус, механическая обработка, порошковая металлургия, спекание, механические свойства, пористость.

**Konstantin V. Averkov¹, Darya V. Urakova¹, Victoria S. Kochura²,
Tamara G. Bunkova¹**

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURE OF HOUSING PARTS

The purpose of the article is to select a selective laser sintering method suitable for the manufacture of body parts, as well as an analysis of the mechanical characteristics of parts obtained using selective laser sintering, depending on the technological parameters of manufacturing.

Keywords: additive technology, body, machining, powder metallurgy, sintering, mechanical properties, porosity.

Производство корпусных деталей – это сложный и дорогостоящий процесс, включающий операции литья или сварки, фрезерования базовых поверхностей, расточки отверстий. Как правило, корпус является наиболее

массивной деталью конструкции, а точность изготовления его базовых поверхностей напрямую влияет на рабочие характеристики всего механизма. Метод получения заготовки имеет первостепенное значение при производстве корпусов.

Детали данного типа должны обеспечивать точность взаимного расположения отдельных элементов, как в состоянии покоя, так и в динамическом режиме работы машины. В то же время известно, что для всех методов заготовительного производства характерно наличие остаточных напряжений в заготовке. Постепенно релаксируясь, эти напряжения «выходят наружу» в виде деформаций, что приводит к смещению деталей и узлов всего механизма, изменению характера их взаимодействия. Это непосредственно влияет на эксплуатационные показатели и ресурс всей машины.

Активное применение аддитивных технологий открывает новые возможности заготовительного производства, не исключая, при этом, необходимости дальнейшей механической обработки.

В соответствии со служебным назначением и особенностями конструкции корпусные детали можно разделить на группы. Типовые представители групп корпусных деталей показаны на рисунке 1.

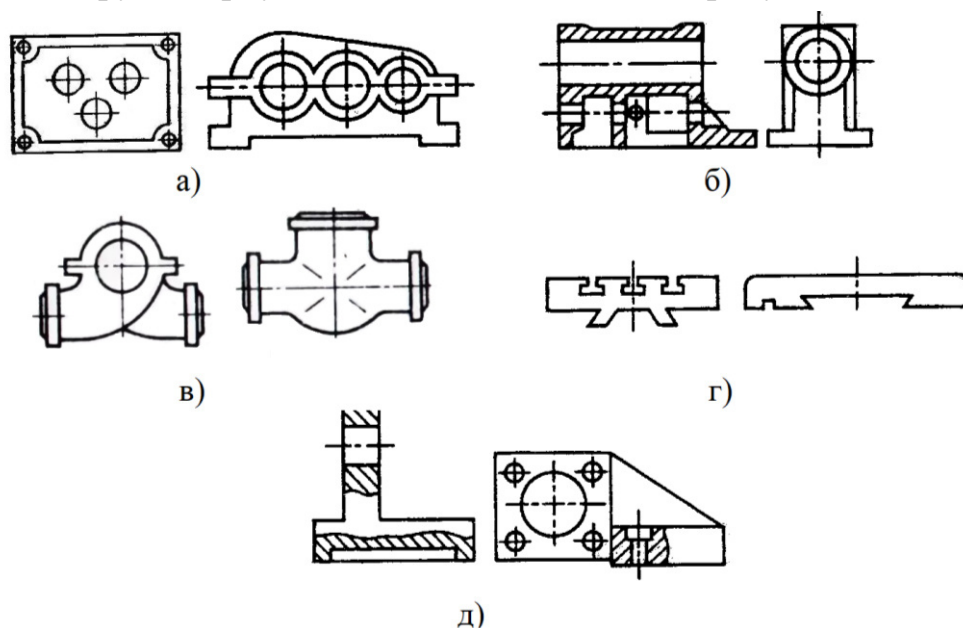


Рисунок 1 – Группы корпусных деталей:

- а – цельные и разъемные детали коробчатой формы; б – детали с гладкими внутренними цилиндрическими поверхностями; в – корпуса сложной геометрической формы;
- г – с направляющими поверхностями; д – корпусные детали типа плит, крышек, кронштейнов

К первой группе относятся корпуса коробчатой формы (рисунок 1, а). Для повышения жесткости в таких корпусах используют стенки, рёбра и перегородки. Корпусы могут быть цельными, разъёмными, плоскость разъёма проходит по осям главных отверстий для обеспечения возможности сборки.

Вторая группа включает корпусные детали с гладкими внутренними цилиндрическими поверхностями (рисунок 1, б), к которым предъявляют повышенные требования точности диаметров и геометрической формы.

Третья группа – корпуса сложной геометрической формы, представлены на рисунке 1, в. Группа включает корпуса паровых и газовых турбин, насосов, коллекторов, вентилях, кранов. Сложная форма объясняется необходимостью формирования потоков движения жидкостей или газов.

Четвёртая группа образована деталями с направляющими поверхностями (рисунок 1, г), такими как столы, каретки, суппорты. Эти детали обеспечивают перемещение режущего инструмента и обрабатываемых заготовок, совершая возвратно-поступательные или вращательные движения по направляющим поверхностям. Детали такого типа входят в состав большинства станков. Жесткость корпусов четвёртой группы обеспечивают рёбрами и внутренними перегородками.

К пятой группе относят корпусные детали типа кронштейнов, угольников, стоек плит и крышек, (рисунок 1, д). Эти детали имеют простую конструкцию и выполняют опорные функции для обеспечения точного расположения отдельных механизмов, зубчатых колёс, валов.

К деталям типа корпус предъявляются следующие общие технические требования, характеризующие геометрическую точность их конструкции.

1. Точность геометрической формы плоских базирующих поверхностей. Допускаются отклонения от параллельности и плоскости до 0,07 мм для поверхностей размером не более 500 мм и до 0,005 для ответственных корпусов [1].

2. Точность относительного поворота плоских базирующих поверхностей. Допускаются отклонения от параллельности или перпендикулярности плоских поверхностей относительно друг друга 0,1 мм на 200 мм длины, для деталей высокой точности – от 0,003 до 0,01 мм на 200 мм длины.

3. Допуск параллельности базовых поверхностей: 0,005 – 0,01 мм.

4. Точность геометрии отверстий и их диаметров. Главные отверстия должны соответствовать квалитетам с 6 по 11. Овальность отверстий в

поперечном сечении и их конусообразный вид или изогнутость в продольном не должны превышать половины допуска на диаметр отверстия [1].

5. Относительное угловое положение осей отверстий. Предел отклонения осей главных отверстий от параллельности и перпендикулярности к плоским поверхностям находится в диапазоне 0,01 – 0,15 мм на длину 200 мм, а угловые отклонения оси отверстий относительно друг друга не должны превышать значения 0,1 мм на 200 мм.

6. Точность расстояния осей главных отверстий до плоскости базирования должна быть в диапазоне 0,02 – 0,5 мм. Допуск на межосевое расстояние для главных отверстий в пределах 0,01 – 0,15 мм. Допуск соосности отверстий от 0,002 до 0,05 мм.

7. Для плоских базирующих поверхностей шероховатость после обработки $Ra = 2,5 - 0,63$ мкм, поверхности главных отверстий должны соответствовать шероховатости $Ra = 1,25 - 0,16$.

Для изготовления корпусных деталей используют такие материалы, как ковкий и серый чугун, сплавы цветных металлов, легированные и углеродистые стали. В основном заготовки корпусов машин получают сваркой и литьем.

Литые заготовки изготавливают литьём в песчано-глинистые формы, литьем под давлением, литьем по выплавляемым моделям и оболочковые формы. Материалы для отливок: чугуны, стали, бронза, латунь, магниевые и алюминиевые сплавы. Детали небольшого размера можно изготовить ковкой, горячей объёмной или холодной листовой штамповкой. Сварка используется в мелкосерийном производстве, в случаях, когда изготовление литьём нецелесообразно.

В основном для изготовления корпусов применяют чугуны марок СЧ 12, СЧ 18 и СЧ 35 литейные стали марок 40Л, 40КЛ и ковкие чугуны. Корпусы небольшой массы изготавливают из алюминиевых и магниевых сплавов.

В последнее время все более широкое применение находят алюминиевые сплавы, такие как АЛ4, АЛ8, АЛ9, АЛ19. Эти материалы обладают высокими литейными качествами, коррозионной стойкостью, обрабатываемостью, легкостью.

Технологический процесс обработки корпусных деталей включает следующие операции:

- 1) обработка базовых плоскостей;
- 2) обработка основных отверстий;
- 3) черновая и чистовая обработка прочих поверхностей и крепежных отверстий;

В качестве роли баз выбирают поверхности, от которых задано положение большинства других поверхностей.

Для изготовления корпусных деталей из алюминиевых сплавов наилучшим образом подходит технология Bed Deposition. Технология основана на предварительном формировании равномерного слоя порошкового материала с помощью ролика или ножа с последующим селективным спеканием частичек порошка в соответствии с текущим сечением 3D-модели изделия [2]. Порошковый материал наносится на специальную платформу. В процессе изготовления изделия положение плоскости построения не изменяется, вместо этого платформа перемещается в вертикальном направлении.

Среди методов технологии Bed Deposition для применения в рассматриваемом случае лучше всего подходят: селективное лазерное плавление (SLM), послойное напыление (FDM), осаждение металлических частиц из газопорошковой струи (DMD).

SLM (Selective Laser Melting) – селективное лазерное плавление металлического порошка по математическим САD-моделям под действием мощного лазерного излучения. В результате такого воздействия частицы порошка сплавляются, образуя однородную структуру. Процесс выполняется в камере SLM-машины (рисунок 2), заполненной инертным газом.

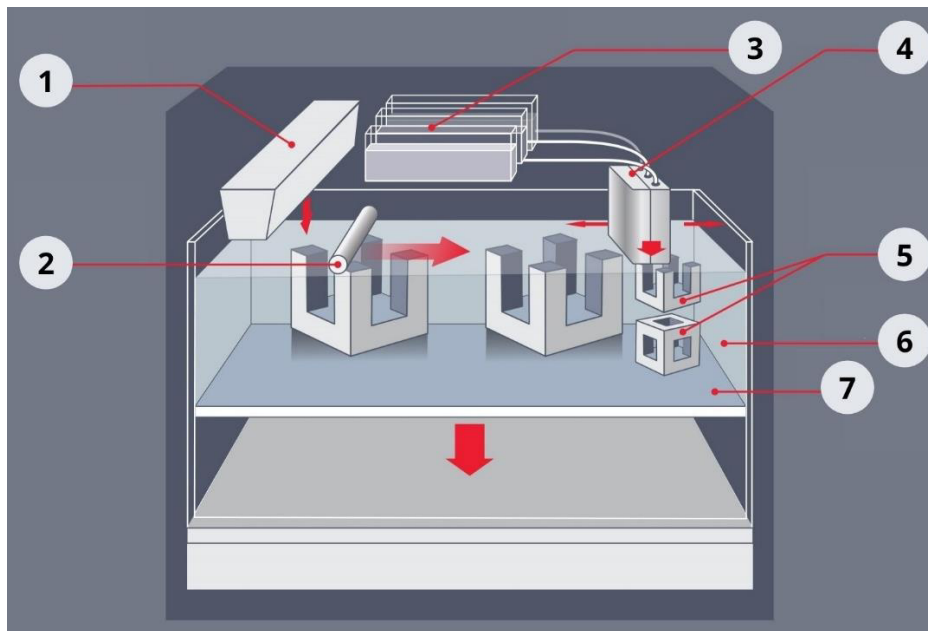


Рисунок 2 – Схема построения изделия SLM-методом:

- 1 – камера с материалом; 2 – рекоутер; 3 – система лазеров; 4 – сканирующее зеркало;
5 – изделие; 6 – камера построения; 7 – платформа построения

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод формирования объекта путём послойного наплавления нити, изготовленной из нужного сплава. Схема построения изделия FDM-методом представлена на рисунке 3.

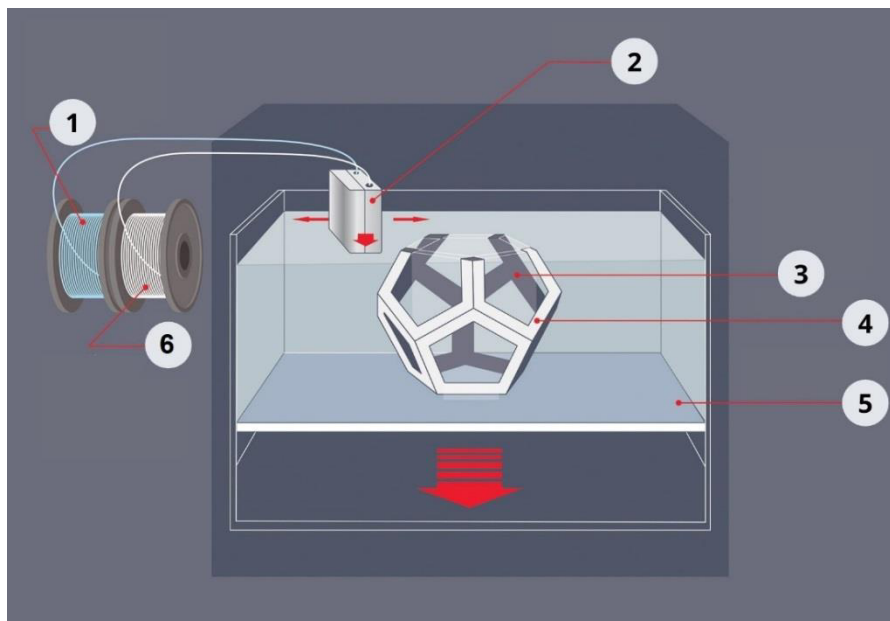


Рисунок 3 – Схема построения изделия FDM-методом:

- 1 – катушка с материалом поддержки; 2 – экструдер; 3 – поддержка;
4 – модель; 5 – платформа построения; 6 – катушка с материалом модели

Перед началом печати модель автоматически разделяется на горизонтальные слои и производится расчет путей перемещения печатающей головки. Материал подаётся в экструдер (нагревающая головка), который выдавливает на охлаждаемую платформу тонкую нить расплавленного материала, формируя слой согласно данным модели. Затем платформа опускается на толщину одного слоя, чтобы нанести следующий.

После завершения процесса построения с готового изделия удаляют вспомогательные конструкции, если необходимо, проводят окончательную обработку.

DMD (Direct Metal Deposition) – метод прямого осаждения материала из газопорошковой струи металлических частиц. Луч лазера, управляемый компьютером, перемещается в соответствии с геометрией детали. Струя частиц подается в ту же область, куда подводится энергия лазера. Лазер оплавляет участок выращиваемого изделия, образуя локальную ванну жидкого расплава. В расплав струей инертного транспортирующего газа вдувается порция

металлического порошка. Изделие получается однородным и обладает высокой прочностью.

Материал для изготовления металлических изделий представляет собой мелкодисперсный металлический порошок с размером частиц величиной от 4 до 80 мк. Размер зерна определяет толщину будущего изделия.

В табл. 1 приведен химический состав порошков алюминиевых сплавов, применяемых при 3-D печати.

Таблица 1

Химический состав порошков алюминиевых сплавов

Материал	Элемент, %								
	Al	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Zn	Ni	Другие
AlSi10Mg	основа	11-9	0,55	0,45-0,2	0,45	0,15	0,1	0,05	0,3
AlSi9Cu3	основа	11-8	1,3	0,55-0,05	0,55	4-2	1,2	0,25	0,55
AlSi12	основа	13,5-10,5	0,55		0,35	0,05	0,1	0,15	
Материал	Элемент, %								
	Al	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Zn	Ni	Другие
AlSi9Cu3	основа	11-8	1,3	0,45-0,2	0,45	0,15	0,1	0,05	0,3

Процесс производства деталей методом селективного лазерного спекания имеет много общего с порошковой металлургией. При этом протекают принципиально похожие процессы переноса вещества: перемещение через газовую фазу; поверхностная или объёмная диффузия; течение, вызванное внешними нагрузками или вязкое течение [3].

Можно выделить некоторые особенности процесса лазерного спекания. Например, параметры структуры можно контролировать в каждом слое, регулируя параметры процесса. К ним можно отнести все характеристики влияющие на изменение температуры, скорости и направления отвода тепла при кристаллизации [4].

Наличие остаточной пористости является характерной особенностью деталей, изготовленных методом селективного лазерного плавления, так как пористость снижает механические свойства материала.

Поры могут образовываться в результате недостаточной энергии лазера, в результате частицы металлического порошка расплавляются не полностью. Для предотвращения образования дефектов такого типа необходимо

оптимизировать SLM-процесс индивидуально под каждый вид сплава, а также подбирать параметры печати, размер частиц порошка, учитывать его химический состав и газ для заполнения рабочей камеры.

Результаты

Уравнение зависимости механических свойств порошкового материала от его пористости:

$$\sigma_i = \sigma_{0i} (1 - \Pi)^2 \exp(-B \cdot \Pi), \quad (1)$$

где σ_i – некоторое механическое свойство пористого материала;

σ_{0i} – то же свойство материала с беспористой структурой;

Π – доля пор в материале;

B – коэффициент, определяемый условиями получения и испытания материала.

Рассмотрим влияния пористости на механические свойства материалов на примере порошковой стали марки СП60ХН3М. Из справочных данных были получены графики зависимости таких характеристик как: прочность, относительное удлинение и сужение, а также ударная вязкость от размеров пор материала. На графиках, изображенных на рисунках 4-7 также отмечены характеристики материалов, изготовленных традиционным методом.

Как видно на графиках, при достижении минимальной пористости механические характеристики изделий из порошковых материалов практически не уступают характеристикам изделий, изготовленных по традиционной технологии.

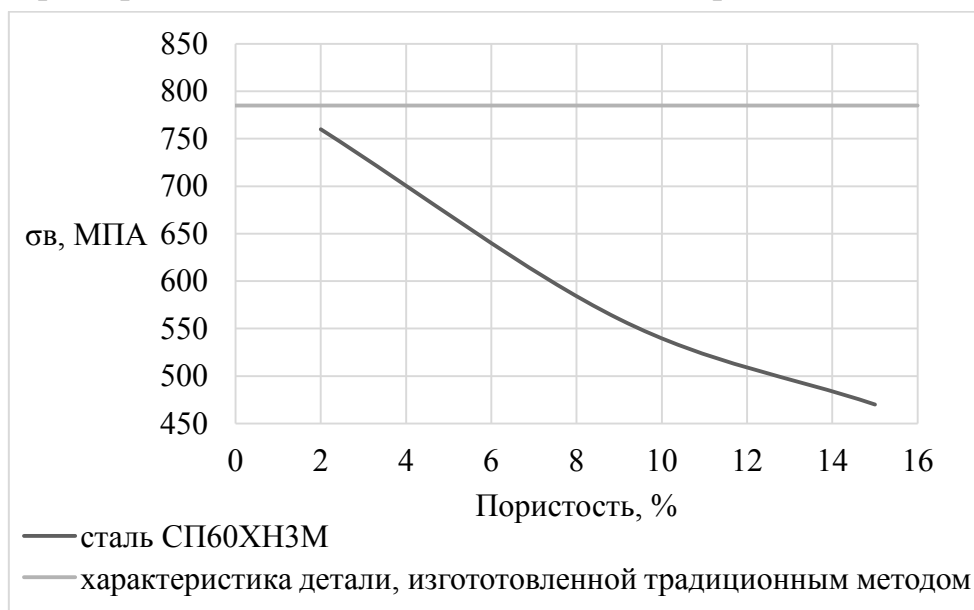


Рисунок 4 – Влияние пористости на прочность материала

На рисунке 5 показан график зависимости относительного удлинения от доли пористости материала.

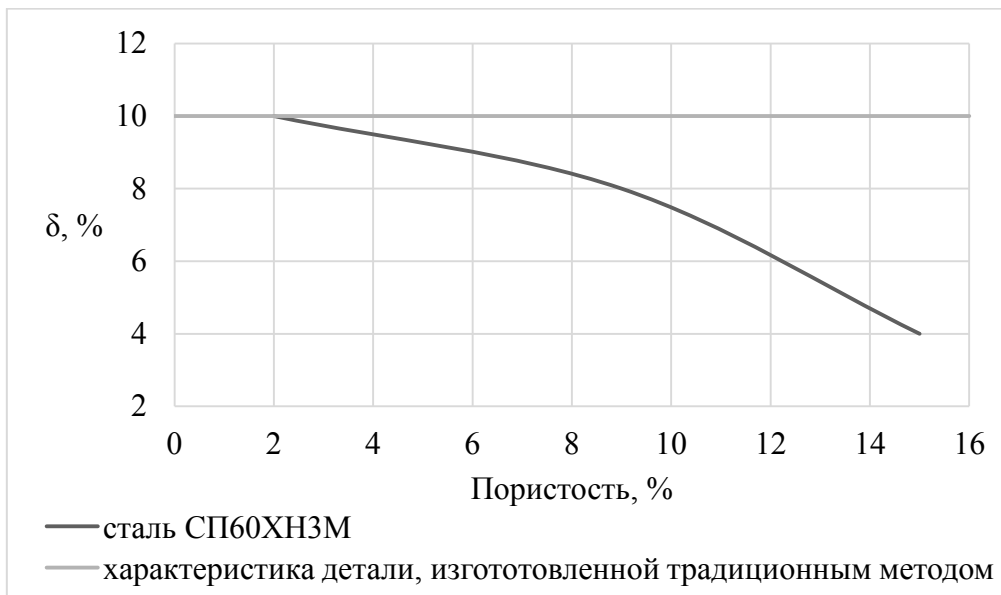


Рисунок 5 – Влияние пористости на относительное удлинение материала

На рисунке 6 представлен график зависимости относительного сужения от доли пористости материала.

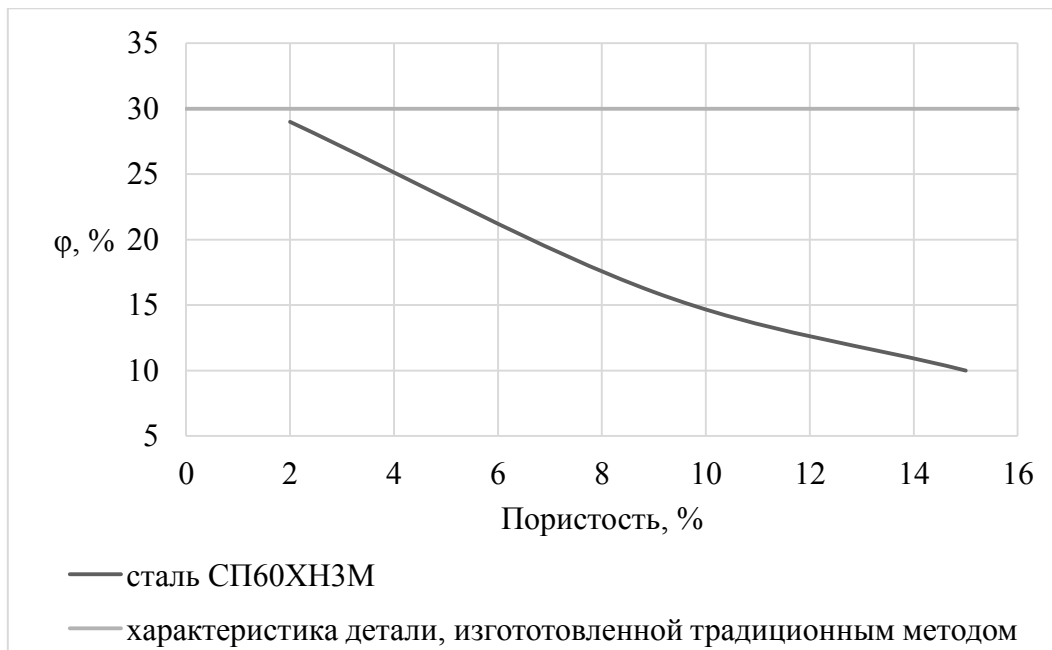


Рисунок 6 – Влияние пористости на относительное сужение

График зависимости ударной вязкости материала от его пористости представлен на рисунке 7.

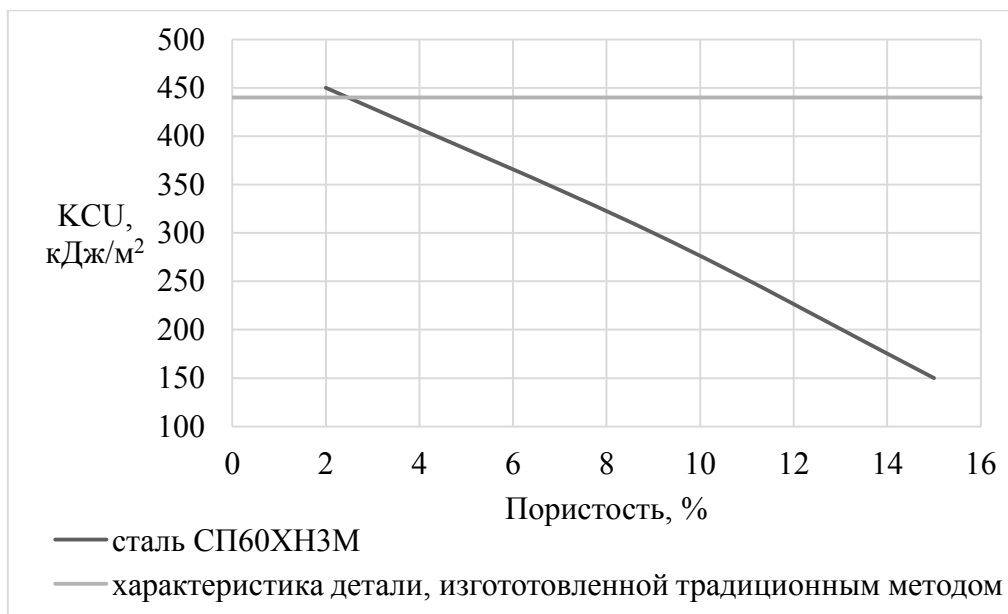


Рисунок 7 – Влияние пористости на ударную вязкость

Из приведенных данных видно, что существенное влияние на механические свойства деталей, полученных методами аддитивных технологий, оказывает пористость их структуры.

Оценить объем пор в структуре материала, полученного селективным лазерным сплавлением можно, анализируя изображения, полученные при большом увеличении.

Следует отметить, что применение аддитивных технологий не исключает необходимости применения дальнейшей механической обработки с использованием металлорежущего оборудования.

Список литературы

1. Андреев, В. И. Детали машин и основы конструирования. Курсовое проектирование: учебное пособие / В. И. Андреев. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 352 с. – Текст : непосредственный.
2. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О. Н. Гончарова, Ю. М. Бережной, Е. Н. Бессарабов, Е. А. Кадамов [и др.]. – Текст : электронный // Научная электронная библиотека «Киберленинка». – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii> (дата обращения: 25.04.2021).
3. Гиршов, В. Л. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие / В. Л. Гиршов, С. А. Котов. – Санкт-Петербург.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 385 с. – Текст : непосредственный.

4. DebRoy, T. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee // Progress in Materials Science. – 2018. – №92. – PP. 112-224.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аверков Константин Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-18
E-mail: averok@yandex.ru

Уракова Дарья Витальевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Ведущий сервис-инженер по
информационным системам.
E-mail: dashaurakova97@gmail.com

Кочура Виктория Сергеевна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская
Федерация.
Преподаватель кафедры «Инженерная
геометрия и САПР» ОмГТУ.
E-mail: Kulikova.v.s@mail.ru

Бунькова Тамара Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры «Вагоны и
вагонное хозяйство» ОмГУПС.
E-mail: bunkovatg@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Averkov Konstantin Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of «Technologies of
Transport Engineering and Repair of rolling
stock» OSTU.
Tel.: +7 (3812) 31-06-18
E-mail: averok@yandex.ru

Urakova Darya Vitalievna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Leading service engineer for information
systems.
E-mail: dashaurakova97@gmail.com

Kochura Victoria Sergeevna

Omsk State Technical University (OmSTU).
Mira ave., 11, Omsk, 644050, the Russian
Federation.
Teacher of the department «Engineering
Geometry and CAD» OmSTU.
E-mail: Kulikova.v.s@mail.ru

Bunkova Tamara Gennadievna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Senior lecturer of the department «Wagons and
wagon economy» OSTU.
E-mail: bunkovatg@mail.ru

П. К. Шкодун

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Статья посвящена совершенствованию методики контроля качества ремонта коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава. В статье представлена пятиэтапная методика контроля качества ремонта, включающая фиксацию мгновенных значений высот коллекторных пластин за несколько оборотов якоря электрической машины в виде профилограмм при одинаковой частоте вращения якоря электродвигателя, вычисление мгновенных значений второй производной функции профиля коллектора, упорядочение мгновенных значений второй производной профиля коллектора по возрастанию, а также вычисление предложенного диагностического параметра – среднего квадратического отклонения отрицательных мгновенных значений второй производной. Приведены результаты экспериментальных исследований для тяговых электродвигателей ТЛ-2К, ЭК-810Ч, ЭД-133 и представлены результаты применения предлагаемой методики контроля качества ремонта и расчета предложенного диагностического параметра.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, диагностический параметр, качество ремонта, профиль коллектора.

Pavel K. Shkodun

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT QUALITY CONTROL TECHNIQUE OF REPAIR OF THE ROLLING STOCK TRACTION ELECTRIC MOTORS

The article is devoted to the improvement of the quality control technique for the collector of traction electric motors of rolling stock. The article presents a five-stage method for generating data for analyzing the dynamic effect of the collector profile on the brush, including fixing the instantaneous values of the heights of the collector plates for several revolutions of the electric machine armature in the form of profilograms at the same frequency of rotation of the electric motor armature, calculating the instantaneous values of the second derivative of the collector

profile function, ordering instantaneous the values of the second derivative of the reservoir profile ascending, as well as the calculation of the proposed diagnostic parameter - the standard deviation of the negative instantaneous values of the second derivative. The results of experimental studies for traction electric motors TL-2K, EK-810Ch, ED-133 are presented and the results of applying the proposed methodology and calculating the proposed diagnostic parameter are presented.

Keywords: traction motor, diagnostic parameter, quality of repair, collector profile.

Ремонт и техническое обслуживание подвижного состава железных дорог России осуществляется в различных локомотивных сервисных депо, при этом функционирование тяговых электродвигателей (ТЭД) подвижного состава определяется качеством проведенных ремонтных мероприятий и совершенством системы технического диагностирования. Действующая в настоящее время стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года предполагает совершенствование и разработку инновационных диагностических систем [1]. На работу якоря и коллекторно-щеточного узла ТЭД значительное влияние оказывает профиль коллектора, причем в процессе эксплуатации возможно значительное динамическое воздействие, создаваемое профилем коллектора из-за изменения микрогеометрии в расположении ламелей и механических усилий, приложенных к пластинам коллектора [2].

Актуальная технологическая документация по ремонту ТЭД, действующая в сервисных локомотивных ремонтных депо и локомотиворемонтных заводах, предусматривает сравнение измеренных значений биения в холодном и горячем состояниях и разности между биением в холодном и горячем состоянии с нормами [3]. Достоверная и объективная регистрация профиля коллектора возможна путем измерения расстояния между плоскостью коллекторной пластины и уровнем щеткодержателя с помощью прибора ПКП-7Ц (разработан на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПСа и является усовершенствованной версией прибора [4]). Регистрация профиля коллектора с помощью прибора наиболее полно характеризует воздействие профиля коллектора на щетку и определяет качество отремонтированного ТЭД. Известны научные исследования (например, [2]), в которых предлагается оценивать контактирование щетки и коллектора по минимальному значению второй производной функции профиля коллектора.

Тем не менее, такая оценка является точечной, поэтому целью статьи является решение задачи по совершенствованию методики контроля качества ремонта коллектора ТЭД путем оценки технического состояния профиля коллектора и определения качества выполненного ремонта коллектора. Для определения диагностических параметров используется программа *Profilometr*, внешний вид которой приведен на рисунке 1.

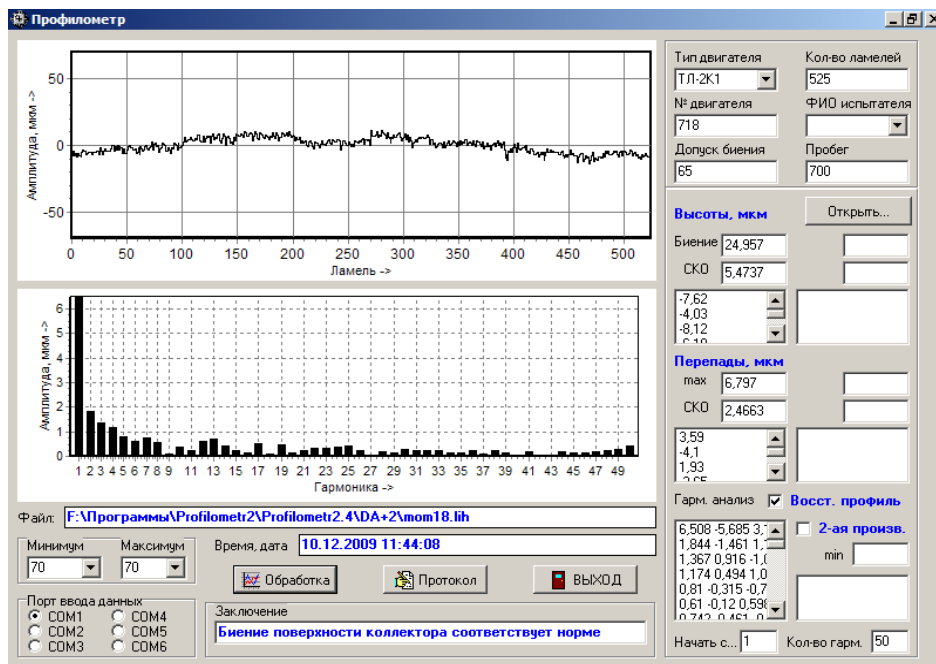


Рисунок 1 – Основной рабочий экран программы *Profilometr*

Для достижения указанной цели предлагается сформировать методику контроля качества ремонта путем анализа зафиксированных профилограмм коллектора за несколько оборотов вращения якоря ТЭД с одинаковой частотой. Разрабатываемая методика заключается в том, что оценку качества ремонта коллектора ТЭД предлагается производить по предлагаемому значению среднего квадратического отклонения отрицательных значений второй производной функции профиля коллектора, что позволит количественно определить критерий, характеризующий возможность отрыва щетки от коллектора. Отметим, что положительные мгновенные значения второй производной функции профиля коллектора характеризуют лучшие условия для контактирования щетки и коллектора: в этом случае щетка движется к коллектору. Рассмотрим поэтапную последовательность вычислений для реализации предлагаемой методики.

Первый этап. С помощью прибора контроля профиля коллектора

производится запись k профилограмм за несколько оборотов якоря электрической машины, при этом поддерживается некоторая выбранная частота вращения якоря $n_{изм}$.

Второй этап. Осуществляется усреднение значений высот коллекторных пластин по всем k реализациям и формируется «усредненный» профиль коллектора, который соответствует условно «истинному» профилю коллектора, поскольку при усреднении происходит уменьшение влияния шума от мгновенных значений вибрационных составляющих.

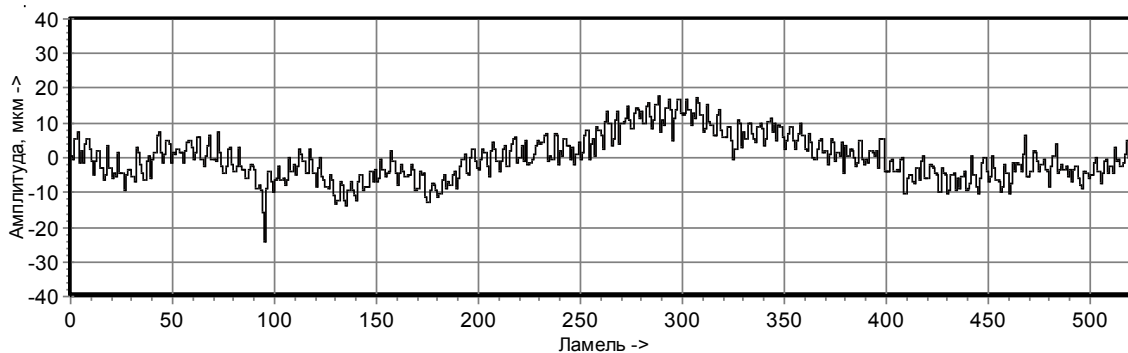
Третий этап. Выполняется расчет мгновенных значений второй производной функции профиля коллектора для условно «истинного» профиля коллектора.

Четвертый этап. Осуществляется упорядочение (сортировка по возрастанию) мгновенных значений второй производной функции профиля коллектора для полученной профилограммы.

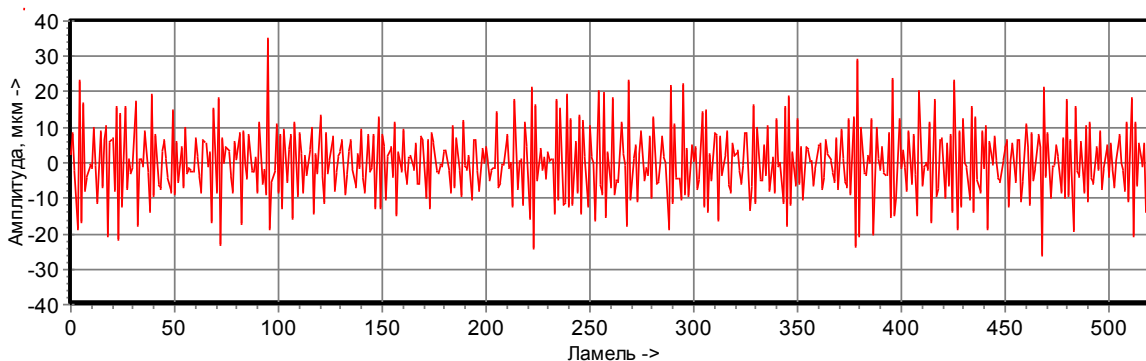
Пятый этап. Производится вычисление предложенного диагностического параметра – среднего квадратического отклонения значений второй производной функции профиля коллектора для условно «истинного» профиля коллектора $\sigma_{\dot{y}отр}$, причем расчет производится только для отрицательных мгновенных значений второй производной. По значению полученного диагностического параметра оценивается качество ремонта коллектора ТЭД.

Для реализации предложенной методики проведены экспериментальные исследования тяговых электродвигателей серии ТЛ-2К, ЭК-810Ч, ЭД-133 магистральных электровозов и тепловозов на базе сервисных локомотивных депо и локомотиворемонтного завода. В ходе эксперимента произведена регистрация профилограмм коллектора с помощью прибора ПКП-7Ц, имеющего бесконтактный вихретоковый параметрический датчик, преобразующий расстояние до поверхности в пропорциональный электрический сигнал, который записывался в энергонезависимую память встроенного в прибор накопителя информации.

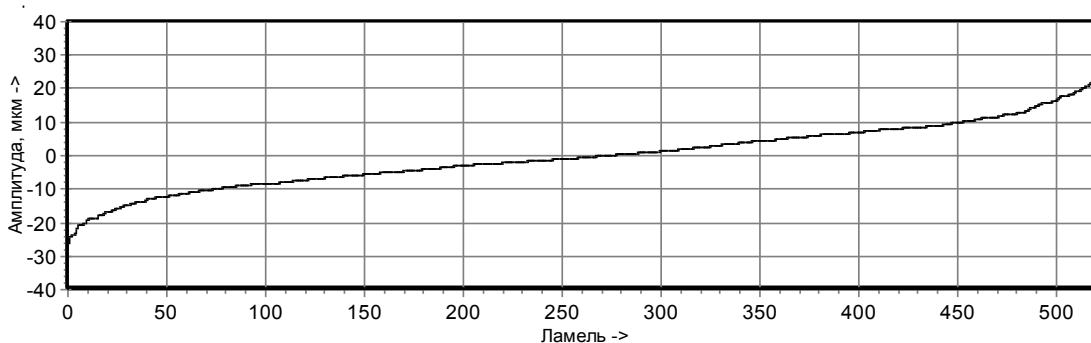
На рисунках 2, 3, 4 приведены примеры результата регистрации профилограмм исследуемых ТЭД, а также графики мгновенных значений второй производной и упорядоченных значений второй производной функции профиля коллектора.



а



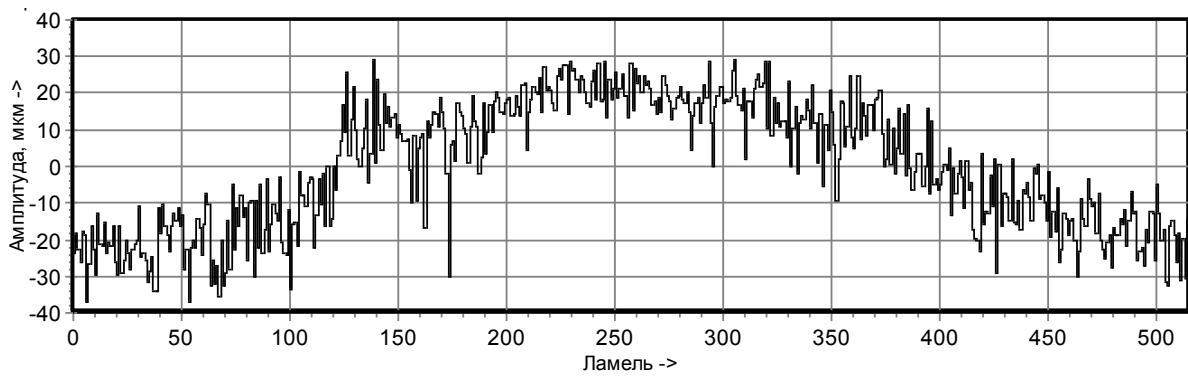
б



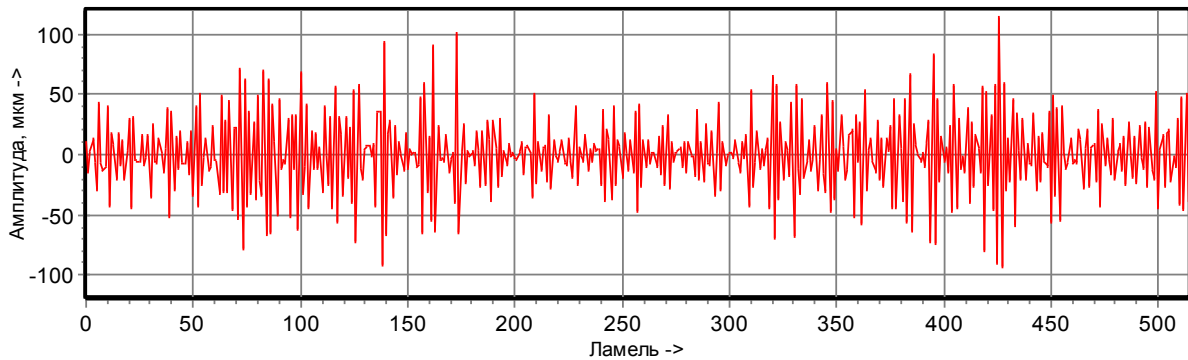
в

Рисунок 2 – Исследование профиля коллектора ТЭД ТЛ2К № 0269:
а – профиль коллектора; б – вторая производная функции профиля коллектора;
в – упорядоченные значения второй производной функции профиля коллектора

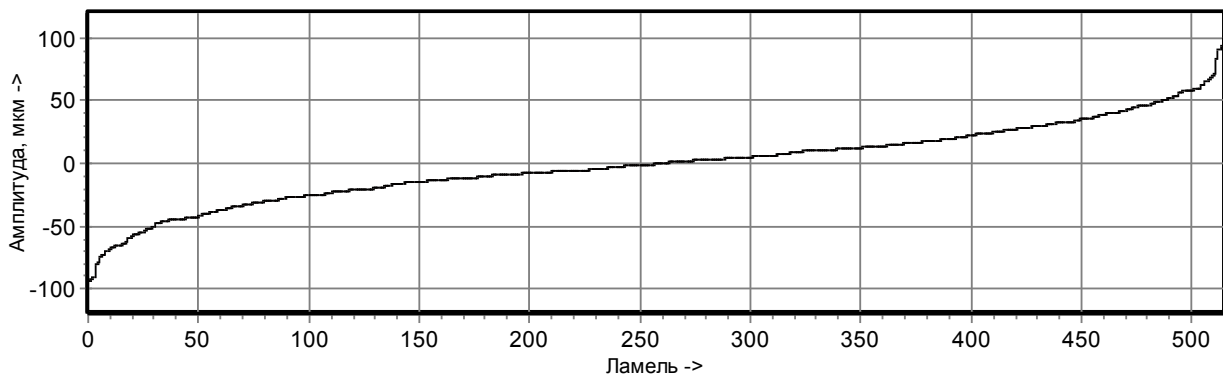
При анализе графиков упорядоченных значений второй производной функции профиля коллектора (рисунки 2, 3 и 4, графики в) установлено, что максимальные и минимальные значения указанной величины существенно различаются, что связано с текущим техническим состоянием коллектора после проведения ремонта ТЭД. Кроме того, средние значения ускорений, сообщаемых коллектором щетке, имеют различные значения: в одних случаях преобладают положительные значения, а в других – отрицательные.



а



б



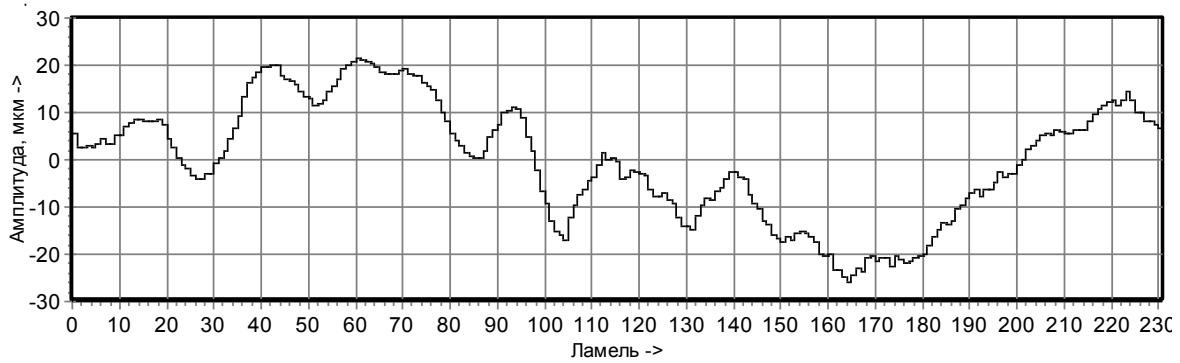
в

Рисунок 3 – Исследование профиля коллектора ТЭД ЭК810Ч № 1527:

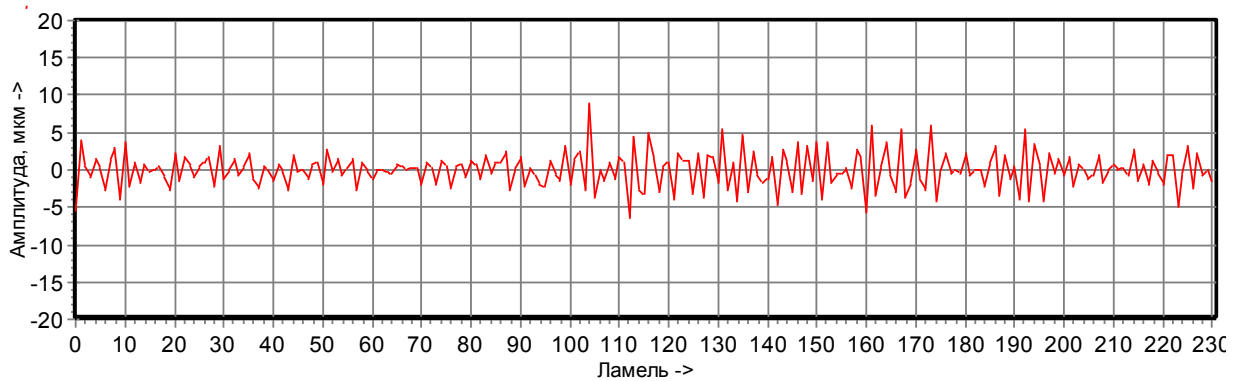
- а – профиль коллектора; б – вторая производная функции профиля коллектора;
- в – упорядоченные значения второй производной функции профиля коллектора

Численные значения диагностических параметров – минимального значения второй производной $\ddot{\eta}_{\min}$ и среднего значения второй производной, а также среднего квадратического отклонения отрицательных мгновенных значений $\ddot{\eta}_{\text{cp}}$ для различных ТЭД магистральных локомотивов представлены в табл. 1. Из приведенных значений можно сделать вывод о том, что

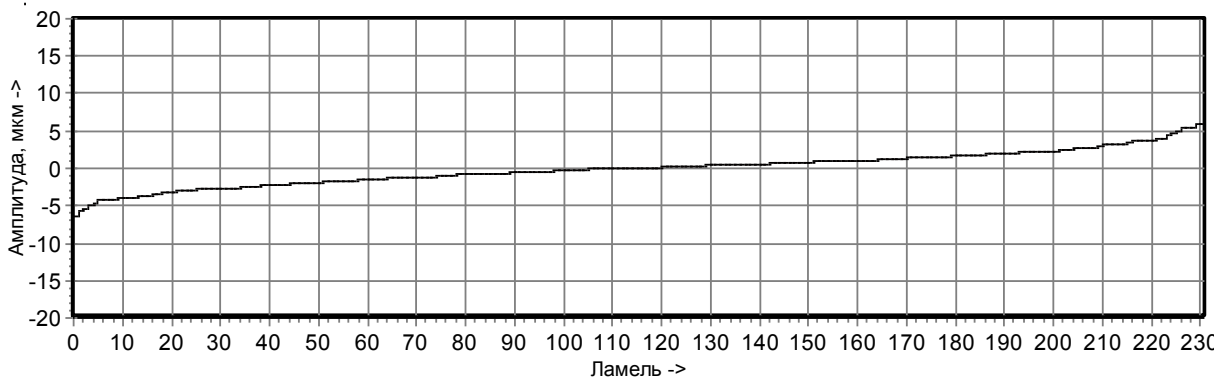
предложенная методика позволяет достоверно оценивать динамическое поведение коллектора ТЭД.



а



б



в

Рисунок 4 – Исследование профиля коллектора ТЭД ЭД133 № 3952:
а – профиль коллектора; б – вторая производная функции профиля коллектора;
в – упорядоченные значения второй производной функции профиля коллектора

Результаты расчета среднего квадратического отклонения отрицательных мгновенных значений второй производной функции профиля коллектора $\sigma_{ij\text{отр}}$ находятся в диапазоне от 5 до 8 для ТЭД ТЛ-2К, от 9 до 31 для ЭК-810Ч и от 1,2 до 5 для ЭД-133. Чем больше это значение, тем более велика вероятность

отрыва щетки от коллектора и возникновение искрения и кругового огня, что свидетельствует о возможном ухудшении качества ремонта коллектора ТЭД. С этой точки зрения наиболее подверженными влиянию динамического состояния профиля коллектора являются ТЭД типа ЭК-810Ч, а наименее подверженными – ЭД-133. Численные значения предложенного диагностического параметра позволяет выполнить сравнение качества ремонта коллектора различных ТЭД некоторой серии.

Таблица 1

Результаты расчета диагностических параметров тяговых электродвигателей

Тип ТЭД	Номер ТЭД	Значение параметра		
		$\ddot{\eta}_{\min}$, мкм/с ²	$\ddot{\eta}_{\text{ср}}$, мкм/с ²	$\sigma_{\ddot{\eta}\text{отр}}$, мкм/с ²
ТЛ-2К	0269	-29,3	-8,3	6,03
	0847	-31,3	-8,1	6,52
	1113	-54,9	-12,9	9,47
	1249	-25,4	-6,3	5,06
	3183	-26,9	-6,4	5,09
ЭК-810Ч	0335	-72,3	-22,0	16,05
	0691	-156,7	-39,4	30,99
	1527	-93,9	-22,3	19,89
	2056	-74,9	-12,8	9,93
	2093	-70,2	-17,6	12,29
ЭД-133	0572	-21,0	-6,3	4,74
	1064	-10,2	0	3,41
	1158	-6,9	1,6	1,33
	2849	-6,6	1,9	1,28
	3952	-7,4	-2,3	1,59

Таким образом, предложенная пятиэтапная методика формирования данных для анализа динамического воздействия профиля коллектора на щетку позволяет оценивать качество ремонта коллектора ТЭД магистральных локомотивов. Анализ результатов экспериментальных исследований профиля коллектора ТЭД ТЛ-2К, ЭК-810Ч, ЭД-133 подтверждает достоверность предложенного диагностического параметра – среднего квадратического отклонения отрицательных мгновенных значений второй производной и может

быть использована в качестве дополнительного параметра к известному – минимальному значению второй производной – для оценки качества ремонта коллектора ТЭД магистральных локомотивов. В развитие предлагаемой методики выполняются исследования по накоплению статистики при контроле качества проведенного ремонта ТЭД для количественной оценки предложенного диагностического параметра с целью выявления интервалов, в которых обеспечивается работоспособность ТЭД.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 29.09.2021).

2. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография / В. В. Харламов. – Омск: ОмГУПС, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.

3. Харламов, В. В. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов: монография / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, Д. А. Ахунов. – Омск, 2015. – 198 с. – Текст : непосредственный.

4. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов. – Текст : непосредственный. // Известия Транссиба. – Омск, 2013. – № 1 (13). – С. 42-48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Е. С. Ларин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДА ПРОДОРОЖКИ КОЛЛЕКТОРА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье автор приводит результаты разработки механизма автоматической подачи фрезы и шпинделя, анализа типов электропривода автоматических систем, расчета энергетических характеристик приводов подачи фрезы и шпиндельного узла, и анализ математической модели приводов постоянного тока, используемых в данных системах.

Ключевые слова: тяговый двигатель, коллектор, продорожка, межламельный промежуток, механизм подачи, фреза, привод автоматический, шпиндельный узел, точность.

Evgeny S. Larin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

TRACTION MOTOR MANIFOLD LANE DRIVE CONTROL SYSTEM

The article presents the results of the development of a mechanism for automatic feed of the cutter and spindle, analysis of the types of electric drive of automatic systems, calculation of the energy characteristics of feed drives of the cutter and spindle assembly, and analysis of the mathematical model of DC drives used in these systems.

Keywords: traction motor, manifold, groove, inter-slab gap, feed mechanism, cutter, automatic drive, spindle assembly, precision.

В тяговом электродвигателе коллектор является одним из важнейших и наиболее сложных узлов по количеству деталей, технологии изготовления и ремонта.[1]

Одной из важнейших операций является продорожка. Продорожку делают, чтобы обеспечить надежную работу двигателя. Медь мягче коллекторного миканита, поэтому вырабатывается она быстрее. Миканит, если

его не продорожить, будет выступать, щетки будут вибрировать, а коллектор-подгорать. Продорожка коллектора выполняется в приспособлении, установленном на бандажировочном станке. Коллекторный миканит срезают фрезой, укрепленной на удлиненном валу электродвигателя, помещенного на станке. Скорость вращения фрезы 3000 – 4000 об/мин. Глубина продорожки, как правило, составляет 0,8 – 1 мм.

Продорожку коллектора на токарном станке, оборудованном специальной установкой для продорожки. Дисковая фреза станка или приспособления должна располагаться строго параллельно оси коллектора. Глубину продорожки выбирают такой, чтобы после обточки коллектора глубина канавок была 1,4 – 1,6 мм для тяговых двигателей и 1,0 – 1,5 мм для вспомогательных машин. Более глубокая продорожка нежелательна, так как тогда канавка засоряется угольной пылью, что способствует перекрытиям и замыканиям между соседними коллекторными пластинами и повышенному искрению на коллекторе. При продорожке нельзя допускать подрез стенок пластин, нанесение рисок на рабочую поверхность коллектора, подрез и забоины на петушках, а также уступы по длине коллектора на дне канавки. После продорожки у стенок коллекторных пластин не должно оставаться не подрезанной слюды. Для уменьшения вероятности появления между коллекторными пластинами токопроводящих мостиков глубина межламельных канавок должна быть не более 0,5 – 0,7 мм. Однако при такой малой их глубине коллектор быстро изнашивается до уровня миканитовых прокладок. Потребуется проведение продорожки до наступления очередного планового ремонта. Такую продорожку придется проводить под локомотивом. Как показала практика, качество такой продорожки невысокое. Кроме того, выполнение этой операции требует значительной затраты времени. Для обеспечения устойчивой работы щеточно-коллекторного узла и снижения темпа износа щеток после продорожки канавок необходимо обработать углы коллекторных пластин, которые образуют режущие кромки. Для этого по всей длине рабочей части пластины снимаются фаски размером от 0,2 до 0,5 мм в зависимости от типа машин. Фаски снимают либо вручную специальным резцом, либо на приспособлении со специальной фрезой [2].

В настоящее время на железных дорогах при производстве капитального ремонта электровозных тяговых электродвигателей для продоразивания

коллектора используют специальный станок с программным управлением. Число канавок, длина хода фрезы, и глубина резания автоматически устанавливается в соответствии с типом электродвигателя. В рамках совершенствования автоматической системы продоразивания, самую важную роль следует отнести к разработке автоматического механизма подачи фрезы и шпиндельного узла.

Решение задачи должно быть выполнено по схеме: привод должен обеспечить прямолинейный рабочий ход, за время обратного хода привод поворота якоря должен обеспечить подвод следующего межламельного промежутка.

Траектория движения фрезы при обработке межламельного промежутка определяется логикой работы системы управления.

Якорь вращается и в момент, когда фреза занимает положение напротив межламельного промежутка, якорь останавливается и начинается рабочий ход, идет фрезерование паза. Когда паз обработан фреза поднимается на 3 – 4 мм и движется обратно с максимальной скоростью. В это время якорь начинает вращение к следующему пазу. Далее процесс повторяется, рисунок 1.

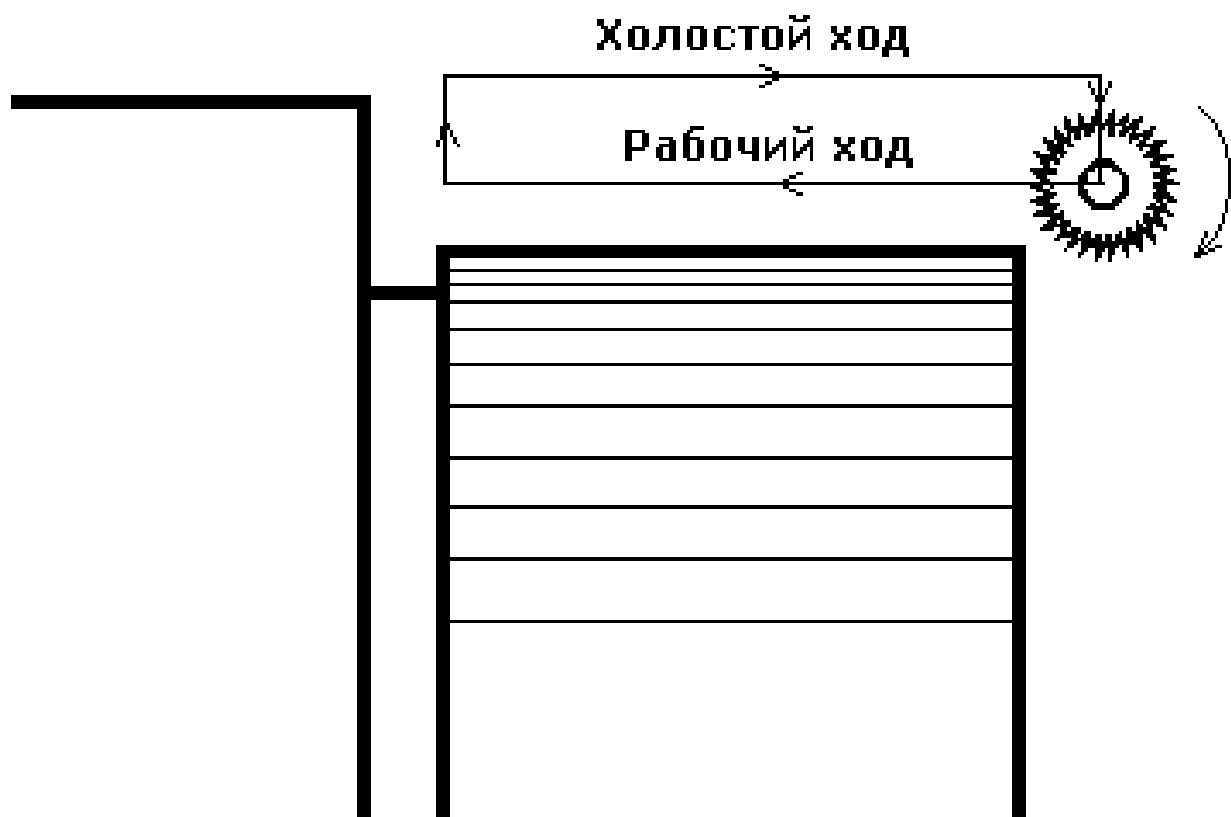


Рисунок 1 – Траектория движения фрезы

Для реализации данной траектории необходим механизм подачи для обеспечения поступательного движения. Для обеспечения прямолинейности рабочего хода. В работе проведен анализ существующих технических решений этой задачи, которые показали, что применение приводов на двигателях постоянного тока, асинхронных (3-х фазовых и 1-х фазовых) синхронных и т.д. не является состоятельным. Принято выполнить данное решение на основе механизмов Чебышева и Хойкена. Наиболее подходящим для данной задачи является механизм Хойкена. Так как он более прост в реализации. Так как число кинематических пар вращения в нем меньше и его легче кинематически привязать к движению фрезы при подводе к межламельному промежутку, а также вдоль него. При этом удалось с помощью звена и пружины обеспечить блокировку работы данного привода при наезде на ламель [3].

Решение следующей задачи потребовала произвести выбор привода на основе асинхронного 2-х фазного двигателя, рисунок 2., который является надежным, малогабаритным и неэнергоемким.

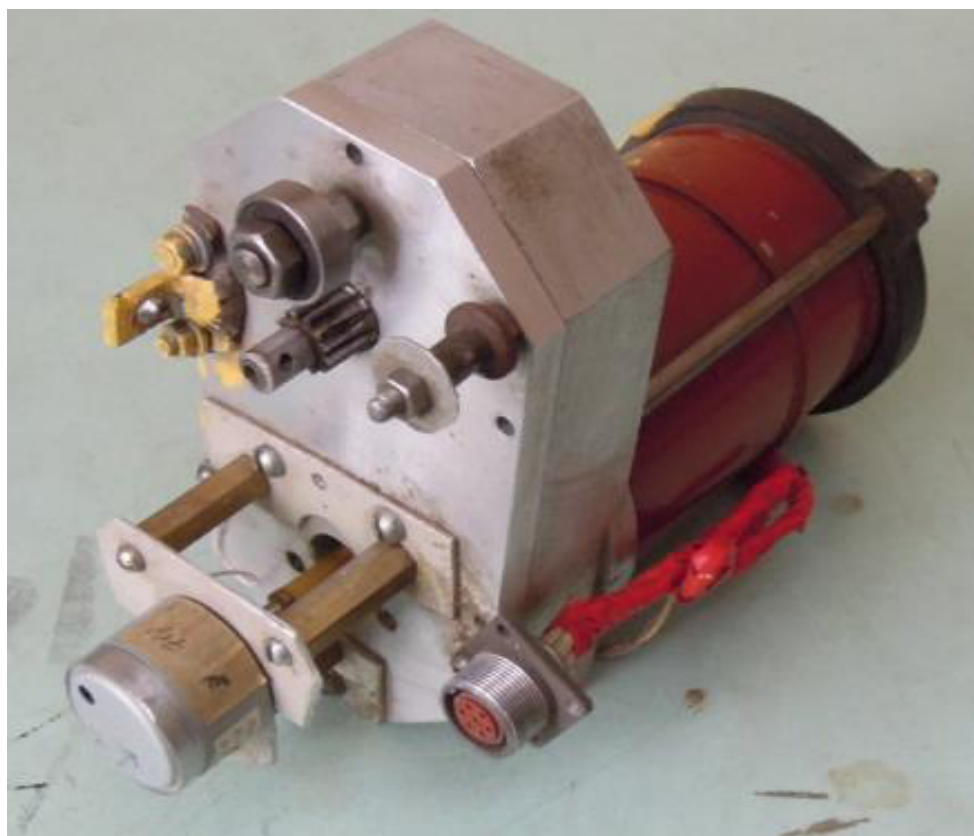


Рисунок 2 – Привод на базе двигателя АДП-362

Приведена возможная практическая реализация кинематической схемы привода подачи для обработки коллектора (рисунок 3).

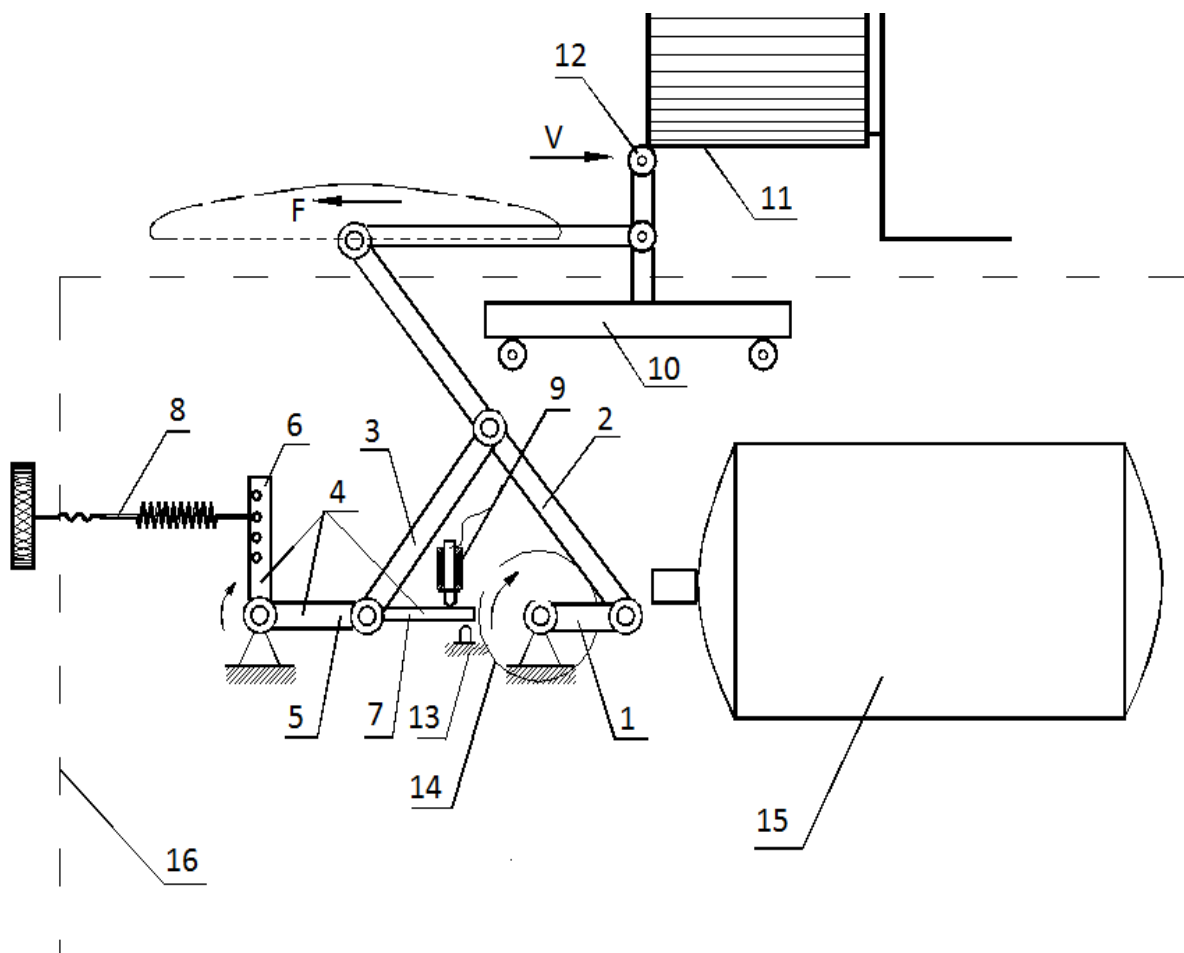


Рисунок 3 – Кинематическая схема механизма подачи

Основой кинематики механизма подачи является механизм Хойкена, содержащий звенья 1, 2 и 3 (рисунок 3). Ведущий рычаг 1 жестко связан с основанием 16. Звено 3 механизма Хойкена соединено не с основанием, как в классическом механизме, а с дополнительным поворотным узлом 4, ось вращения которого жестко соединена с основанием. Он содержит рычаг 5, консоль 6, расположенную к нему под прямым углом и нажимную пластину 7. Все эти элементы представляют собой единое целое. К консоли подсоединен механизм регулировки, содержащий пружину и барашек. Пружина прижимает пластину 7 к контакту 9. В этом положении механизм Хойкена имеет естественную конфигурацию и при повороте звена 1 крайняя точка звена 2 на определенном участке движется по примерно прямой траектории. Звено 2 приводит в движение каретку 10 со шпиндельным узлом. При указанном стрелкой направлении вращения рычага 1 конец звена 2 движется в сторону коллектора 11 со скоростью V . На фрезу 12 действует сила реакции F . Если она

превышает некоторый заданный уровень, например, при наезде фрезы на ламель коллектора 11, то через звено 3 на рычаг 5 действует усилие поворачивающее звено 4 и контакт размыкается. Поворот ограничивается упором, расположенным на основании. Звено 1 располагается непосредственно на выходном валу редуктора 14 с передаточным числом 80 – 120. Входной вал редуктора через упругую муфту соединен с валом двигателя 15.

Направляющая установлена на двух шпильках, обеспечивающих регулировку углов. Привод вращает шестерню диаметром 130 мм, на которой расположен вращающийся рычаг (33 мм) механизма Хойкена. Траектория движения конца рычага этого механизма 155 мм с отклонением 30 мм при обратном ходе. Подвижная часть катается на роликах и приводится в движение через тягу1. Эта тяга представляет собой рычаг с соотношением плеч 1:10. Малое плечо прикреплено к втулке шпинделя, поэтому траектория движения фрезы будет перевернута и при обратном ходе будет выходить из паза на 3 мм. Тяга 2 подпружинена в вертикальной плоскости и обеспечивает осевое смещение шпинделя $\pm 2 - 3$ мм. Электромагнит закреплен на консоли подвижной части. В рабочем состоянии он включен и фреза заходит в паз. При нештатной ситуации он отключается и фреза выходит из паза на 2 – 3 мм.

Преимущества данной кинематической схемы в следующем:

1. Надежность как конструктивная, так и функциональная. Ни при каких обстоятельствах фреза не выйдет за пределы рабочей зоны (при использовании прижимного ролика у петушков).
2. Простота изготовления. Почти все элементы могут быть вырезаны на лазерном раскроечном станке из листа 4 – 5 мм.
3. Практически мгновенное срабатывание из-за малой массы звена и использовании контакта на отрыв. В случае с маятниковым механизмом в движение приводится весь мотор редуктор.

В ходе проведенного исследования можно сделать следующие основные результаты и выводы:

- 1) выполнен анализ технологии ремонта тяговых электродвигателей и дано обоснование выбора кинематической схемы установки;
- 2) проведен анализ принципов реализации механизмов подачи и обоснован выбор принципа построения механизма подачи на основе рычажного механизма Хойкена;

3) рассмотрены типы исполнительных двигателей систем автоматики и обоснован выбор асинхронного двигателя с частотным управлением;

4) предложен усовершенствованный вариант механизма подачи и вращения фрезы для автоматизации операции продоразивания коллектора.

Список литературы

1. Патент России №21801681. Способ определения местоположения диэлектрического промежутка в электропроводящем объекте и устройство для его осуществления : опубл.01.09.2018 / Ахмеджанов Р. А., Чегодаев Ф. В., Чередов А. И.

2. Патент России № 2116871. Автоматический фрезерный станок для продорозки коллекторов электрических машин : опубл. 20.10.1997 / Губин В. Н., Ураев А. Г., Смоляков А. Н.

3. Ремонт якорей электрических машин – обработка коллектора : сайт .– URL: <http://lokomо.ru/podvizhnoy-sostav/remont-yakorey-elektricheskikh-mashin-5.html>3. – Текст : электронный.

4. Тяговый электродвигатель: назначение и применение : сайт .– URL: https://electric-220.ru/news/tjagovyj_ehlektrodvigatel_naznachenie_i_primenenie/2018-02-24-1459. – Текст : электронный.

5. Чегодаев, Ф. В. Установка для ремонта коллекторов тяговых двигателей / Ф. В. Чегодаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – №2. – С. 54-59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ларин Евгений Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Инженер ОмГУПС

Тел.: +7 (3812) 31-06-22

E-mail: larin.evgs@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Larin Evgeny Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Engineer OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-22

E-mail: larin.evgs@mail.ru

М. И. Бисерикан, А. Ш. Кашбулина

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С УСТАЛОСТНЫМИ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности операции механической обработки труднообрабатываемых сталей с термоупрочненной поверхностью и контактно-усталостными дефектами на примере восстановления поверхности катания колесных пар. Проанализированы данные статистики, показано, что наиболее слабым местом технологического процесса ремонта и обеспечения качества является механическая обработка по профилю катания. Предложена новая схема обточки, основанная на разупрочнении поверхностного слоя мощным локальным источником нагрева на основе лазера. При обточке использован эффект потери твердости при нагреве в зоне резания. Выполнен анализ температур, возникающих в твердосплавных пластинах при обточке.

Ключевые слова: резец, токарная обработка, колесная пара, режимы резания, твердый сплав, усталостный дефект, разрушение, износ.

Michael I. Biserikan, Anastasia Sh. Kashbulina

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF BLADE PROCESSING OF MATERIALS WITH FATIGUE AND THERMOMECHANICAL DEFECTS

The article discusses the issue of increasing the efficiency of the machining operation of difficult-to-machine steels with a heat-strengthened surface and contact-fatigue defects on the example of restoring the rolling surface of wheelsets. The data of statistics are analyzed, it is shown that the weakest point of the technological process of repair and quality assurance is machining along the rolling profile. A new turning scheme is proposed, based on softening the surface layer by a powerful local laser-based heating source. When turning, the effect of loss of hardness during heating in the cutting zone is used. The analysis of temperatures arising in carbide inserts during turning is carried out.

Keywords: cutter, turning, wheelset, cutting conditions, hard alloy, fatigue defect, fracture, wear.

Проблема лезвийной обработки труднообрабатываемых материалов является одной из основных. Повышенная твердость и вязкость создают проблемы со стружкоотделением и стойкостью режущего инструмента. Рассмотрим проблему обработки стали марки «Т» с поверхностным упрочнением. Такая сталь применяется при производстве вагонных колес и характеризуется после эксплуатации упрочненным приповерхностным слоем, глубиной 1 мм с твердостью от 520 до 410 *HV*, а на отдельных участках до 950 *HV*, при этом твердость обода цельнокатаных колес при производстве регламентирована в диапазоне от 320 до 360 *HV*. В ремонте изделия имеющие поверхностное упрочнение и дефекты усталостной и термомеханической природы (ТМП), отрицательно сказываются на процессе лезвийной обработки. Используемая технология обработки имеет цель удалить с поверхности катания имеющиеся дефекты, но не учитывает микрогеометрию получаемой поверхности. При этом в стружку снимается слой металла надлежащего качества. В зависимости от величины ТМП назначаются следующие режимы обработки: глубина резания $t = 4 - 8$ мм, подача $s = 1 - 1.4$ мм, скорость резания $V_{рез} = 30 - 50$ м/мин.

Существенно упростить обработку материалов с дефектами контактно-усталостного и термомеханического происхождения можно используя температурное разупрочнение поверхностного слоя. Известно [1], что при нагреве стали свыше 500 °С происходит значительное снижение (в 2 и более раз) твердости, пределов прочности и упругости. Поэтому для значительного снижения твердости упрочненного материала, повышения качества обработанной поверхности и уменьшения выхода режущего инструмента из строя необходим нагрев зоны резания до температуры свыше 500 °С, при этом рационально нагревать зону резания до 800 – 1000 °С, так как с повышением температуры происходит ускорение процесса разупрочнения.

Перспективными методами обработки являются плазменно-механическая и лазерно-механическая обработка. Принцип которых заключается в предварительном разогреве срезаемого слоя до температуры, при которой обрабатываемость резанием стали удовлетворительна. Однако реализация плазменно-механической обработки в ремонтном производстве имеет ряд существенных производственных недостатков и, кроме того, не позволяет контролировать температурные вложения в материал и, как

следствие, его структуру, поэтому не применяется. При лазерно-механической обработке теплота аккумулируемая в срезаемом слое не успевает распространиться вглубь поверхности, что создает условия для повышения производительности при заданной стойкости инструмента, снижается шероховатость и волнистость обработанной поверхности, повышается износостойкость, отсутствуют макротрещины.

Реализовать данный эффект можно при использовании лазеров большой мощности с непрерывной или импульсно-периодической генерацией излучения, позволяющие нагревать материал в зоне стружкообразования до температуры более $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве основы для данной системы можно использовать станок модели ТС912Ф3 и волоконный иттербиевый лазер (рисунок 1). Данный тип лазеров отличается высокой мощностью лазерного излучения, способностью работать в непрерывном, квазинепрерывном или в маломодовом режиме работы, имеет высокий КПД [2].

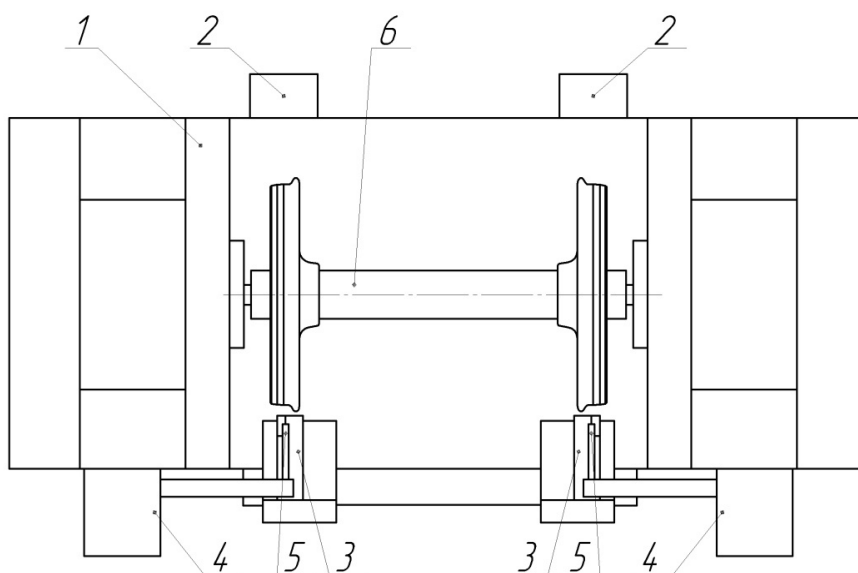


Рисунок 1 – Схема колесотокарного станка ТС912Ф3, оснащенного устройством лазерного отжига и системой распознавания областей, с контактноусталостными и термомеханическими повреждениями:

- 1 – колесо токарного станка; 2 – система видеонаблюдения; 3 – суппорты;
4 – устройство лазерного отжига; 5 – лазерная головка

Основная проблема лазерно-механической обработки состоит в выборе параметров процесса таким образом, чтобы значение контактной температуры, с одной стороны, не превышала температуры структурных превращений на

глубине более припуска, а с другой стороны, температура в срезаемом слое должна быть достаточна для снижения энергоемкости резания. Схема лазерно-механической обработки представлена на рисунке 2.

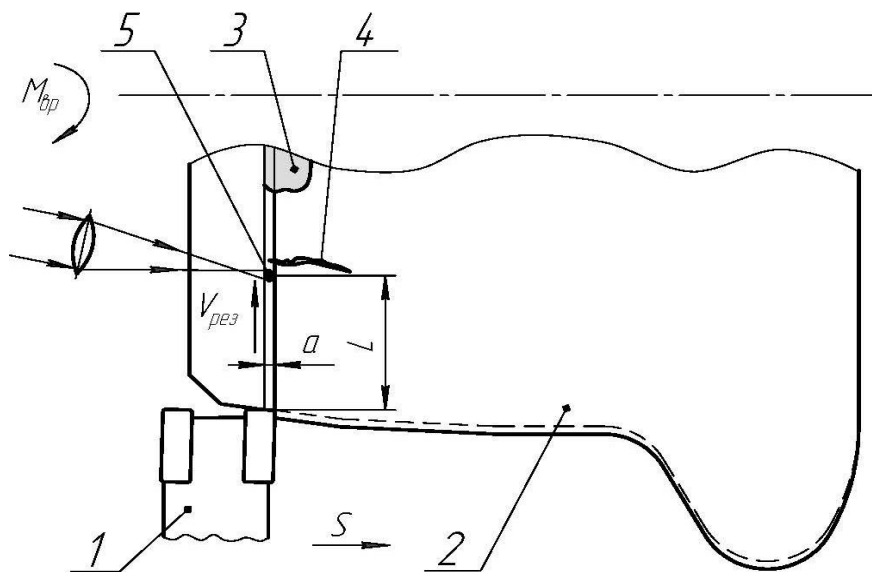


Рисунок 2 – Схема лазерно-механической обработки колеса с ТМП

Область лазерного нагрева рассматривается, как объемный источник теплоты,двигающейся с постоянной скоростью, и описывается дифференциальным уравнением (1), распределение температуры после окончания лазерного воздействия определяются согласно (2), глубина проплавления поверхностного слоя по (3) [3].

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_B}{c \cdot \rho}, \quad (1)$$

$$T(y, z, \tau) = \frac{2 \cdot A \cdot P}{V_{рез} \cdot c_c \cdot \rho_c} \cdot \left[\frac{\exp\left(\frac{-z^2}{4a_c \cdot \tau}\right)}{\sqrt{4\pi \cdot a_c \cdot \tau}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{-y^2}{4a_c \cdot (\tau + \tau_0)}\right)}{\sqrt{4\pi \cdot a_c \cdot (\tau + \tau_0)}} \right], \quad (2)$$

$$h_{LZ} = \frac{2 \cdot A \cdot P}{\pi \cdot r_n \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot (c_c \cdot T_k + L_u)}, \quad (3)$$

где θ – температура, °С; τ – время, с; c – массовая теплоемкость, Дж/(кг·°С); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; q_B – плотность теплового потока от внутренних источников, Вт/м²; ρ – плотность, кг/м³; τ – время лазерного воздействия, с; τ_0 – постоянная времени; $V_{рез}$ – скорость

резания, м/с; a_c – температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с; A – коэффициент поверхностного поглощения лазерного излучения; T_k – температура кипения обрабатываемого материала, К; $L_{и}$ – удельная энергия испарения обрабатываемого материала, Дж/кг.

Исходными данные для расчета: $c = 465$ Дж/(кг·°С); $\rho = 7800$ кг/м³; $\lambda = 47$ Вт/(м·°С); $T_k = 3000$ °С; $L_{и} = 6.1 \cdot 10^6$ Дж/кг, $V_{рез} = 0,58$ м/с; $P = 7$ кВт; $r_n = 1 \cdot 10^{-4}$ м. Результаты расчета для половины отжигаемой области срезаемого слоя представлены на рисунке 3.

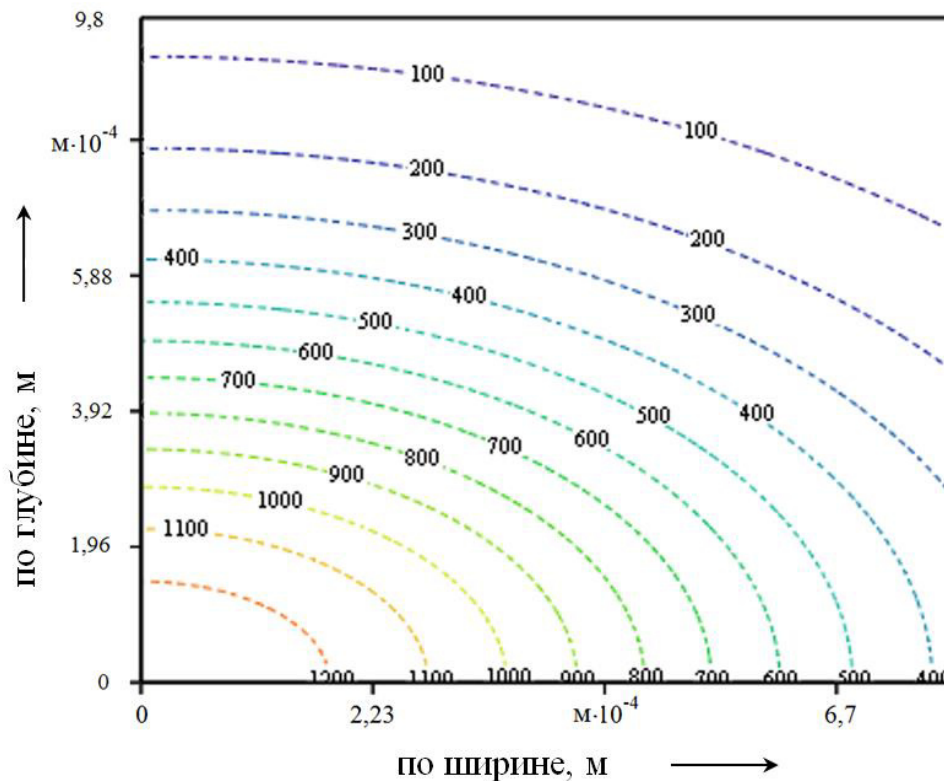


Рисунок 3 – Распределение температуры в зоне лазерного воздействия

В процессе резания в месте контакта инструмента с обрабатываемой деталью выделяется значительное количество тепла, нагревающего инструмент, деталь и стружку. Количество теплоты, выделяемое при обработке, зависит от параметров режимов резания и геометрии применяемого инструмента. При ремонте колес подвижного состава используется режущий инструмент, оснащенный тангенциальными твердосплавными пластинами, снятие припуска осуществляется радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки. Сечение остаточного выступа на обработанной поверхности оформляется радиусными боковыми сторонами пластины (рисунок 4).

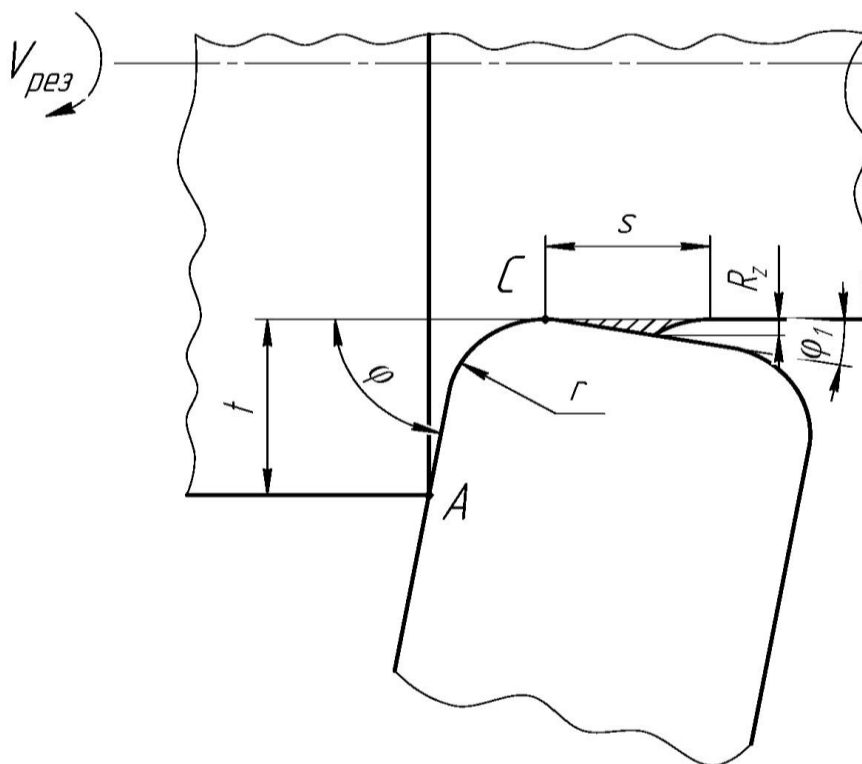


Рисунок 4 – Схема снятия припуска тангенциальной пластиной:

φ – главный угол в плане, °; φ_1 – вспомогательный угол в плане, °; s – подача, м/мин;

r – радиус при вершине инструмента, м; t – глубина резания, м;

R_z – шероховатость обработанной поверхности, мкм

В процессе восстановления профиля катания инструмент оценивается по теплостойкости, что особенно важно при обработке разогретого металла, так как нагрев поверхности инструмента происходит более интенсивно. Влияние температуры на процесс резания и возникающие силы оценивается численными методами, основанных на применении термомеханического подхода [4].

$$P_z = K_\xi S_b s t + (\mu_1 \sigma_b h_3 + 0.7 S_b H_0) \left(\frac{t}{\sin \varphi} + r \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{t_r (2r - t_r)}}{r} \right) \right) \quad (4)$$

$$P_y = K_v S_b s \cdot \left[(t - t_r) \cdot \cos \varphi + t_r \left(1 - \frac{t_r}{2r} \right) \right] + \sigma_b h_3 \left[(t - t_r) \cdot \operatorname{ctg} \varphi + t_r \sqrt{\frac{2r}{t_r} - 1} \right] \quad (5)$$

где μ_1 – коэффициент трения на задней поверхности; φ – главный угол в плане; λ – угол наклона передней поверхности; σ_b – условный предел прочности при растяжении, МПа; S_b – действительный предел прочности при растяжении,

МПа; h_3 – высота фаски износа, м; H_0 – высота застойной зоны, м; K_ξ, K_V – удельные силы стружкообразования; l_s – длина зачищающей кромки, м.

Параметры сечения срезаемого слоя – толщина, ширина, длина контакта стружки с инструментом – определяются согласно [5] с учетом следующих допущений:

а) на передней поверхности инструмента на длине $AC = l$, всегда имеются две зоны: зона пластического контакта длиной $AM = l_0$ и зона упругого контакта $MC = l_0$, причем $l_0 = 0,5l$;

б) в зоне пластического контакта касательные напряжения одинаковы и равны τ_p , а в зоне упругого контакта являются убывающими по закону 3-й степени.

Максимальная температура первичных пластических деформаций в точке А на режущей кромке определяется:

$$\Theta_A = \frac{\tau_p}{c\rho B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}} \quad (6)$$

Максимальная контактная температура на передней поверхности имеет место в точке $M(x=l_0)$, т. е. в конце зоны пластического контакта, и выражается:

Максимальная температура трения на передней поверхности (точка М) определяется по выражению:

$$\Theta_M = \Theta_A (1 + \psi_M) \quad (7)$$

$$\psi_M = \frac{0,9675n\sqrt{PeB}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}} \quad (8)$$

где ψ_M – отношение максимальной температуры трения Θ_M к максимальной температуре Θ_A ; B – характеризует степень пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали; n – часть, которую теплота трения стружки о переднюю поверхность составляет от общей теплоты трения [4].

$$B = \frac{mPe^n}{F^k D^p (1 - \sin \gamma)^q}, \quad (9)$$

Безразмерные комплексы Pe, F, D , коэффициент m и показатели степени n, k, p и q определяются в зависимости от условий резания.

Таким образом, суммарная переменная контактная температура на передней поверхности инструмента будет определяться выражением:

$$\begin{aligned}\Theta_n &= \Theta_A \left(1 + \psi_M \sqrt{\frac{x}{l_0}} \right), 0 \leq x \leq l_0; \\ \Theta_n &= \Theta_A \left[1 + \psi_M \left(\frac{l_0}{x} \right)^{0,6} \right], x > l_0\end{aligned}\quad (10)$$

При лазерном нагреве снимаемый в стружку слой материала создает дополнительную тепловую нагрузку, в результате чего происходит изменение параметров определяющих процесс резания, а передняя поверхность инструмента взаимодействует с нагретым металлом.

Связь между температурой на поверхности режущего инструмента при дополнительном нагреве и температурой на поверхности при отсутствии нагрева выражается согласно [1]:

$$\Theta = \Theta_n + (1 - p\Theta_n) \cdot \Theta_n \quad (11)$$

где p – коэффициент связи, $p = 0.001$; Θ_n – средней температуры металла у режущей кромки инструмента при лазерном нагреве, °C.

$$\Theta_n = \frac{\beta \cdot W}{b_1 \cdot \sqrt{\pi \lambda L c \rho \nu_{рез}}} \cdot e^{[-k_1 a_1^2]} \cdot erf \left[\frac{b_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{c \rho \nu_{рез} k_0}{4 \lambda L k_0 + c \rho \nu_{рез}}} \right] \quad (12)$$

где W – мощность лазерной установки, Вт; β – коэффициент, учитывающий накопление в обрабатываемой детали части теплоты, внесенной лазерным лучом; k_0 – коэффициент сосредоточенности источника тепла, м²; L – расстояние от центра пятна нагрева до кромки инструмента, измеренное по направлению скорости резания, м; a_1, b_1 – толщина и ширина среза, м; λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/м·К; c – теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Расчет по формулам (6) – (12) позволил определить температуру передней поверхности твердосплавных пластин режущего инструмента (рисунок 5).

При данных режимах, при отжиге поверхности лазерным лучом температура свыше 500 °С не распространяется на глубину более 2 мм, структурные превращения протекают только в области снимаемого припуска на механическую обработку, и основной металл не меняет своих свойств.

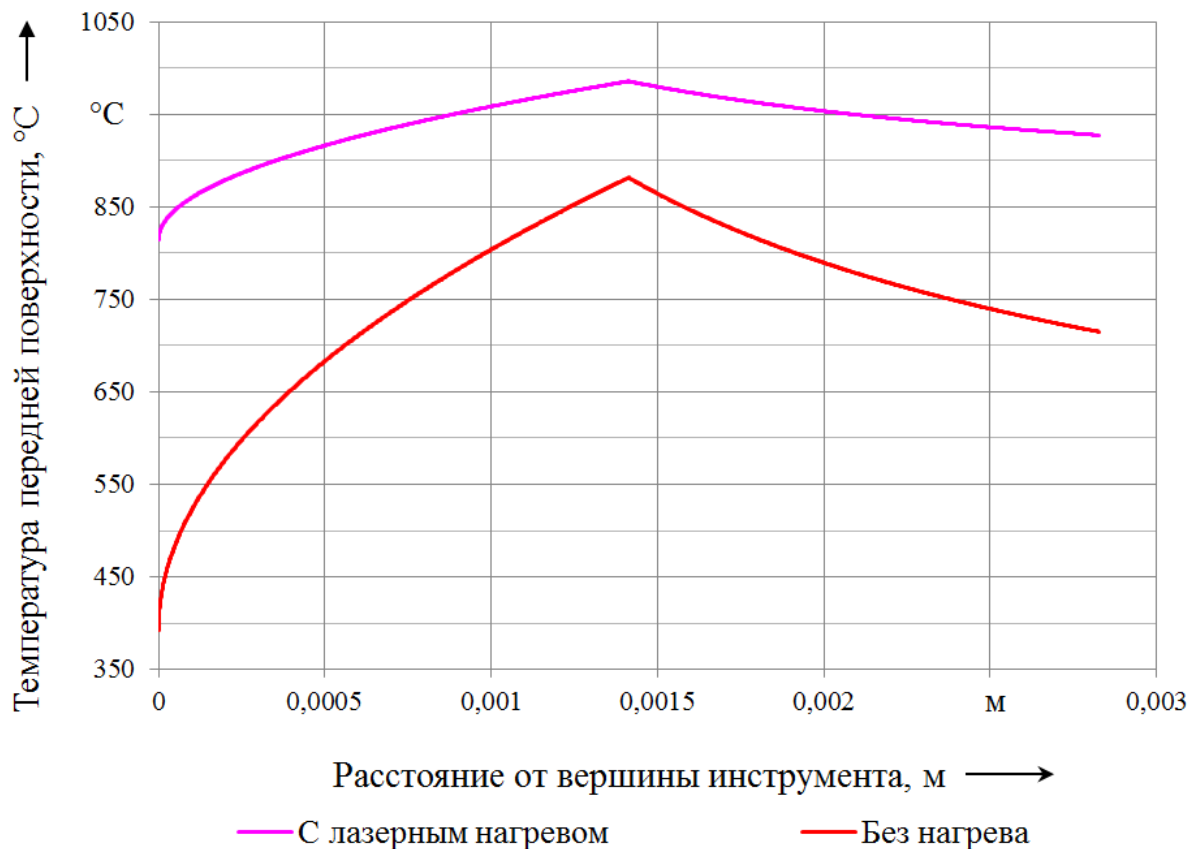


Рисунок 5 – Изменение температуры передней поверхности инструмента

Использование лазерного нагрева срезаемого слоя в областях, содержащих эксплуатационные дефекты, не приводит к потере инструментом его режущих свойств, так как используемые при восстановлении профиля поверхности катания режущие пластины отечественного производства из твердого сплава Т14К8 обладают теплостойкостью до 1000 °С, а пластины из сплава МС121(ТУ 48-19-308-80) производства «Sandvik», и ТТ1500 производства «TaeguTec» обладают теплостойкостью до 1100 °С.

Таким образом, применение технологии лазерно-механической обработки участков поверхности катания с термомеханическими и усталостными повреждениями обеспечивает снижение сопротивления резанию. Стружка уносит значительную часть тепла, и инструмент не перегревается. Структура исходного металла не изменяется.

Список литературы

1. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с. – Текст : непосредственный.
2. Вудс, С. Волоконные лазеры средней мощности и их применение / С. Вудс, М. Дака, Г. Флин. – Текст : непосредственный // Фотоника. – 2008. – № 4. – С. 6-10.
3. Лазерная и электролучевая обработка материалов: Справочник / Под ред. Н. Н. Рыкалина [и др.] – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с. – Текст : непосредственный.
4. Силин, С. С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – Москва : Машиностроение, 1979. – 152 с. – Текст : непосредственный.
5. Полетика, М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М. Ф. Полетика. - М., Машиностроение, 1969. – 114 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бисерикан Михаил Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» ОмГУПС.
Тел.: 8-904-3219501
E-mail: radenxg@mail.ru

Кашбулина Анастасия Шамильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Студент ОмГУПС.
Тел.: +7 (950) 790-19-04.
E-mail: ns.kshl@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Biserikan Michael Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of «Technologies of
Transport Engineering and Repair of rolling
stock» OSTU.
Phone: 8-904-3219501
E-mail: radenxg@mail.ru

Kashbulina Anastasia Shamilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Student of OSTU.
Phone: +7 (950) 790-19-04.
E-mail: ns.kshl@gmail.com

П. С. Соколов, Д. И. Попов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ МАШИН

В данной статье приведены результаты исследований, направленных на разработку подхода к проектированию электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин. Выполнен анализ характеристик и рассчитана зависимость КПД преобразователя частоты от номинальной мощности двигателя. Путем математического моделирования получены значения потребляемой и вырабатываемой активной мощности асинхронных машин. В результате получены выражения для расчета полной мощности потребляемой электротехническим комплексом.

Ключевые слова: асинхронная машина, преобразователь частоты, математическое моделирование, взаимная нагрузка, электротехнический комплекс.

Pavel S. Sokolov, Denis I. Popov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF AN APPROACH TO DESIGNING AN ELECTRICAL COMPLEX FOR TESTING ASYNCHRONOUS MACHINES

This article presents the results of research aimed at developing an approach to the design of an electrical complex for testing asynchronous machines. The analysis of the characteristics is carried out and the dependence of the efficiency of the frequency converter on the rated power of the motor is calculated. By means of mathematical modeling, the values of the consumed and generated active power of asynchronous machines are obtained. As a result, expressions were obtained for calculating the total power consumed by the electrical complex.

Keywords: asynchronous machine, frequency converter, mathematical modeling, mutual load, electrical complex.

Активное внедрение асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на подвижном составе требует внедрение инфраструктуры и соответствующего оборудования для технического обслуживания и ремонта на протяжении всего жизненного цикла [1]. Испытательные станции являются неотъемлемой частью испытательной инфраструктуры необходимой для обеспечения качественного ремонта асинхронных машин [2].

В процессе разработки и проектирования электротехнического комплекса (ЭТК) для испытаний асинхронных двигателей (АД) необходим корректный выбор параметров оборудования и системы электропитания [3-4]. В состав оборудования ЭТК входят пара асинхронных машин, пара ПЧ, питающий трансформатор, коммутационное и защитное оборудование.

Для решения данной задачи необходимо разработать научно обоснованную методику выбора оборудования применимую в инженерных расчетах с учетом известных математических моделей [5, 6]. При этом необходимо учесть, что электрическая энергия, потребляемая схемами взаимной нагрузки, потребляется не только на потери в асинхронных машинах, но также и потери в других элементах схемы (преобразователи частоты, кабели, коммутационных аппаратах и др.).

Расчет энергетических параметров схемы испытаний асинхронных машин (АМ) методом взаимной нагрузки выполняется путем математического моделирования в программе Mathcad. В качестве математической модели работы асинхронных машин по принципу взаимной нагрузки используем систему из 13 линейных дифференциальных уравнений первого порядка (формула 1).

Проведем исследования для десяти АМ серии АИР различной мощности с синхронной частотой вращающегося магнитного поля статора 1500 об/мин.

Рассчитаем потери в преобразователе частоты, который подключен к машине, работающей в генераторном режиме:

$$\Delta P_{ПЧ2} = \left(\frac{i_{ст2}}{i_{ст1}} \right)^2 \cdot \Delta P_{ПЧ1}.$$

Анализ характеристик элементов электроэнергетического комплекса (ЭЭК) (асинхронные двигатели, преобразователи частоты) позволил получить зависимости КПД от номинальной мощности АД.

$$\left. \begin{aligned}
\frac{di1_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1a} - i1_{1a} R1_1 + k1_r \left[i'_{2a} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{di1_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1b} - i1_{1b} R1_1 + k1_r \left[i'_{2b} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{di1_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1c} - i1_{1c} R1_1 + k1_r \left[i'_{2c} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{di'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma1} \left[k1_s(u1_{1a} - i1_{1a} R1_1) + \left[i'_{2a} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{di'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma1} \left[k1_s(u1_{1b} - i1_{1b} R1_1) + \left[i'_{2b} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{di'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma1} \left[k1_s(u1_{1c} - i1_{1c} R1_1) + \left[i'_{2c} R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{-p}{J\sqrt{3}} \left[L1_{12} [i1_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + i1_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + i1_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + L2_{12} [i2_{1a}(i2'_{2b} - i2'_{2c}) + i2'_{1b}(i2'_{2c} - i2'_{2a}) + i2_{1c}(i2'_{2a} - i2'_{2b})] \right] - \frac{M_{\text{not}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
\frac{di2_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1a} - i2_{1a} R2_1 + k2_r \left[i2'_{2a} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i2'_{2b} - i2'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{di2_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1b} - i2_{1b} R2_1 + k2_r \left[i2'_{2b} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i2'_{2c} - i2'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{di2_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1c} - i2_{1c} R2_1 + k2_r \left[i2'_{2c} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i2'_{2a} - i2'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{di2'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1a} - i2_{1a} R2_1) + \left[i2'_{2a} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i2'_{2b} - i2'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{di2'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1b} - i2_{1b} R2_1) + \left[i2'_{2b} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i2'_{2c} - i2'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{di2'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1c} - i2_{1c} R2_1) + \left[i2'_{2c} R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i2'_{2a} - i2'_{2b})) \right] \right].
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

На рисунке 1 а представлен график зависимости КПД преобразователей частоты фирмы SINAMICS от номинальной мощности преобразователей для асинхронных двигателей типа АИР мощностью от 0,37 до 200 кВт. На рисунке 1 б представлен график зависимости КПД этих же асинхронных двигателей от их номинальной мощности.

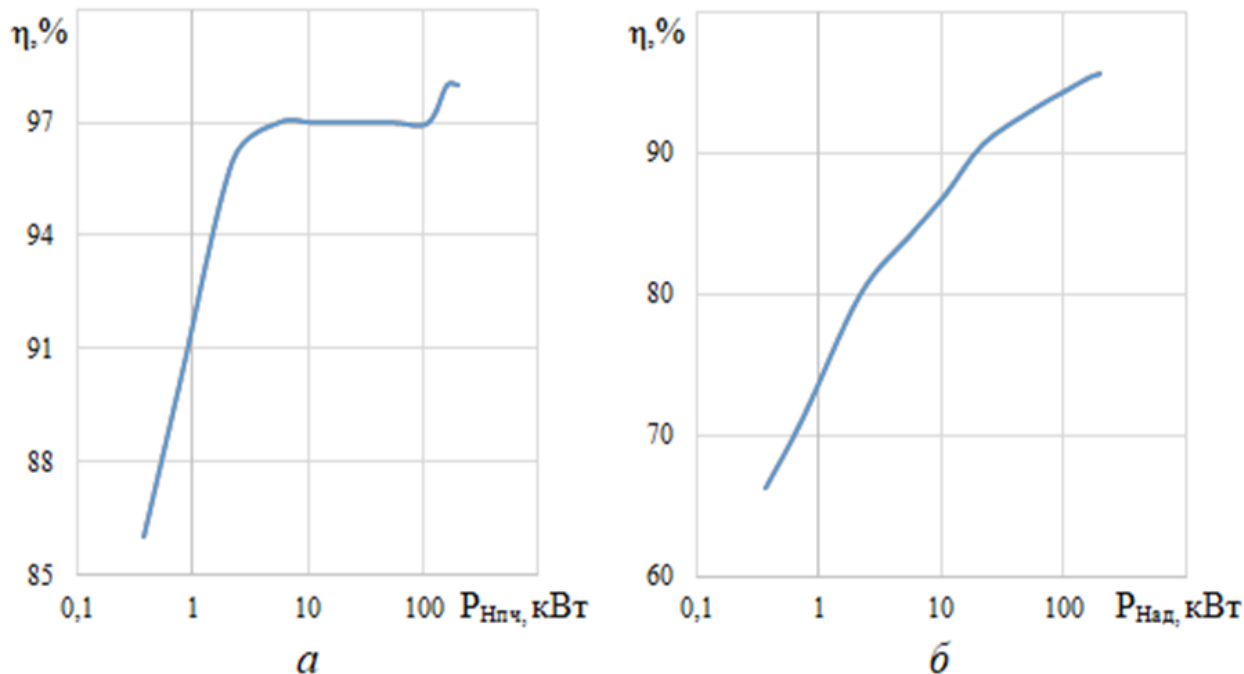


Рисунок 1 – Зависимости КПД машин и преобразователей от мощности соответствующего испытуемого асинхронного двигателя:
 а – КПД преобразователей частоты, б – КПД асинхронных двигателей

В результате математического моделирования работы пары асинхронных машин по схеме взаимной нагрузки рассчитаны следующие показатели:

- потребляемая активная мощность машины, работающей в двигательном режиме при номинальной нагрузке;
- вырабатываемая активная мощность машины, работающей в генераторном режиме;
- действующее значение токов статора обеих асинхронных машин (среднее значение по фазам).

Результаты математического моделирования приведены в табл. 1.

На основании расчетных данных получен коэффициент возврата мощности генератором

$$K_p = \frac{P_{\text{ГЕН(ЭЛ)}}}{P_{\text{АД(ЭЛ)}}} \quad (2)$$

и коэффициент отношения токов статора пары асинхронных машин

$$K_I = \frac{I_{ГЕН}}{I_{АД}} \quad (3).$$

Таблица 1

Результаты математического моделирования

Марка АД	Ном. мощность АД, кВт	Потребляемая АМ1 активная мощность, кВт	Вырабатываемая АМ2 активная мощность, кВт
АИР63В4	0,37	558	222
АИР71В4	0,75	1052	514
АИР90L4	2,2	2760	1763
АИР112М4	5,5	6490	4723
АИР132М4	11	12555	9840
АИР180S4	22	24321	19834
АИР225М4	55	59139	51749
АИР280S4	110	115261	104937
АИР315S4	160	167579	153122
АИР315М4	200	208393	192272

Зависимости полученных коэффициентов от мощности испытуемого асинхронного двигателя приведены на рисунке 2.

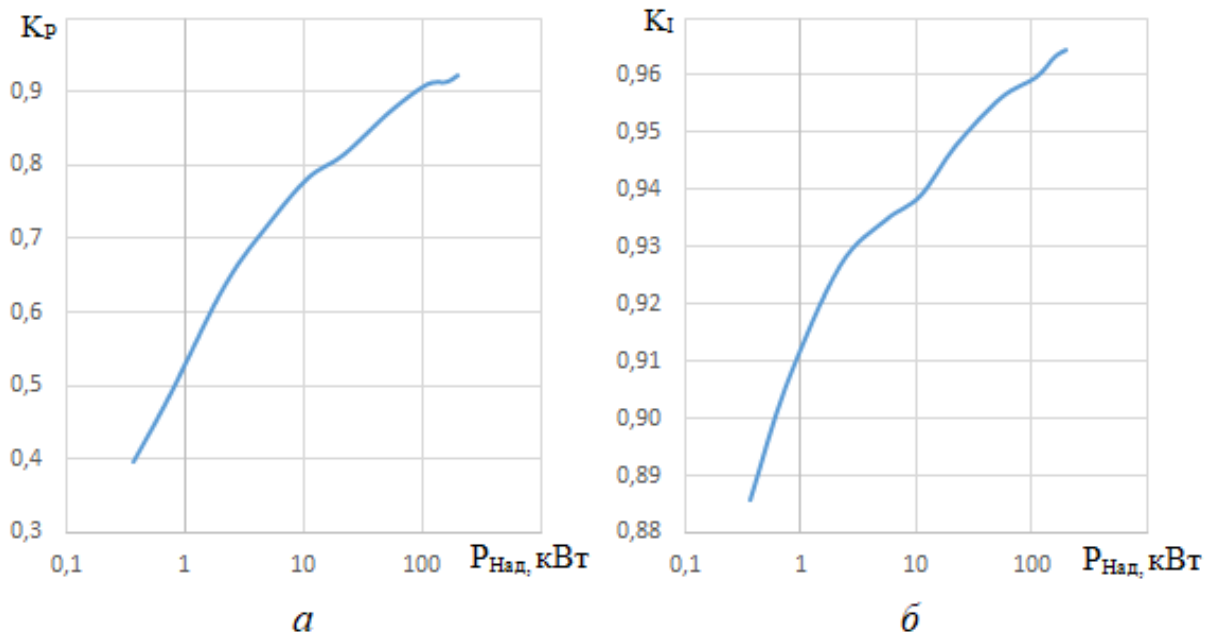


Рисунок 2 – Зависимости коэффициентов от мощности соответствующего испытуемого асинхронного двигателя:

а – коэффициента возврата мощности генератором; б – коэффициента отношения токов статора пары асинхронных машин

На основании полученных данных предложена формула для определения величины потребляемой из сети активной мощности:

$$P_c = P_{\text{Адн}} \cdot (1 - K_p) + \Delta P_{\text{ПЧн}} \cdot (1 + K_i). \quad (4)$$

Используя данные приведенные производителем о коэффициенте мощности частотного преобразователя со стороны сети ($\cos\varphi_c$) можно рассчитать полную мощность, потребляемую ЭТК:

$$S_c = P_c \cdot \cos\varphi_c. \quad (5)$$

Данную мощность должен иметь трансформатор, питающий всю схему ЭТК для испытания АД.

Выбор коммутационного и защитного оборудования необходимо осуществлять по номинальным значениям напряжения и тока сети.

Значение суммарного фазного тока, потребляемого парой ПЧ, может быть определено по выражению:

$$I_{2\text{ПЧ}} = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot 380}. \quad (6)$$

В результате выполненных исследований получены расчетные выражения для вычисления номинальной мощности трансформатора, питающего ЭТК для испытаний АД и значение суммарного фазного тока, потребляемого парой ПЧ, необходимое для выбора коммутационного и защитного оборудования. Данные выражения могут быть применены в процессе разработки и проектирования ЭТК для испытаний АД.

Список литературы

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения) // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396. – Текст : электронный.

2. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний (с изменениями N 1, 2) = Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 25.03.87 N 891 / разработан и внесен Министерством электротехнической промышленности. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003.

3. Пат. 140678 Российская Федерация, МПК G01R 31/04 (2006.01). Устройство для испытания асинхронных тяговых электродвигателей / Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В. № 2013147519/28; заявл.04.02.2014; опубл. 20.07.2014, Бюл. 14.

4. Пат. № 143348 Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01). Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В. № 2014112919/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. 20.

5. Попов, Д. И. Определение коэффициента экономичности электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 1 – С. 40-45.

6. Попов, Д. И. Исследование влияния изменения напряжения сети на потери мощности при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 145-154.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Павел Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: SokolovPS@omgups.ru

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: PopovDI@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Pavel Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the Department «Electric machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: SokolovPS@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department « Electric machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: PopovDI@omgups.ru

Ю. И. Макаров, С. М. Плешаков, А. А. Верисокина, М. А. Верисокина

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ, И ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

На всех этапах создания транспортных средств, а также при их эксплуатации наиболее важной частью обеспечения качества служит контроль. Контроль, прежде всего, необходим для осуществления безопасности автомобильного транспорта. Он представляет собой разного рода исследования (испытания) и измерения требованиям соответствующих нормативно-технических документов. Статья посвящена обзору требований как к автомобилям, выпускаемым в обращение, так и к находящимся в эксплуатации.

Ключевые слова: транспортное средство, легковой транспорт, выпуск в обращение, эксплуатация, требования к единичным транспортным средствам.

**Yuri I. Makarov, Stanislav M. Pleshakov, Aleksandra A. Verisokina,
Maria A. Verisokina**

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (PSTU),
St. Petersburg, the Russian Federation

REVIEW OF REQUIREMENTS FOR MACHINE-BUILDING PRODUCTS, AND ASSESSMENT OF CONFORMITY FOR THE PURPOSE OF PRODUCT QUALITY CONTROL

At all stages of the creation of vehicles, as well as during their operation, the most important part of quality assurance is control. Control is, first of all, necessary for the implementation of the safety of road transport. It is a different kind of research (testing) and measurement of the requirements of the relevant regulatory and technical documents. The article is devoted to an overview of the requirements both for cars, put into circulation, and for those in operation.

Keywords: vehicle, light transport, release into circulation, operation, requirements for single vehicles.

Транспорт является основой существования и развития общества во всех его сферах – экономической, социальной, культурной, и политической. Ввиду территориальных, природно-климатических, географических особенностей нашей страны железнодорожный транспорт занимает лидирующие позиции среди других видов передвижения [1]. На сегодняшний день главной железнодорожной компанией России является ОАО «РЖД» [2].

Хотя компания занимается железнодорожными перевозками грузов и пассажиров, для эффективной работы ей необходимо наличие другого вида транспорта – автомобильного. Для осуществления перевозки поездом продукции так или иначе задействованы машины, которые доставляют груз на станцию и обратно – в места хранения. Автомобили в железнодорожной отрасли также используются для перевозки сотрудников, доставки грузов, выполнения разовых оперативных задач и т. п. Чаще всего для этих целей используется легковой транспорт категории М, требования к которому определяет технический регламент Таможенного Союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) [3]. В этом нормативно-техническом документе заключаются требования как к автомобилям, выпускаемым в обращение, так и к находящимся в эксплуатации. В чем же заключается разница между этими обязательными для выполнения условиями?

Прежде всего, при выпуске в обращение устанавливаются минимальные требования к наличию, конструктивным особенностям, состоянию в целом частей автомобиля, которые могут влиять на безопасность транспортного средства [3]. Данные условия являются общими для всех категорий транспортных средств, кроме исключений. Требования к эксплуатации же регламентируют конкретные характеристики, проверяемые при испытаниях, нормативы и показатели к составным частям определенных разновидностей автомобилей. Требования при выпуске в обращение являются скорее идентифицирующими, они не устанавливают характеристики для проведения испытаний. Кроме того, в них содержатся обязательные для выполнения условия пожарной и экологической безопасности.

На этапах изготовления и эксплуатации автомобилей важной частью обеспечения качества служит контроль. Главная цель контроля – выявление транспортных средств или их частей, несоответствующих установленным требованиям для защиты жизни или здоровья человека, животных и растений, охраны имущества, сохранения природы и предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей [4].

Проверка соблюдения требований [3] к единичным автомобилям и их частям перед их выпуском в обращение производится в формах технической экспертизы конструкции, выполнения необходимых испытаний и измерений.

Чтобы проверить соответствие машиностроительной продукции требованиям [3], используются различные организационно-технические процедуры и методы контроля.

Для формирования заключения о соответствии или несоответствии транспортных средств или их частей заявленным требованиям, испытательные лаборатории, аккредитованные в Национальной системе аккредитации, производят следующие процедуры:

- идентификацию единичного транспортного средства;
- проверку выполнения требований посредством проведения технической экспертизы конструкции и, при необходимости, испытаниями.

При проведении испытаний осуществляется оценка характеристик:

- действие тормозной системы на все колеса от одного органа управления;

- выполнение тормозной системой замедления движения транспортного средства вплоть до полной остановки при воздействии водителя на орган управления со своего сиденья, при расположении обеих рук водителя на органе рулевого управления;

- правильность работы спидометра;
- и другие.

По результатам осмотра транспортного средства, его идентификации, технической экспертизы конструкции, необходимых испытаний и измерений оформляется свидетельство о безопасности автомобиля.

Проверка соблюдения требований [3] к эксплуатируемой машиностроительной продукции, осуществляется в отношении каждой единицы транспортного средства в формах технического осмотра и государственного контроля (надзора) за безопасностью дорожного движения.

Процедура технического осмотра является обязательной для всех эксплуатируемых автомобилей, зарегистрированных в любой из стран ЕАЭС. По результатам данной проверки технического состояния транспортных средств оформляется диагностическая карта. Она содержит вывод о соответствии или несоответствии автомобиля обязательным требованиям безопасности. За безопасностью дорожного движения при этом осуществляется государственный надзор. Ответственность за надлежащее соблюдение требований [3] в данной ситуации возлагается на собственника транспортного средства.

Итак, машины играют важную роль в жизни людей. Трудно представить мир без этих устройств. Не обходится без них и железнодорожная отрасль. Чаще всего в данной сфере используется легковой транспорт категории М, к которому предъявляются требования [3]. Существует разница между требованиями к автомобилям, выпускаемым в обращение и к находящимся в эксплуатации. Проверка выполнения данных обязательных условий проводится также в виде разных процедур. Для единичной машиностроительной продукции перед их выпуском в обращение проводится техническая экспертиза конструкции, испытания и измерения. Автомобилям, находящимся в эксплуатации, обязательным образом надлежит проходить технический осмотр. За безопасностью дорожного движения при этом осуществляется государственный контроль (надзор).

Список литературы

1. Калашникова, И. В. Роль железнодорожного транспорта в пассажирских перевозках России / И. В. Калашникова, Е. К. Мельниченко. // Учебные заметки ТОГУ. – 2018. – № 3. – Том 9. – ISSN 2079-8490.

2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 04.10.2020).

3. ТР ТС 018/2011 Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности колесных транспортных средств». – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125114/fb912286b5c44149bb594585163dbf84f712edb5/ (дата обращения: 15.09.2021).

4. Политика управления качеством на машиностроительном предприятии. – Текст : электронный ресурс : [сайт]. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/politika-upravleniya-kachestvom-na-mashinostroitelnom-predpriyatii-ao-pz-mashinostroitel/viewer> (дата обращения: 15.09.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Юрий Иванович
Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarov Yuri Ivanovich
Petersburg State Transport University
Emperor Alexander I (PSTU).
9, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031,

Московский пр-т., 9, Санкт-Петербург,
190031, Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры
«Строительные материалы и технологии»
ПГУПС.
Тел.: +7 (921) 630-40-52
E-mail: makarov@pgups.ru

Плешаков Станислав Михайлович
Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС).
Московский пр-т., 9, Санкт-Петербург,
190031, Российская Федерация.
Магистрант второго курса кафедры
«Строительные материалы и технологии»
ПГУПС.
Тел.: +7 (911) 146-44-51
E-mail: PleshakovSM@fsa.gov.ru

Верисокина Александра Алексеевна
Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС).
Московский пр-т., 9, Санкт-Петербург,
190031, Российская Федерация.
Студент факультета «Промышленное и
гражданское строительство» ПГУПС.
Тел.: +7 (988) 088-89-95
E-mail: aleksandra.verisokina@gmail.com

Верисокина Мария Алексеевна
Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС).
Московский пр-т., 9, Санкт-Петербург,
190031, Российская Федерация.
Студент факультета «Промышленное и
гражданское строительство» ПГУПС.
Тел.: +7 (988) 088-89-96
E-mail: maria.verisokina@gmail.com

the Russian Federation.
Senior Lecturer of the Department of Building
Materials and Technologies PSTU.
Phone: +7 (921) 630-40-52
E-mail: makarov@pgups.ru

Pleshakov Stanislav Mikhailovich
Petersburg State Transport University
Emperor Alexander I (PSTU).
9, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031,
the Russian Federation.
Second year master's student of the Department
of Building Materials and Technologies PSTU.
Phone: +7 (911) 146-44-51
E-mail: PleshakovSM@fsa.gov.ru

Verisokina Aleksandra Alekseevna
Petersburg State Transport University
Emperor Alexander I (PSTU).
9, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031,
the Russian Federation.
Student of the Faculty of Industrial and Civil
Engineering PSTU.
Phone: +7 (988) 088-89-95
E-mail: aleksandra.verisokina@gmail.com

Verisokina Maria Alekseevna
Petersburg State Transport University
Emperor Alexander I (PSTU).
9, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190031,
the Russian Federation.
Student of the Faculty of Industrial and Civil
Engineering PSTU.
Phone: +7 (988) 088-89-96
E-mail: maria.verisokina@gmail.com

М. М. Кутень

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
Новосибирск, Российская Федерация

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, ВОЗНИКАЮЩАЯ В СТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Данная работа посвящена исследованию изменений параметров акустической эмиссии в стальных объектах трубопроводного транспорта при статическом нагружении до разрушения. Цель работы заключалась в анализе параметров дискретной акустической эмиссии, возникающей в объектах трубопроводного транспорта, в процессе статического нагружения. В ходе работы испытывались как бездефектные объекты, так и с концентраторами напряжений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, метод акустической эмиссии, трубопроводный транспорт, локация, источник, сосуд давления, концентратор напряжений, расчет на прочность.

Mariya M. Kuten

Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

ACOUSTIC EMISSION ARISING IN STEEL OBJECTS OF PIPELINE TRANSPORT UNDER STATIC LOAD

This work is devoted to the study of changes in the parameters of acoustic emission in steel objects of pipeline transport under static loading to failure. The aim of the work was to analyze the parameters of discrete acoustic emission arising in pipeline transport objects during static loading. During the work, both defect-free objects and those with stress concentrators were tested.

Keywords: non-destructive testing, acoustic emission method, pipeline transport, location, source, pressure vessel, stress concentrator, strength calculation.

Метод акустической эмиссии (АЭ) является современным, развивающимся методом неразрушающего контроля (НК), позволяющим регистрировать, анализировать и обрабатывать информацию об исследуемом

объекте в режиме реального времени [1, 2]. Метод нашел широкое применение как в цеховых, так и в сложных полевых условиях, позволяя проводить и эффективный периодический контроль, и длительный мониторинг различных металлических объектов, таких как трубопроводы, сосуды давления, контейнеры для сжиженного хлора [3, 4] и др. В реальных условиях контроля из-за ограниченного доступа к протяженному крупногабаритному объекту (например, защитный или теплоизоляционный кожух) особую актуальность приобретает возможность использования систем АЭ мониторинга, имеющих высокую чувствительность к развивающимся дефектам и не требующих доступа ко всей поверхности контролируемого объекта [2, 5].

В процессе работы была проведена серия гидростатических нагружений сосудов давления, выполненных из стали марки 20. Сигналы АЭ регистрировались с помощью диагностической цифровой АЭ системы СЦАД 16.03 (№ 18892-05 в Госреестре), принцип работы и основные технические характеристики описаны в работе [6]. Для измерения напряженно-деформированного состояния материала объекта контроля использовали тензодатчики совместно с быстродействующим измерительным тензометрическим комплексом «Динамика-3» [7] (№ 66938-17 в Госреестре). Обработка данных проводилась с использованием стандартизированных методик [8-10].

Особое внимание уделили предварительному расчету сосуда давления на прочность, осуществляемому отдельно для цилиндрической обечайки и днищ, ввиду специфики проведенных испытаний до разрушения.

Гладкие цилиндрические обечайки сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением, рассчитывали по формулам:

$$S \geq S_p + C, \quad (1)$$

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P}, \quad (2)$$

где S_p – расчетная толщина стенки обечайки, мм. По результатам прямых многократных измерений фактическая толщина стенки обечайки S составила 6 мм. Суммой прибавок к расчетным толщинам стенок C принято пренебречь, поскольку расчет производился на фактическую толщину стенки обечайки. Расчетное внутреннее избыточное давление P для элементов сосуда было принято равным рабочему давлению, которое соответствует 0,8 МПа. Внутренний диаметр сосуда D , согласно чертежам, составляет 209 мм. За

допускаемое напряжение $[\sigma]$ приняли значение условного предела текучести 280 МПа. По типу сварного соединения и виду выполняемой сварки определен коэффициент прочности сварного шва φ , равный 0,65.

Таким образом, расчетная толщина стенки обечайки S_p составила 4,6 мм, что меньше фактической толщины стенки S , то есть условие выполняется.

Допускаемое внутреннее избыточное давление на стенки обечайки рассчитывали по формуле:

$$P_d = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (S - C)}{D + (S - C)}. \quad (3)$$

Расчет толщины стенки плоских круглых днищ, подверженных внутреннему избыточному давлению, осуществлялся по формулам:

$$S_1 \geq S_{1p} + C, \quad (4)$$

$$S_{1p} = K \cdot K_0 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P}{\varphi \cdot [\sigma]}}, \quad (5)$$

где S_{1p} – расчетная толщина стенки днища, мм. Согласно чертежам на изготовление сосуда, фактическая толщина стенки днища S_1 составляет 45 мм. Расчетный диаметр днища D_p равен внутреннему диаметру обечайки D , мм.

Коэффициент K определялся в зависимости от конструкции плоских днищ (рисунок 1) по формуле:

$$\frac{S - C}{S_1 - C} < 0,25. \quad (6)$$

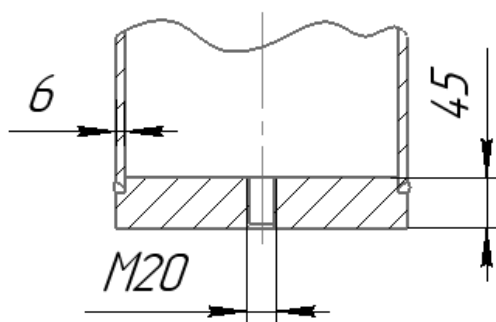


Рисунок 1 – Конструкция соединения обечайка-днище

Коэффициент ослабления плоских днищ отверстием K_0 рассчитывался отдельно для днища, имеющего одно отверстие по формуле:

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2}, \quad (7)$$

где d – диаметр отверстия в днище, равный 20 мм.

А для днищ, имеющих несколько отверстий (в нашем случае два), коэффициент ослабления K_0 рассчитывался по формуле:

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_p}\right)^3}{1 - \frac{\sum d_i}{D_p}}}, \quad (8)$$

где d_1 и d_2 – диаметры первого и второго отверстий в днище (20 мм и 10 мм соответственно).

Допускаемое внутреннее избыточное давление, оказываемое на плоские днища, определяли по формуле:

$$P_d = \left(\frac{s_{1-c}}{K \cdot K_0 \cdot D_p}\right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi. \quad (9)$$

Таким образом, согласно расчетам, допускаемое внутреннее избыточное давление для цилиндрической обечайки сосуда составило 8 МПа, для днища с одним отверстием – 19,5 МПа, для днища с двумя отверстиями – 18,4 МПа.

Нагружение объекта осуществлялось поэтапно, при этом гидростатическое давление увеличивалось. При испытании бездефектного сосуда давления наблюдался значительный рост активности АЭ событий на всех этапах при увеличении значения нагрузки до 15 МПа, а также при снижении до 0 МПа (рисунок 2). Этапы постоянного давления характеризуются резким спадом активности АЭ событий и незначительным изменением данного параметра.

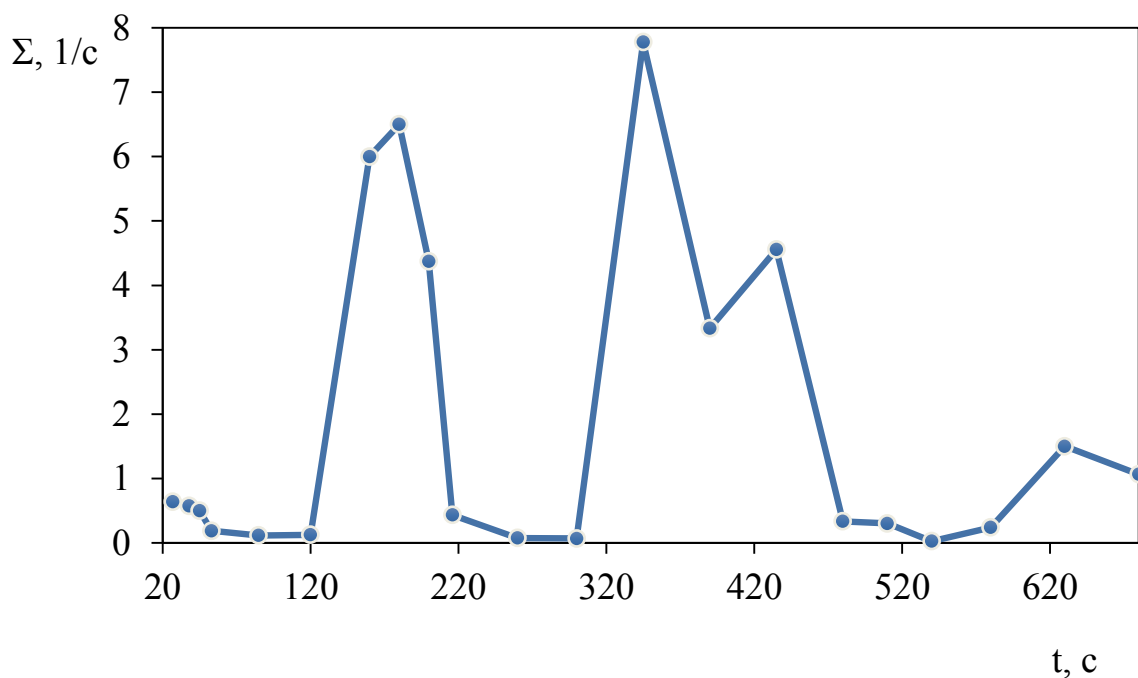


Рисунок 2 – Изменение активности АЭ событий

В ходе дальнейшей работы было построено амплитудное распределение АЭ событий отдельно для каждого этапа нагружения (рисунок 3).

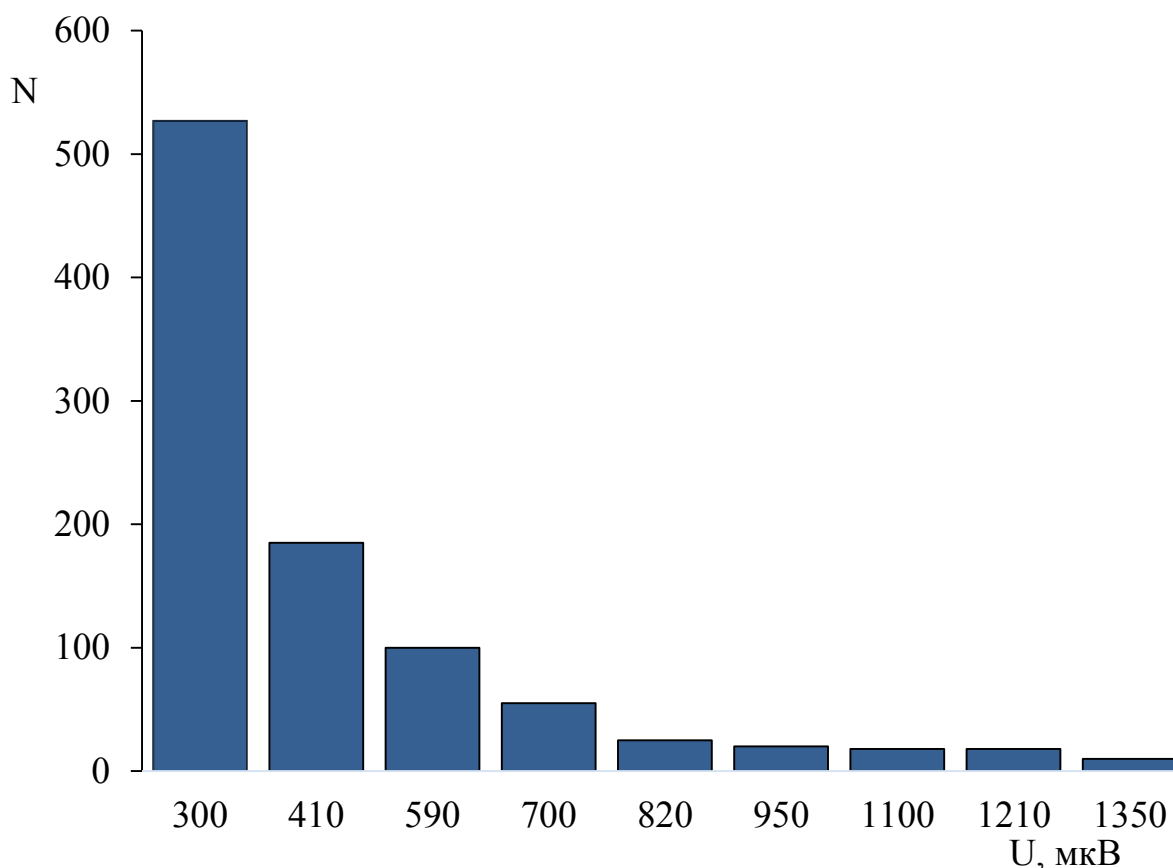


Рисунок 3 – Распределение амплитуд АЭ событий при статическом нагружении

Анализ амплитуды показал, что характер распределения сохраняется для любого из этапов нагружения бездефектного сосуда давления и остается стабильным при изменении гидростатического давления. Видимо, для объектов без выраженных источников АЭ распределение сигналов по амплитудам будет иметь аналогичный вид.

Затем на сосуд давления был нанесен искусственный дефект и установлена дополнительная акустическая антенна вокруг него. В результате проведенного исследования получена карта локации источников АЭ (рисунок 2), которая позволила условно выделить области зарегистрированных событий в зоне искусственно нанесенного концентратора напряжений (II) и в зонах сварных соединений (I и III), обеспечивающих целостность конструкции.

Регистрация АЭ сигналов осуществлялась одновременно по всем

каналам акустико-эмиссионной системы. Область искусственного дефекта (II) охватывалась приемными преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) № 8, 9, 10, 11. Для регистрации АЭ в области сварного соединения, расположенного в верхней части сосуда (I), применялись ПАЭ № 0, 1, 10, 9. Из области сварного соединения в нижней части сосуда (III) сигналы первоначально приходили на ПАЭ № 2, 3, 11, 8.

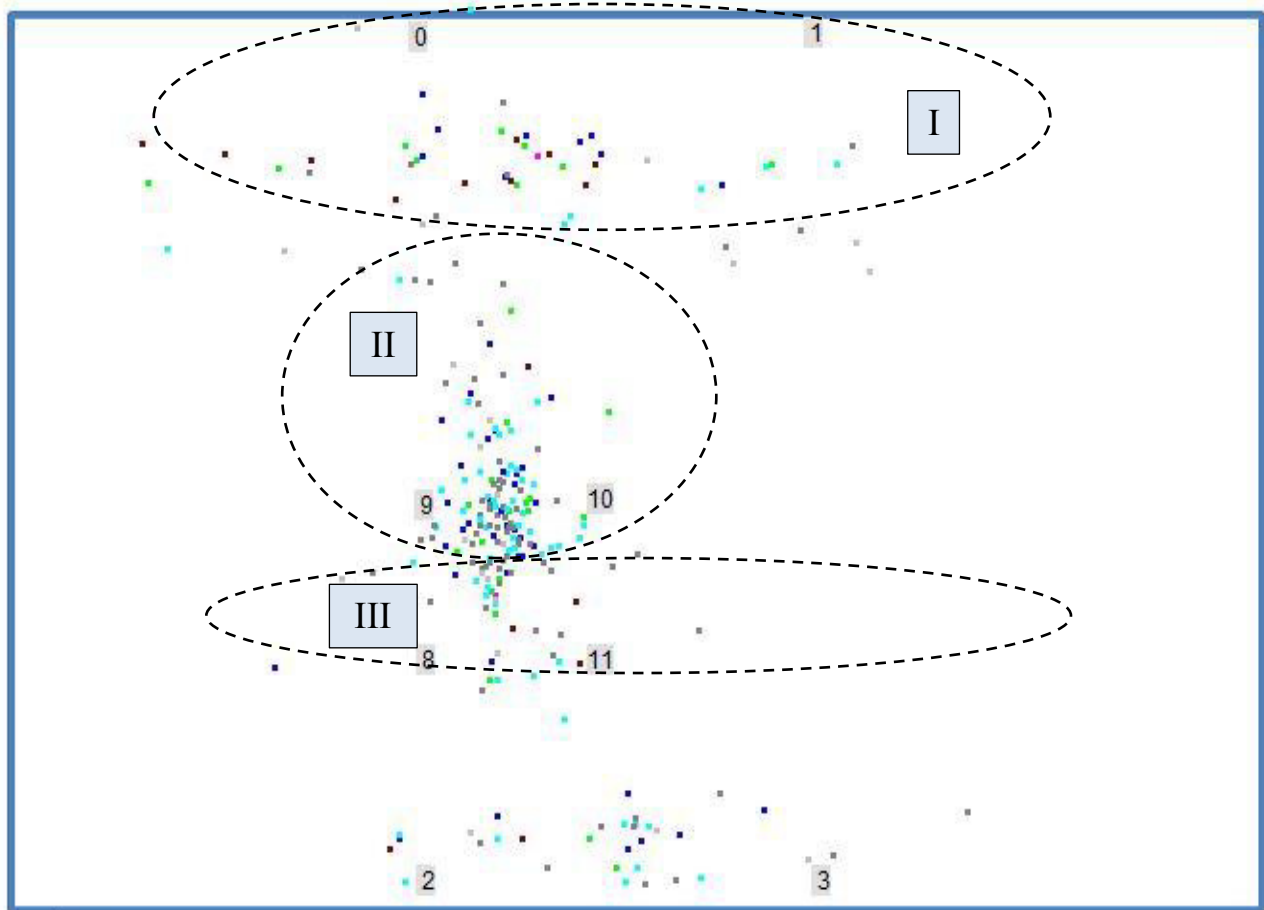


Рисунок 4 – Локационная карта сосуда давления (I, III – зоны сварных соединений; II – зона концентратора; 0, 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11 - № ПАЭ)

Большая часть событий АЭ приходится на зону II, в которой было зафиксировано 1196 событий, из зоны I система зарегистрировала 1134 события АЭ, наименьшим количеством событий характеризуется зона III – 509.

В результате исследований было установлено, что активность АЭ событий напрямую зависит от изменения величины нагрузки, т.е. увеличения или уменьшения, при испытании бездефектного объекта. При этом постоянное внутренне давление характеризуется резким падением активности.

Распределения амплитуд АЭ событий не зависят от этапа нагружения и сохраняют свой характер изменения для сосуда давления без видимых дефектов. При испытании с концентратором напряжения, благодаря зонной локации, удается разделять сигналы от разных типов источников. Таким образом, с помощью метода АЭ возможно проводить контроль опасных производственных объектов трубопроводного транспорта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90090.

Список литературы

1. Кхун, Х. Х. А. Идентификация развивающихся повреждений в металлических материалах на основе метода акустической эмиссии / Х. Х. А. Кхун, Х. Зо, О. В. Башков – Текст : непосредственный // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2020. – С. 78-80.

2. Investigation of acoustic emission in low-carbon steels during development of fatigue cracks / D. V. Chernov, V. M. Matyunin, V. A. Barat [et al]. – Text: direct // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Т. 54. – №. 9. – PP. 638-647.

3. Acoustic emission based prediction of local stress exposure / Markus G. R. Sause, Stefan Schmitt, Birte Hoeck, Andreas Monden. – Text: direct // Composites Science and Technology. – 2019. – Т. 173. – PP. 90-98.

4. Evaluation of acoustic emission source location in long steel pipes for continuous and semi-continuous sources / M. F. Shehadeh, A. H. Elbatran, Ahmed Mehanna [et al]. – Text: direct // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2019. – Т. 38. – №. 2. – PP. 1-15.

5. Гаспарянц, Р. С. Техническое диагностирование объектов трубопроводного транспорта нефти / Р. С. Гаспарянц. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. – 2008. - № 4. – С. 40-43.

6. Пат. 2736171 Российская Федерация, G 01 N 29/14. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство. / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Чернова В.В., Серьезнов А.Н. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего образования «Сибирский

государственный университет путей сообщения». - № 2020116280; заявл. 27.04.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 32 – 13 с.: ил.

7. Multichannel strain-gauging system equipped with microprocessor for strength measurements of structures / L. N. Stepanova, E. Yu. Lebedev, S. I. Kabanov [et al]. – Text: direct // Russian journal of nondestructive testing. – 2001. – Т. 37. – №. 4. – PP. 306-312.

8. Применение технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко, М. А. Овсиенко. – Текст : непосредственный // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. №. 1. – С. 34-41.

9. Степанова Л. Н. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации / Л. Н. Степанова, В. В. Чернова, И. С. Рамазанов. – Текст : непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2019. – №. 8. – С. 12-21.

10. Программа для ЭВМ. 2019665545 Российская Федерация. Программа обработки и анализа сигналов акустической эмиссии. / Башков И. О. ; заявитель и патентообладатель Башков И. О. – № 2019665545; заявл. 18.11.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. №12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кутень Мария Михайловна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС.
Тел.: +7 (3833) 28-03-02
E-mail: mariabychkova94@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuten Mariya Mikhailovna

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia, the Russian Federation.
Post-graduate student of the department «Electrical engineering, diagnostics and certification» STU.
Phone: +7 (3833) 28-03-02.
E-mail: mariabychkova94@mail.ru.

О. Б. Скворцов, В. И. Сташенко, О. А. Троицкий
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),
г. Москва, Российская Федерация.

ВИБРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Рассмотрены особенности развития процессов возбуждения вибрационного отклика в материале проводника при действии электрического импульса. Показано, что такой отклик зависит от полярности действующего электрического импульса, а его амплитуда линейно зависит от амплитуды импульса. Отмечено, что возбуждение затухающих колебательных механических процессов определяется ударными механическими процессами в моменты начала и переднего и заднего фронтов электрического импульса. При этом ударные механические воздействия близки по амплитуде и имеют противоположное направления. Для начального момента переднего фронта ударное механическое воздействие формируется при незначительном токе через проводник и практически не зависит от последующего изменения электрического тока в проводнике. Полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимизированных режимов дополнительного электрического воздействия на металлические заготовки при их механической обработке с применением электропластического эффекта.

Ключевые слова: электрический импульс, металлический проводник, вибрация, удар, электропластический эффект.

Oleg B. Skvortsov, Vladimir I. Stashenko, Oleg A. Troitsky
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH),
Moscow, the Russian Federation

VIBRATION PROCESSES IN METAL CONDUCTORS UNDER EXPOSURE TO PULSE ELECTRIC CURRENTS

The features of the development of processes of excitation of a vibration response in the material of a conductor under the action of an electric pulse are considered. It is shown that such a response depends on the polarity of the acting electric pulse, and its amplitude depends linearly on the pulse amplitude. It is noted that the excitation of damped oscillatory mechanical processes is determined by shock mechanical processes at the moments of the beginning and the leading and trailing edges of an electric pulse. In this case, the impact mechanical effects are close in amplitude and have the opposite direction. For the initial moment of the leading edge, a mechanical shock is formed at a small current through the conductor and is practically independent of the subsequent change in the electric current in the conductor. The results obtained can be used in the selection of

optimized modes of additional electrical action on metal blanks during their machining using the electroplastic effect.

Keywords: electrical impulse, metal conductor, vibration, shock, electroplastic effect.

Введение

Практическое применение электропластического эффекта при обработке металлов давлением показывает, что необходимы исследования особенностей механизма взаимодействия проводника и электрического импульса (ЭИ). Экспериментальное исследование процессов развития вибрационного отклика в проводнике на воздействие ЭИ показало, что такой отклик зависит от полярности ЭИ [1, 2] и практически линейно зависит от амплитуды ЭИ. Контроль динамического действия ЭИ по сигналам создаваемого механического ускорения показывает, что отклик характеризуется доминирующими поперечными колебаниями, синхронными с начальными моментами переднего и заднего фронтов ЭИ в виде ударных импульсов, переходящих в затухающие гармонические колебания. Пример синхронной записи сигналов от датчиков ускорения (акселерометров) и бесконтактных датчиков магнитной индукции представлен на рисунке 1. Сигналы от акселерометров, установленных в противоположных относительно оси проводника точках, имеют противоположные знаки, хотя их векторы чувствительности направлены по радиусу сечения проводника. Это показывает, что в поперечном направлении проводник испытывает изгибные колебания.

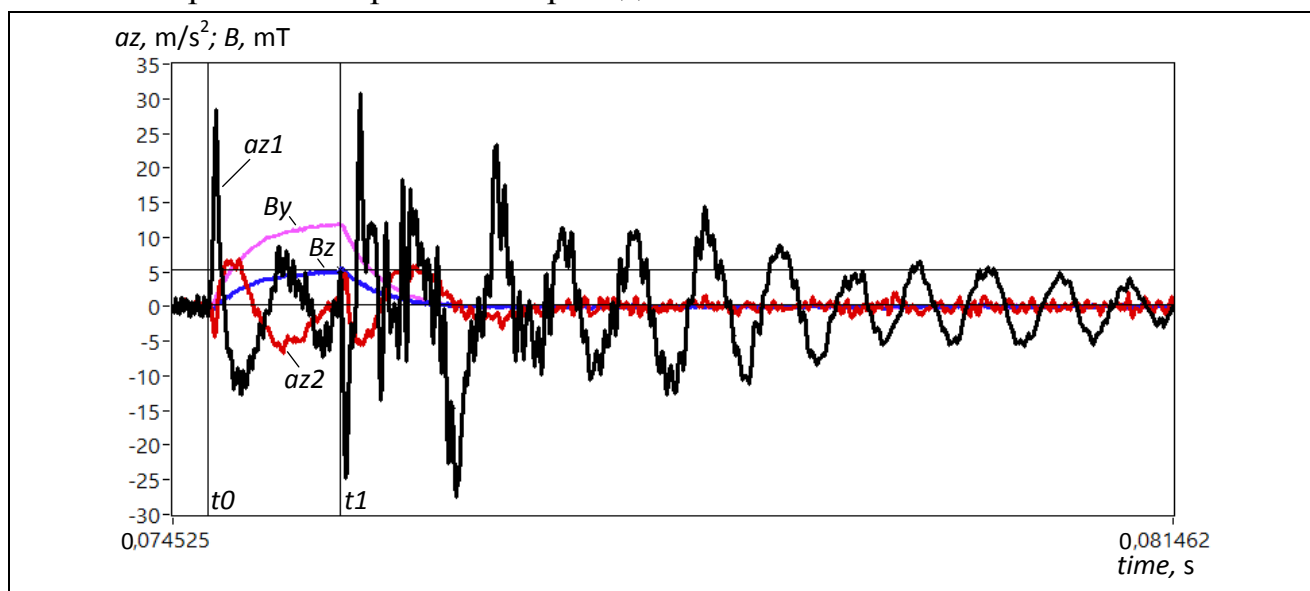


Рисунок 1 – Сигналы от акселерометров поперечных ускорения az_1 и az_2 , а также ортогональных составляющих магнитной индукции B_y и B_z с осями чувствительности, лежащими в плоскости поперечного сечения проводника

Колебания, вызванные действием переднего и заднего фронтов ЭИ, складываются с учетом их фазовых соотношений, усиливая или ослабляя вибрацию проводника при действии ЭИ.

Методика измерений и обсуждение результатов

При обработке металлических заготовок давлением (резка, сверление, прокатка, волочение, плющение) с применением электропластического эффекта, важное значение имеет выбор технологических параметров воздействия ЭИ. На рисунке 2 показан пример реализации прокатки листовой заготовки с дополнительным воздействием ЭИ. На эффективность применения электропластического эффекта в этом случае влияет большое количество факторов. В их число входят не только параметры действующих ЭИ, но и геометрические размеры и форма заготовки, ее материал, температурный режим обработки, а также дополнительные внешние воздействия в виде действия ультразвука или СВЧ излучения. Для получения объективной оценки влияния различных факторов условия экспериментальных исследований можно упростить, ограничившись изучением действия ЭИ на статичную заготовку из металла без воздействия внешних механических нагрузений. В этом случае датчики ускорения могут быть закреплены непосредственно на поверхности заготовки.

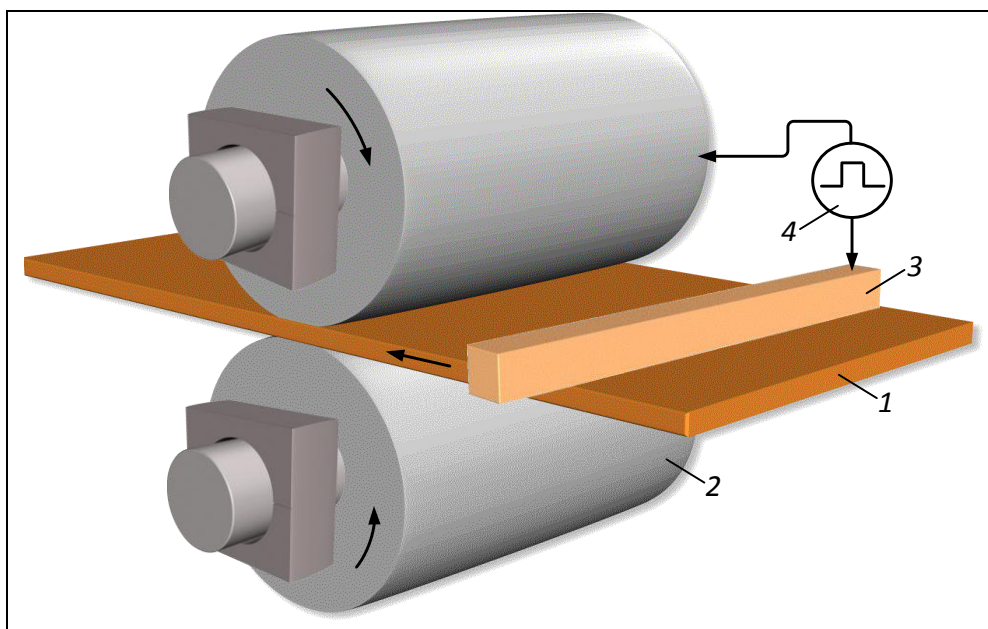


Рисунок 2 – Структура устройства для обработки давлением заготовки 1 из металла с использованием инструментов 2 давления. Дополнительный контакт 3 обеспечивает подключение заготовки к генератору 4 электрических импульсов

Исследование вибрационного отклика на силовое действие ЭИ показывает, что механические процессы развиваются в несколько стадий. В моменты начала фронтов ЭИ в материале заготовки генерируется ударный механический процесс малой длительности. Для соседних фронтов ЭИ знаки таких ударных механических процессов противоположны, а их формы близки. Ударные механические воздействия формируют в материале заготовки затухающие колебания вибрационного типа. Форма и амплитуда этих колебаний практически не зависят от дальнейших изменений и уровня тока через заготовку. После этого наблюдается плавное увеличение тока через заготовку, что определяется самоиндукцией образца и скин-эффектом.

Такие различия между моментами возникновения ударных механических импульсов и изменений тока через заготовку показывают, что отсутствует прямая связь между током через металл и механическим откликом [3, 4]. Можно предположить, что ударный механический отклик вызывают быстрые изменения внешнего электрического поля при действии ЭИ, а механизмы влияния на кристаллическую структуру металла в виде «электронного ветра» не имеют существенного значения. При этом между амплитудными характеристиками внешнего ЭИ и амплитудными оценками величины вибрационного отклика имеется практически линейная зависимость, как это следует из полученных экспериментальных результатов, показанных на рисунке 3. При этом влияние на пластичность материала заготовки может быть связано не с прямым действием электрических полей на кристаллическую структуру металла, а с воздействием возникающих затухающих вибрационных процессов, которые сами по себе могут быть причиной изменения механических свойств материала [5].

Рассмотренные особенности развития вибрационного отклика во времени и его зависимости от амплитуды ЭИ позволяют предположить, что указанные в [6] механизмы электропластического действия ЭИ не дают доминирующего вклада в наблюдаемый электропластический эффект. Это относится к тепловым эффектам действия тока и к вкладу пинч-эффекта, влияние которых существенно нелинейно зависит от величины плотности тока а их направление не зависит от полярности тока. Предпочтение может быть отдано механизмам прямого быстрого электрического действия изменений электрических полей на металл [7, 8].

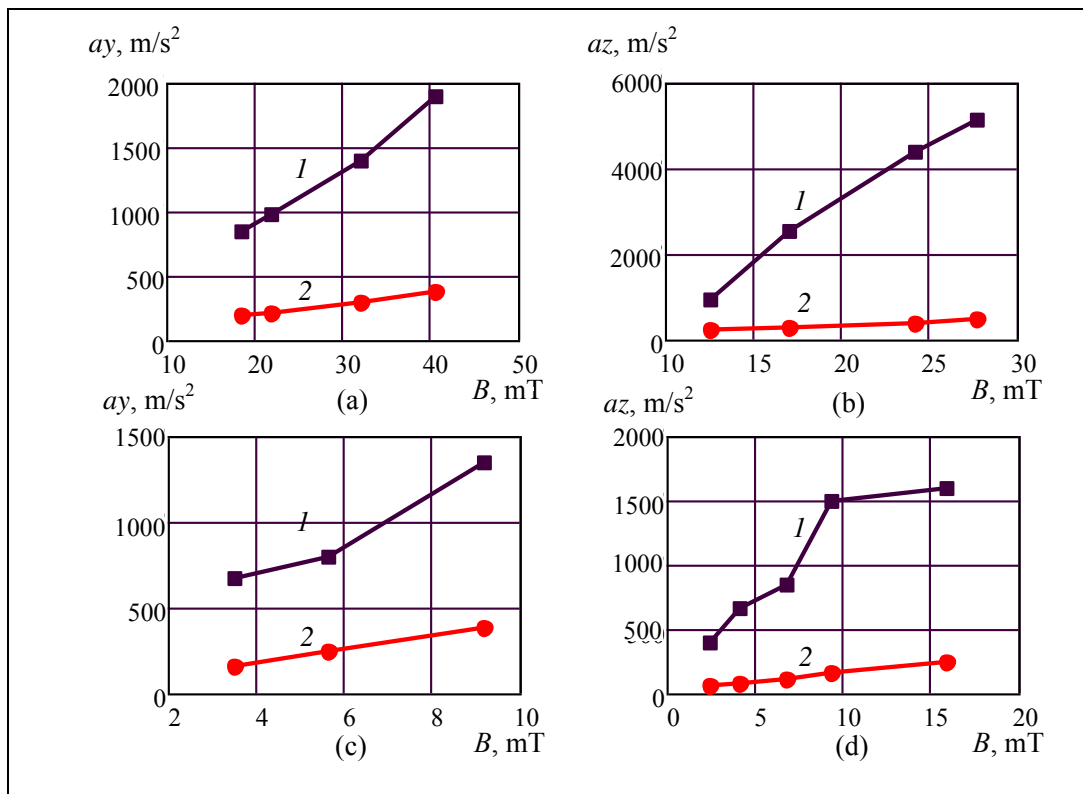


Рисунок 3 – Зависимость величины размаха вибрационного ускорения в продольном a_y и поперечном a_z направлениях для проводника от размаха сигнала магнитной индукции B для заготовок из серебра (а, б) и нержавеющей стали (с, д) круглого 1 и прямоугольного 2 сечения

Действие прямоугольного ЭИ на проводник сопровождается в начальные моменты времени скачками величины магнитной индукции B . Такие изменения могут быть значительными, и переходить затем в плавное изменение магнитной индукции, связанное с влиянием самоиндукции проводника и проявлением скин-эффекта. Пример таких изменений магнитной индукции представлен на рисунке 4. Такие особенности отклика магнитной индукции на воздействие ЭИ, и их совпадение по времени формирования с проявлением ударного механического отклика могут быть связаны со сдвиговыми деформациями в материале проводника и явлениями внутреннего трения [9, 10].

Ударные механические процессы и скачкообразные изменения магнитного поля происходят на переднем и заднем фронтах ЭИ и имеют противоположный знак. Эти процессы быстро заканчиваются. Возникающие механические деформации затем переходят в затухающие механические колебания, но частоты таких колебаний существенно ниже частот резонансов типичных для проявления вибропластического эффекта [5, 11-12].

Действие затухающих вибрационных процессов на материал проводника

может сопровождаться такими явлениями, как снятие остаточных механических напряжений и снижение порога пластической деформации из-за циклической усталости [13] в материале проводника.

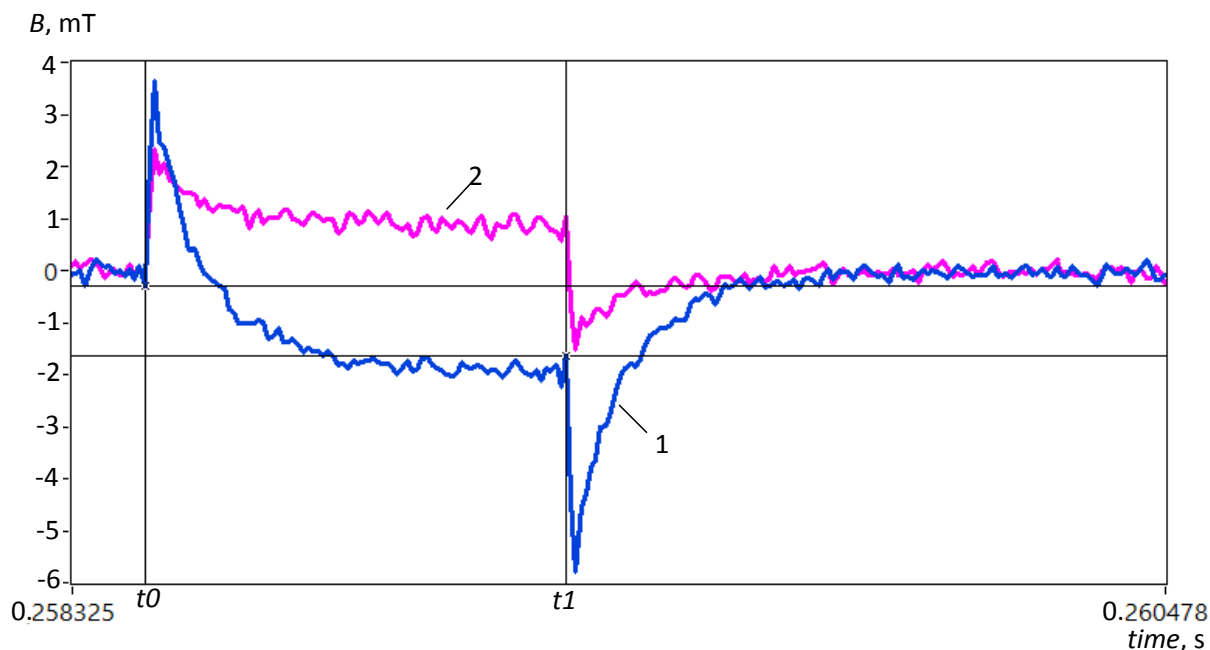


Рисунок 4 – Ортогональные составляющие магнитной индукции B вокруг проводника при воздействии прямоугольного ЭИ для проводника диаметром 3 mm из титана. Длительность ЭИ $t_1-t_0=830$ мкс. Круговая компонента магнитной индукции 1, осевая компонента магнитной индукции 2

Выводы

Полученные результаты позволяют оценить механизмы проявления электропластического эффекта как последовательное во времени взаимодействие внешнего электрического импульса с материалом проводника в виде формирования ударных механических импульсов малой длительности в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса. Последующие плавное увеличение тока и возникающие затухающие вибрации не связаны между собой. Такие особенности развития процессов в материале заготовки позволяют выделить независимые факторы, влияющие на изменение механических свойств и расширить область возможных технологических режимов, оптимизирующих процесс обработки металлов.

Список литературы

1. Воздействия импульсами тока и СВЧ-излучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в

проводниках / О. А. Троицкий, В. И. Сташенко, В. С. Савенко [и др.]. – Москва : Изд-во «Ким Л.А.», 2019. – 278 с. – Текст : непосредственный.

2. Интенсивная пластическая деформация металла при токовых и СВЧ - воздействиях. Новые данные и закономерности / О. А. Троицкий, В. И. Сташенко, О. Б. Скворцов [и др.]. – Москва : Изд-во «Ким Л.А.», 2020. – 342 с.

3. Суркаев, А. Л. Исследование высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах на основе электрического взрыва проводников / А. Л. Суркаев // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2017. – 279 с.

4. Батаронов, И. Л. Механизмы влияния электрического поля и электрического тока на пластическую деформацию металлов / И. Л. Батаронов // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2000. – 280 с.

5. Morozenko, V. N. Rezonansyj vibroplasticheskiy effect / V. N. Morozenko, E. V. Kuznecov // Izvestija RAN. Metally. – № 3. – 2000. – P.104.

6. Guan, L. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals / L. Guan, G. Tang, P. K. Chu // J. Mater. Res.. – №. 7. – 2010. – P. 1216-1224.

7. Сергейчев, К. Ф. Распространение аксиально-симметричной моды типа E₀ на тонких диссипативных проводниках и в диэлектрической трубке с водой / К. Ф. Сергейчев, Д. М. Карфидов, М. В. Шеповалов. – Текст : непосредственный // Журнал радиоэлектроники. – № 7. – 2015 – 12 с.

8. Purcell, E. M. Electricity and magnetism / E. M. Purcell, D. J. Morin // Harvard University, Massachusetts, Cambridge University Press, 2013. – 868 p.

9. Прочность, устойчивость, колебания / Справочник в трех томах // Том 1. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – Москва : Машиностроение, 1988. – 831 с.

10. Головин, И. С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов / И. С. Головин. – Москва : Изд. дом МИСиС, 2012. – 247 с. – Текст : непосредственный.

11. Кузнецов, Е. В. Синергетические принципы самоорганизации пластической деформации твёрдых кристаллических тел / Е. В. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – №3 (293). – 2012. – С.38-41.

12. Любимов, Д. Н. Физико-химические процессы при трении / Д. Н. Любимов, В. А. Рыжиков. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2003. – 142 с. – Текст : непосредственный.

13. Скворцов, О. Б. Вибрационный мониторинг и прочность конструкционных элементов с учетом инерционных свойств материалов при воздействии широкополосной вибрации / О. Б. Скворцов. – Текст : непосредственный // Инженерный журнал: наука и инновации. – № 6. – 2020. – С.17–24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скворцов Олег Борисович

Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН (ИМАШ РАН).
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва, 101990, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории структурной акустики ИМАШ РАН.
Тел.: +7 (499) 135-81-20
E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

Сташенко Владимир Иванович

Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН (ИМАШ РАН).
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва, 101990, Российская Федерация.
Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики и технологии упрочнения ИМАШ РАН.
Тел.: +7 (499) 135-30-58
E-mail: vis20-11@rambler.ru

Троицкий Олег Александрович

Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН (ИМАШ РАН).
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва, 101990, Российская Федерация.
Доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики композиционных материалов, ИМАШ РАН.
Тел.: +7 (499) 135-30-72
E-mail: oatroitsky@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Skvortsov Oleg Borisovich

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH).
4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, the Russian Federation.
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Structural Acoustics Laboratory IMASH RAS.
Phone: +7 (499) 135-81-20
E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

Stashenko Vladimir Ivanovich

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH).
4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, the Russian Federation.
PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, laboratories of mechanics and hardening technology IMASH RAS.
Phone: +7 (499) 135-30-58
E-mail: vis20-11@rambler.ru

Troitsky Oleg Alexandrovich

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH).
4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Composite Materials Mechanics Laboratories, IMASH RAS.
Phone: +7 (499) 135-30-72
E-mail: oatroitsky@mail.ru

О. В. Шарков, В. П. Пацкан

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта),
г. Калининград, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Выполнен анализ типовых мехатронных комплексов, наиболее подходящих для имитационного моделирования машиностроительных процессов производства: Camozzi Training Simulators; Festo Didactic; Mitsubishi Electric; Mechatronics Concept Designer. Представлены результаты сравнения их технического уровня и эффективности. В качестве критериев сравнения предложены модульность, вариативность и IT-совместимость.

Ключевые слова: машиностроение, мехатроника, моделирование, автоматизация производства, технологический процесс.

Oleg V. Sharkov, Viktor P. Patskan

Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU), Kaliningrad, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING MECHATRONIC COMPLEXES FOR SIMULATION OF MACHINE-BUILDING PROCESSES

The analysis of typical mechatronic complexes, most suitable for simulation of machine-building production processes, has been carried out: Camozzi Training Simulators; Festo Didactic; Mitsubishi Electric; Mechatronics Concept Designer. The results of comparison of their technical level and efficiency are presented. Modularity, variability and IT compatibility are proposed as comparison criteria.

Keywords: mechanical engineering, mechatronics, modeling, production automation, technological process.

Наиболее эффективным способом снижения затрат в машиностроении на этапах проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ является использование имитационного моделирования

технологических процессов [1–2]. Моделирование может включать как расчёты основных операций, так и проверку вариантов для выявления наиболее приемлемых инженерных решений. Следует отметить, что такой вид моделирования можно использовать и в учебном процессе.

В настоящее время для имитационного моделирования широкое применение находят мехатронные комплексы [3–5], выпускаемые различными компаниями: Mitsubishi, Komatsu, Fanuc (Япония); Camozzi (Италия); Festo, Siemens (Германия), ABB (Швейцария) и др.

Проведем сравнительный анализ наиболее используемых в машиностроении мехатронных комплексов, выпускаемых специализированными подразделениями данных компаний.

Компания Camozzi специализируется на пневмо- и гидроавтоматике, а также занимается автоматизацией технологических процессов с использованием собственной продукции.

В мехатронных комплексах, произведенных Camozzi Training Simulators присутствуют готовые стенды (собранные вместе пневматические, гидравлические, электромеханические системы), так и разборные платформы-станции. Примерами могут служить стенды типа DID-BASE-F в собранном исполнении или DID-BASE-MINI. Такой тип оборудования позволяет учитывать различные аспекты устройства мехатронной установки, имитировать различные нештатные ситуации, а также непосредственно перенести принципиальные схемы на конкретные производственные условия. DID-BASE-MINI также можно рассматривать как комплект DID-BASE-F или DID-BASE-T, разобранный по различным компонентам сборки.

Для автоматизированного или автоматического управления к комплектам мехатронных устройств прилагается программное обеспечение от компании Siemens – Siemens SIMATIC STEP 7 Basic. Данное программное обеспечение предназначено для программирования контроллеров семейства SIMATIC S7-200, SIMATIC S7-300 и др.

Компания Festo, как и компания Camozzi, занимается преимущественно пневмоустройствами и пневмоавтоматикой. Но в отличие от последней, Festo вышла на рынок автоматизации раньше и шире по номенклатуре. Помимо пневматики в ассортименте Festo также присутствует и гидравлика, механика,

электромеханические устройства, датчики, а также собственный промышленный контроллер типа СЕСС.

Мехатронные комплексы, выпускаемые Festo Didactic представлены системой модульных станции MPS, которые являются сборными системами. MPS состоят из передвижной тумбы, плиты-основания и, в зависимости от решаемых задач, различного пневматического, гидравлического, электромеханического, электронного оборудования. Одной из главных отличительных черт этих станций – возможность объединения оборудования в более сложную конфигурацию.

Для моделирования работы пневматического оборудованию компания создала программное обеспечение Festo FluidSim, которое позволяет создавать принципиальные схемы пневматических систем, а затем проверять их работоспособность и характеристики (расход, давление и т.д.).

Компания Siemens занимается всем в области машиностроения, от проектирования до автоматизации технологических процессов.

Самыми распространенными решениями по вопросам имитационного моделирования являются: NX NASTRAN (моделирование объектов методом конечных элементов); комплекс SIMATIC (набор аппаратно-программных решений: контроллеры, датчики, программы управления и проектирования); комплекс SIMOTION – высокопроизводительная масштабируемая система управления движением; система ЧПУ SINUMERIK.

Мехатронные комплексы, произведенные Mechatronics Concept Designer имеют простые в использовании принципы моделирования и симуляции, которые позволяют быстро создавать и проверять альтернативные концепции инженерных решений на ранних этапах цикла разработки. Комплексы позволяют не только увидеть, как выглядит конкретное инженерное решение, но и проверить его работоспособность. Эта возможность обеспечивается библиотекой повторного использования, из которой вы можете быстро добавлять данные в функциональную модель. Данные включают соединения, движение, датчики, исполнительные механизмы, поведение при столкновении и другие кинематические и динамические свойства для каждого компонента.

Компания Mitsubishi в отличие от Siemens больше нацелена непосредственно на производство: тяжелое машиностроение; кораблестроение; станкостроение; автомобилестроение; робототехника и др. Как и любая

крупная компания она выпускает продукцию для автоматизации технологических производств, в том числе системы мехатроники и робототехники.

Подразделение компании Mitsubishi Electric производит широкий ассортимент моделей роботов. Например, линейка передовых роботов типа MELFA отличается высокой скоростью, точностью, компактностью и долговечностью. Роботы MELFA обеспечивают высокую производительность в своем классе для малых и средних робототехнических приложений.

Ассортимент продукции включает в себя почти универсальные роботы с шарнирным манипулятором с 6 степенями свободы и полезной нагрузкой от 2 до 20 кг, а также роботы SCARA с 4 степенями свободы и полезной нагрузкой от 3 кг до 70 кг для задач сборки и укладки.

Две специальные модели – уникальные роботы высокой точности с конструкцией параллельных рук для очень высокоскоростных задач микрообработки с полезной нагрузкой до 5 кг.

При таком широком ассортименте мехатронных комплексов возникает задача выбора наиболее оптимального варианта для имитации конкретного технологического процесса.

Можно предложить следующий подход для анализа и выбора мехатронного комплекса. На первом этапе назначаются несколько критериев, наиболее полно описывающие эффективность методов и подходов, используемых в каждом комплексе.

Например, будем использовать следующих три критерия – модульность, вариативность, IT-совместимость.

Модульность – позволяет оценить возможность изменения общей конфигурации комплекса.

Вариативность – позволяет оценить возможность дополнения комплекса оборудованием, не входящим в основную комплектацию или использовать альтернативные схемы сборки.

IT-совместимость – позволяет оценить, насколько предустановленные программные средства обеспечивают решение задач имитации технологического процесса.

Для количественной оценки этих критериев будем использовать пятибалльную шкалу рангов, в которой 1 – самая низкая оценка, а 5 – самая

высокая (таблица 1). Возможно использование и шкал с другими количественными оценками – десятибалльную или процентную (от 0 до 100%).

Таблица 1

Шкала оценивания эффективности мехатронных комплексов

Оценка (ранг)	Балл	Характеристика ранга
Отлично	5	Универсальные модули, гибкая вариативность оборудования, программное обеспечение позволяет автоматизировать работу, симитировать комплекс в целом.
Хорошо	4	Модули подходят под конкретное выполнение задач, отсутствует подключение сторонних контроллеров, программное обеспечение позволяет автоматизировать работу, но не имитирует комплекс в целом.
Удовлетворительно	3	Модули подходят под конкретное выполнение задач, отсутствует возможность подключать оборудование других производителей, программное обеспечение позволяет только автоматизировать работу.
Неудовлетворительно	2	Модульность отсутствует, отсутствует возможность подключать оборудование других производителей, программное обеспечение не позволяет автоматизировать решения задач.

Каждому баллу соответствуют качественные параметры. Параметры можно назначать исходя из опыта работы конкретного предприятия, мнения экспертов и специалистов, сведений, содержащихся в нормативной документации и технической литературе.

Затем строится диаграмма (рисунок 1), на которой каждому типу мехатронного комплекса соотносится величина баллов для выбранных критериев. По полученным результатам на основе сравнительного анализа

выбирают самый подходящий мехатронный комплекс.

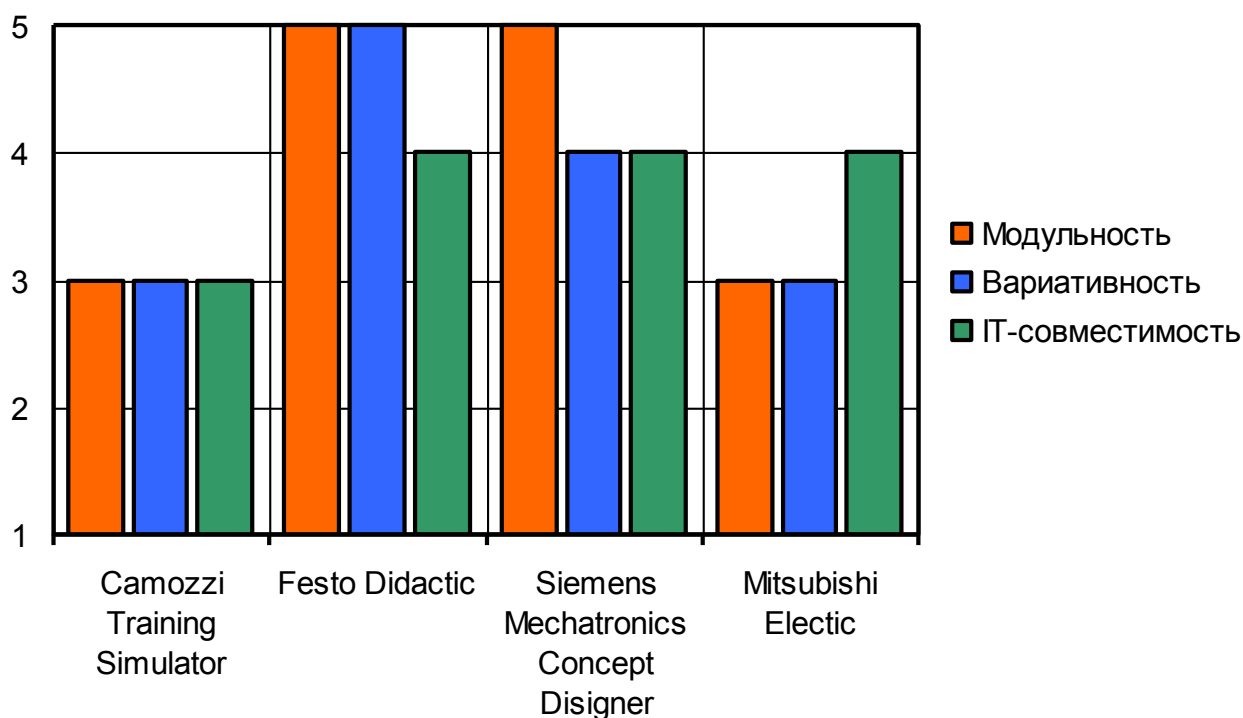


Рисунок 1 – Сравнение мехатронных комплексов различных производителей

По анализируемым мехатронным комплексам можно сделать следующие выводы:

1. Наименьшие показатели соответствуют комплексам Camozzi Training Simulators. Связано это с тем, что это подразделение компании Camozzi относительно недавно приступило к разработке мехатронных систем.

2. Наибольшие баллы наблюдаются у комплексов Festo Didactic. Компания Festo поставляет не только мехатронные комплексы и программное обеспечение, но и предоставляют дополнительные услуги.

Список литературы

1. Дреус, Ю. Г. Имитационное моделирование / Ю. Г. Дреус, В. В. Золотарёв. – Москва: Юрайт, 2020. – 142 с. – Текст : непосредственный.

2. Миронов, А. С. Анализ вариантов технологического процесса с использованием имитационного моделирования / А. С. Миронов, И. В. Ревина. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2020. – Т.7. – №1. – С. 31-38.

3. Осипов, Ю. М. О мехатронике как научной основе создания высокотехнологичной продукции / Ю. М. Осипов, С. В. Щербинин. – Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №8. – С. 2-6.

4. Сторожев, В. В. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования / В. В. Сторожев, Н. А. Феоктистов. – Москва, Дашков и К, 2015. – 412 с. – Текст : непосредственный.

5. Бобырь, М. В. Устройство мехатронного комплекса для автоматизации технологических процессов / М. В. Бобырь, А. А. Дородных, А. С. Якушев. – Текст : непосредственный // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2018. – №2. – С. 143-144.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарков Олег Васильевич

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д. 14, г. Калининград, 236016, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведения и технических систем» БФУ им. И. Канта.

Тел.: +7 (4012) 59-59-85

E-mail: osharkov@kantiana.ru

Пацкан Виктор Петрович

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д. 14, г. Калининград, 236016, Российская Федерация.

Инженер кафедры «Машиноведения и технических систем», БФУ им. И. Канта

Тел.: +7 (4012) 59-59-85

E-mail: vipatskan@kantiana.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sharkov Oleg Vasil'yevichs

Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU).

A. Nevskogo str., 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Machine Science and Technical Systems» IKBFU.

Tel.: +7 (4012) 59-59-85

E-mail: osharkov@kantiana.ru

Patskan Viktor Petrovich

Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU).

A. Nevskogo str., 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation.

Engineer of the Department of «Machine Science and Technical Systems» IKBFU.

Tel.: +7 (4012) 59-59-85

E-mail: vipatskan@kantiana.ru

В. И. Жигар

Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги»,
г. Барановичи, Республика Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗВЕНОСБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ

Для повышения уровня механизации и автоматизации процессов сборки рельсошпальной решетки на производственных базах путевых машинных станций устанавливаются звеносборочные линии. Поскольку в современных условиях наблюдается повышение объемов просроченных ремонтов железнодорожных путей, а также требований к качеству собираемой рельсошпальной решетки, вопрос повышения производительности звеносборочных линий становится все более актуальным.

Ключевые слова: путевая машинная станция, звеносборочная линия, имитационная модель, валидация, эксперименты, повышение производительности, экономическая эффективность.

Victor Ig. Zhihar

Republican Unitary Enterprise «Remput of the Belarusian Railways», Baranovichi,
Republic of Belarus

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF OPERATED HELD LINES

In order to increase the level of mechanization and automation of the assembly processes of rail and sleepers, link assembly lines are installed at the production bases of the track machine stations. Since in modern conditions there is an increase in the volume of overdue railway track repairs, as well as the requirements for the quality of the assembled rail and sleepers, the issue of increasing the productivity of link assembly lines is becoming more and more urgent.

Key words: track machine station, assembly line, simulation model, validation, experiments, productivity increase, economic efficiency.

На железных дорогах стран постсоветского пространства принята звеньевая технология сборки и укладки рельсошпальной решетки. При этом работы по сборке, демонтажу и ремонту звеньев рельсошпальной решетки

вынесены с фронтов производства работ на стационарные производственные базы путевых машинных станций – специализированные предприятия, основным видом деятельности которых является сборка рельсошпальной решетки и ремонт железнодорожных путей.

С развитием путевого хозяйства, ростом объема грузоперевозок и массы перевозимых грузов, увеличивается потребность в росте производственных мощностей путевых машинных станций, а, следовательно, и в количестве собираемых звеньев рельсошпальной решетки.

Сборка звеньев рельсошпальной решетки вручную с применением ручного путевого инструмента и средств малой механизации является трудоёмким и монотонным видом работы, что обусловлено необходимостью обработки большого числа в том числе тяжелых и крупногабаритных элементов рельсошпальной решетки. При этом к качеству сборки предъявляются повышенные технические требования в целях обеспечения безопасности движения поездов.

Так, с развитием путевого хозяйства для повышения производительности труда и уровня механизации сборки рельсошпальной решетки специализированными конструкторскими предприятиями стали разрабатываться и внедряться в производство поточные полуавтоматические звеносборочные линии, представляющие собой системы агрегатов, станков и механизмов, установленных в определенной технологической последовательности и связанных между собой межоперационными транспортирующими устройствами [1].

В настоящее время лидером в области разработки и эксплуатации звеносборочных линий является ОАО «Российские железные дороги».

В 2012 году на Белорусской железной дороге на базе путевой машинной станции Барановичи была введена в эксплуатацию полуавтоматическая поточная звеносборочная линия КБ03 [2]. Общий вид звеносборочной линии КБ03 представлен на рисунке 1.

Преимущества использования звеносборочных линий очевидны: рост производительности труда, повышение качества выпускаемой продукции, улучшение условий труда работников.

Однако, анализ патентно-реферативной информации показал, что работ, посвященных оптимизации или модернизации введенных в эксплуатацию

звеносборочных линий сравнительно небольшое количество, при этом они представляют собой конкретные инженерные решения по внесению изменений в отдельные конструктивные элементы этих звеносборочных линий. Современные системы поддержки принятия управленческих решений для оптимизации работы уже внедренных в производственный процесс звеносборочных линий не используются.



Рисунок 1 – Общий вид звеносборочной линии КБ03

В ходе исследования установлено, что наиболее эффективным и подходящим инструментом изучения комплексного влияния организационных, технологических факторов, технических характеристик элементов эксплуатируемых звеносборочных линий на выходные параметры их работы с целью оптимизации технологического процесса, является имитационное моделирование [3].

1. Имитационное моделирование позволяет исследовать реальные производственные процессы и получать технические решения на базе моделей, предусматривающих большое количество особенностей и параметров

конкретного предприятия на различных стадиях жизненного цикла производства.

2. Средства имитационного моделирования позволяют в короткие сроки моделировать изучаемые процессы, не требуя при этом больших денежных затрат.

3. Работа с имитационной моделью дает возможность проведения неограниченного числа экспериментов без вмешательства в реальный производственный процесс, при этом время проведения испытаний может быть любым и задается исследователем.

4. При работе с моделью есть возможность получения необходимых и достаточных статистических данных, которые сложно или невозможно получить в реальных производственных условиях.

К настоящему времени имитационное моделирование, как способ изучения сложных производственных систем, получило значительное развитие, в ходе которого были сформированы основные этапы создания имитационных моделей. На основании этого «классического» подхода к созданию моделей была разработана универсальная методика построения имитационных моделей звеносборочных линий, позволяющая строить их имитационные модели с погрешностью моделирования менее 5 %. При этом разработанные по предлагаемой методике имитационные модели будут простыми и понятными пользователю, целенаправленными, адаптивными, удобными в управлении и обращении, полными с точки зрения возможностей решения главных задач.

Этапы процесса создания имитационных моделей эксплуатируемых автоматизированных звеносборочных линий, предназначенных для сборки рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах, для определения зависимости выходных параметров от организационных, технологических факторов, технических характеристик их элементов, согласно разработанной методике представлены на рисунке 2 [4].

Ввиду того, что технологический процесс сборки рельсошпальной решетки на звеносборочных линиях является типовым и основан на технологии сборки рельсошпальной решетки вручную с применением ручного путевого инструмента и средств малой механизации, предлагаемая методика является универсальной - применимой для изучения звеносборочных линий различных конструкций и модификаций.



Рисунок 2 – Этапы создания имитационных моделей автоматизированных звеносборочных линий

Поэтапно, в соответствии с разработанной методикой, была разработана адекватная имитационная модель эксплуатируемой звеносборочной линии КБ03, позволяющая изучать влияние технических, технологических, эксплуатационных факторов на ее выходные параметры. Для построения имитационной модели была выбрана система имитационного моделирования «Tecnomatix Plant Simulation» компании «Siemens». Общий вид имитационной модели звеносборочной линии КБ03 представлен на рисунке 3.

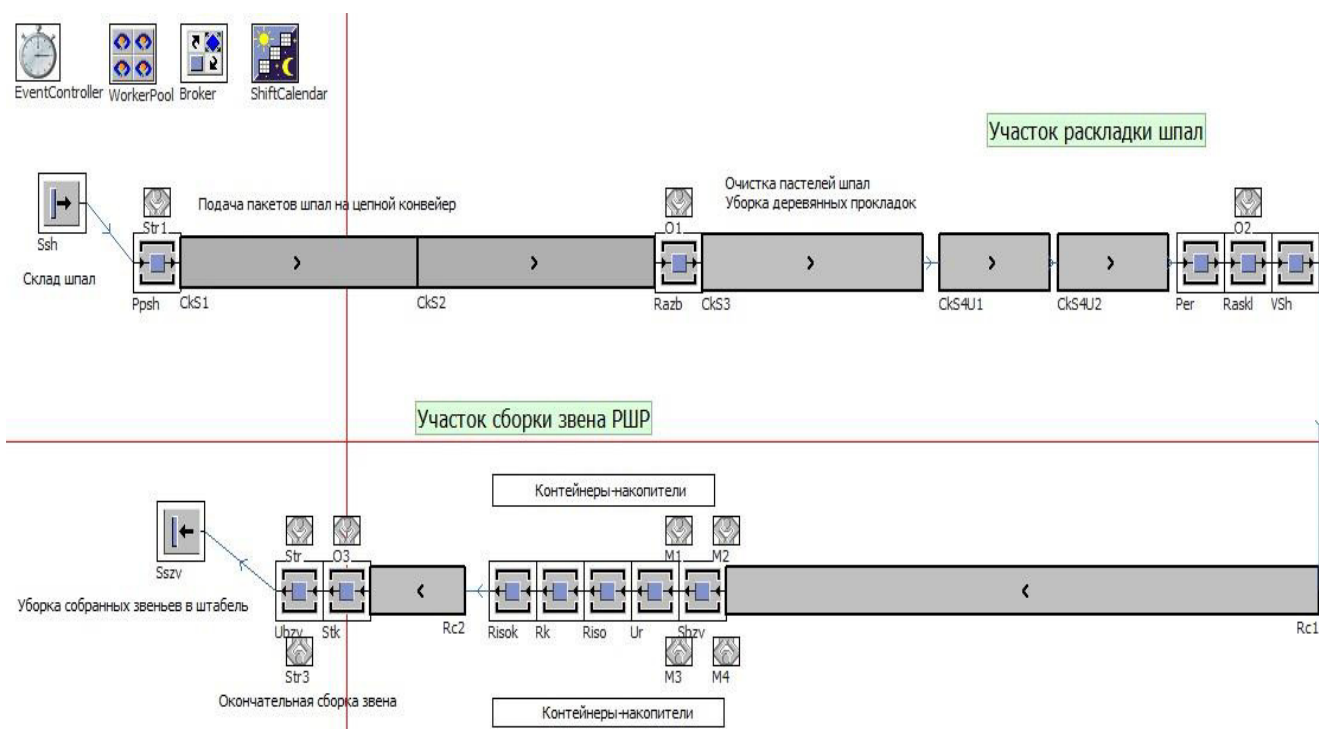


Рисунок 3 – Общий вид имитационной модели звеносборочной линии КБ03

Разработанная имитационная модель была проверена на соответствие требованиям условий непротиворечивости, чувствительности, точности, реалистичности, работоспособности. По результатам проверки модель признана адекватной, результаты имитации - заслуживающими доверие. Погрешность моделирования составляет 1,78 %.

В качестве основного выходного параметра, влияние на который со стороны входных параметров будет исследоваться в ходе экспериментов на имитационной модели, установлена производительность работы звеносборочной линии. В качестве дополнительных выходных параметров установлены время загрузки/простоя оборудования, время выполнения ручных операций, загрузку рабочего персонала.

В качестве входных параметров установлены квалификация и количество работников, занятых на звеносборочной линии, надежность технических средств. Выбор данных параметров обусловлен фактическими наблюдениями за работой звеносборочной линии КБ03, а также тем, что эти параметры затрагивают только технологический процесс сборки рельсошпальной решетки на звеносборочной линии без внесения изменений в ее конструкцию. Здесь стоит отметить, что набор входных и выходных параметров может быть любым и определяется самим исследователем в зависимости от поставленных целей.

График производительности звеносборочной линии по результатам проведенных экспериментов представлен в табл. 1 [5].

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Наименование эксперимента	Производительность		Отношение к производительности при фактических условиях	
	звеньев	км.	км.	%
При фактических условиях	3069	76,725	-	-
При использовании работников 4 квалификационного разряда	3121	78,025	+ 1,3	+ 1,69
При использовании работников 5 квалификационного разряда	3160	79	+ 2,275	+ 2,97
При надежности технических средств 95 %	3069	76,725	0	0
При использовании двух дополнительных работников	3169	79,225	+ 2,5	+ 3,26
При оптимальных условиях*	3242	81,05	+ 4,325	+ 5,64
*Примечание: под оптимальными условиями подразумевается использование всех указанных параметров, максимально повышающих производительность по результатам экспериментов.				

Анализ результатов экспериментов показывает, что при внесении изменений в технологический процесс предлагаемых изменений, достигается положительный эффект: Увеличивается производительность сборки рельсошпальной решетки, увеличивается загрузка части оборудования. При этом уменьшается время на выполнение ручных операций и уменьшается загрузка работников (монтеров пути, стропальщиков), выполняющих наиболее

тяжелые операции. По каждому эксперименту выполнен анализ его экономической эффективности внедрения в производственный процесс по формуле:

$$C = \sum Z / П \quad (1)$$

где $\sum Z$ - суммарные затраты предприятия на сборку рельсошпальной решетки на звеносборочной линии за годовой период, руб.

П - производительность звеносборочной линии за годовой период, км.

Согласно выполненному экономическому расчету, рост затрат на внедрение в технологический процесс перечисленных изменений составляет менее 1 % на один километр рельсошпальной решетки, собираемой на звеносборочной линии, в сравнении с фактическими затратами, что говорит об эффективности каждого предлагаемого изменения.

В ходе исследования доказана эффективность применения имитационного моделирования для изучения технологических процессов сборки рельсошпальной решетки на эксплуатируемых звеносборочных линиях с целью их оптимизации. Совокупное использование средств имитационного моделирования, методов эффективного и бережливого производства, рационализаторских предложений, прямо или косвенно влияющих на технологию сборки рельсошпальной решетки на звеносборочных линиях, могут дать существенное улучшение их выходных характеристик, без вмешательства в техническую часть звеносборочных линий и значительных финансовых затрат на внедрение инноваций.

Список литературы

1. Современные методы сборки путевой решетки / В. Л. Моисеенко, В. И. Жигар, Н. В. Письменная, В. В. Моисеенко. – Текст : непосредственный // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 66-74.
2. Официальный сайт ОАО «Барановичский завод автоматических линий» : сайт. – URL: <http://bzal.by/images/info/02.pdf>. – Дата доступа 19.01.2021.
3. Звеносборочная линия КБ03. Разработка имитационной модели / В. Л. Моисеенко, В. И. Жигар, Н. В. Письменная, В. В. Моисеенко. – Текст : непосредственный // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 51-59.

4. Моисеенко, В. Л. Методика построения имитационных моделей звеносборочных линий / В. Л. Моисеенко, В. И. Жигар, Н. В. Письменная. – Текст : непосредственный // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 55-62.

5. Жигар, В. И. Повышение производительности звеносборочной линии КБ03 / В. И. Жигар. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2. – С. 60-70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жигар Виктор Игоревич

Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги» структурное подразделение путевая машинная станция Барановичи. Брестская ул., д. 280, г. Барановичи, 225320, Республика Беларусь. Магистр технических наук, аспирант кафедры «Детали машин, путевые и строительные машины», УО «Белорусский государственный университет транспорта». Тел.: +375 29 (163) 67-20-70. E-mail: viktor.zhigar@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhihar Victor Igorevich

Republican unitary enterprise «Remput of the Belarusian Railways» structural unit track machine station Baranovichi. Brestskaya Str., 280, Baranovichi, 225320, Republic of Belarus. Master of technical sciences, post-graduate student «Machine parts, track and construction machines», Belarusian State University of Transport. Phone: +375 29 (163) 67-20-70. E-mail: viktor.zhigar@mail.ru

УДК 625.1

В. И. Жигар¹, В. Л. Моисеенко²

¹Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги», г. Барановичи, Республика Беларусь,

²Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

ПРОГРАММА РАСЧЕТА УКРОЧЕНИЙ ЗВЕНЬЕВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ И ПОРЯДКА ИХ УКЛАДКИ

С целью уменьшения времени на выполнение математических расчетов укорочений звеньев и порядка их укладки в кривых участках железнодорожного пути была разработана специализированная программа. Ее использование существенно снижает затраты времени инженерных работников на проведение расчетов.

Ключевые слова: программа расчета, укорочение звеньев, порядок укладки, железнодорожный путь.

Victor Ig. Zhihar¹, Vladimir L. Moiseenko²

¹Republican Unitary Enterprise «Rempu of the Belarusian Railways», Baranovichi,
Republic of Belarus,

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

PROGRAM FOR CALCULATING SHORTCUTS OF RAILWAY LINKS AND THE ORDER OF THEIR INSTALLATION

In order to reduce the time for performing mathematical calculations of the shortening of the links and the order of their laying in the curved sections of the railway track, a specialized program was developed. Its use significantly reduces the amount of time spent by engineers on calculations.

Keywords: calculation program, shortening of links, stacking order, railway track.

Перед сборкой звеньев рельсошпальной решетки для их последующего использования при выполнении восстановительного или капитального ремонта железнодорожного пути необходимо:

1. Выполнить натурные промеры участка железнодорожного пути, на котором будет выполняться замена рельсошпальной решетки.
2. На основе натуральных промеров составить схемы укладки, с указанием количества укладываемых звеньев, порядка формирования пакетов звеньев в составе укладочного поезда, дополнительных сведений, таких как расположение изолирующих стыков, наличие укороченных звеньев и так далее.

В соответствии с требованиями [1] рельсовые стыки обеих рельсовых нитей должны располагаться по наугольнику. Для выполнения установленных требований применяются стандартно укороченные рельсы на внутренних нитях кривых участков пути. Ручной расчет укорочений таких рельсов и порядка их укладки является громоздким и существенно усложняется при наличии на участке производства работ длинных кривых участков, нескольких кривых, многорадиусных кривых. С целью экономии затрат времени и упрощения расчетов, выполняемых инженерно-техническими работниками, была разработана специализированная программа для расчета укорочений звеньев и порядка их укладки. Общий вид рабочего окна программы представлен на рисунке 1.

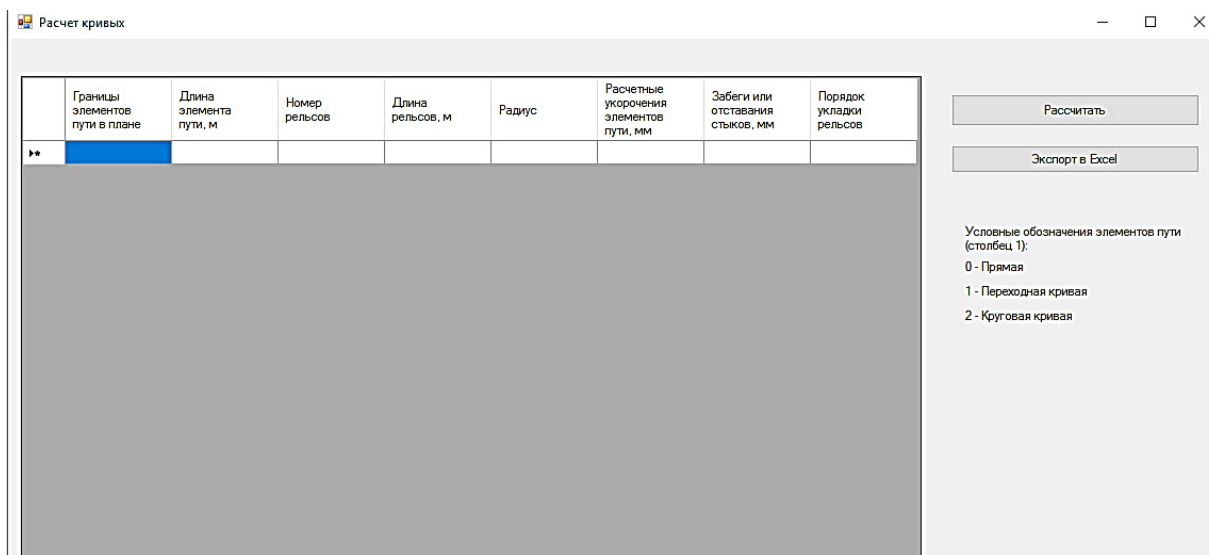


Рисунок 1 – Общий вид программы

Программа разработана с применением «Microsoft Visual Studio 2015» - продукта компании Microsoft, включающего интегрированную среду разработки программного обеспечения и ряд других инструментальных средств.

Выполнение расчетов в программе производится в следующей последовательности:

1. Запуск программы.
2. Ввод исходных данных.

2.1 Столбец №1 - «Элемент пути в плане». Вводятся границы элементов пути в плане с применением условных обозначений: цифра «0» соответствует прямому участку пути, цифра «1» - переходной кривой, цифра «2» - круговой кривой.

2.2 Столбец №2 - «Длина элемента пути, в метрах». Вводится длина переходной кривой, круговой кривой (для прямого участка можно не заполнять). Длины элементов пути вводятся в соответствии с проектно-сметной документацией.

2.3 Столбец №3 - «Номер рельсов». Вводится номер звена. Может быть произвольным. Если звено делится на части элементом пути (например, если часть звена лежит в переходной кривой, а часть в круговой кривой), то можно вводить удобное пользователю обозначение (например, 3-1, 3-2, т.е. первая часть третьего звена лежит в переходной кривой, вторая часть третьего звена лежит в круговой кривой).

2.4 Столбец №4 - «Длина рельсов, в метрах». Вводится длина укладываемого звена в соответствии с натурными промерами. Может быть произвольным. Целую и дробную части значения длины рекомендуется разделять между собой запятой (например, 12,50, 25,00 и т.п.). Если звено делится на части элементом пути, то вводятся длины этих частей (например, звено №3-1 = 9 метров, звено №3-2 = 16 метров, т.е. первая часть третьего звена, лежащая в переходной кривой, имеет длину 9 метров, вторая часть третьего звена, лежащая в круговой кривой, имеет длину 16 метров). Для прямого участка пути соответствующие ячейки таблицы можно не заполнять.

2.5 Столбец №5 - «Радиус, в метрах». Вводится радиус круговой кривой и соответствующих ей переходных кривых.

При расчете составной кривой (число смены радиусов может быть любым), порядок ввода исходных данных аналогичен описанному выше, только в столбце №5 вводятся радиусы, соответствующие круговым и переходным кривым. Расчет нескольких кривых участков пути, разделенных прямыми участками или вставками, не выполняется.

Общий вид рабочего окна программы с введенными данными представлен на рисунке 2.

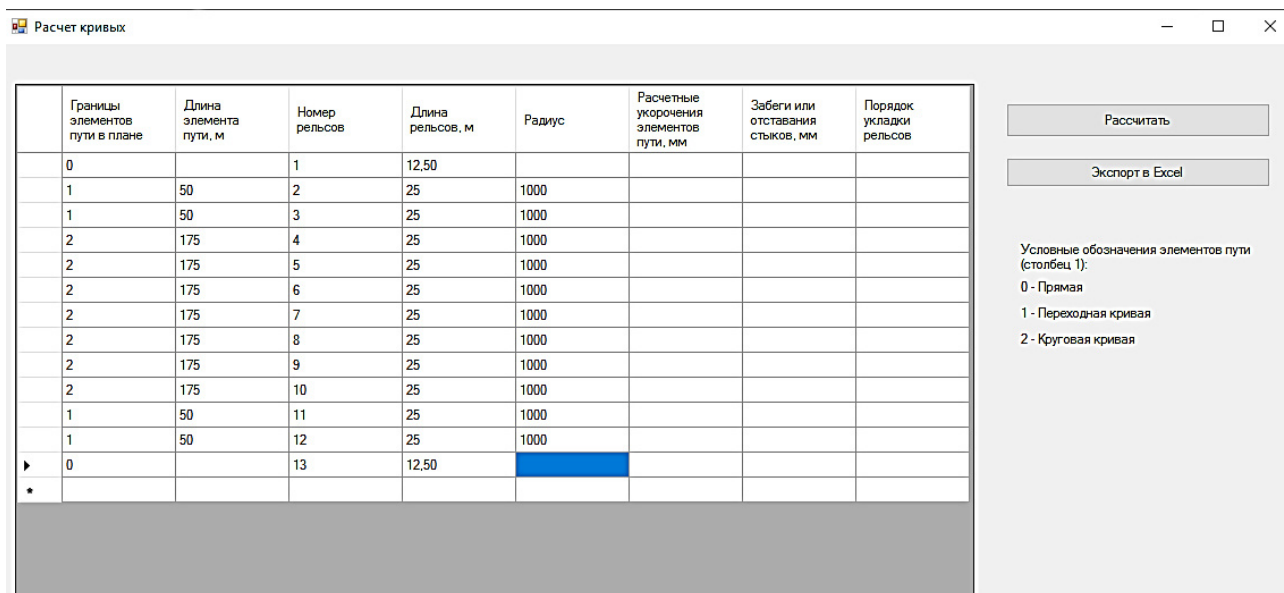


Рисунок 2 – Общий вид программы с введенными данными

3. Нажать кнопку «Расчитать». Программа выполнит расчет и автоматически заполнит столбцы №6-8 расчетными данными (рисунок 3):

3.1 Столбец №6 - «Расчетные укорочения элементов пути, в миллиметрах» - значение укорочения для каждого конкретного звена.

3.2 Столбец №7 - «Забеги или отставания стыков, в миллиметрах» - значение нарастающего забега или отставания с учетом стандартного укорочения на 80 мм.

3.3 Столбец №8 - «Порядок укладки звеньев». Значение «Н» в ячейке обозначает, что необходимо укладывать нормальное звено, значение «У» - необходимо укладывать укороченное звено.

Границы элементов пути в плане	Длина элемента пути, м	Номер рельсов	Длина рельсов, м	Радиус	Расчетные укорочения элементов пути, мм	Забеги или отставания стыков, мм	Порядок укладки рельсов
0	0	1	12.50	0	0	0	0
1	50	2	25	1000	10	10	Н
1	50	3	25	1000	30	-40	У
2	175	4	25	1000	40	0	Н
2	175	5	25	1000	40	-40	У
2	175	6	25	1000	40	0	Н
2	175	7	25	1000	40	-40	У
2	175	8	25	1000	40	0	Н
2	175	9	25	1000	40	-40	У
2	175	10	25	1000	40	0	Н
1	50	11	25	1000	10	10	Н
1	50	12	25	1000	30	-40	У
0	0	13	12.50	0	0	0	0
**	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 3 – Результаты выполнения программных расчетов

4. Для вывода данных в электронную таблицу Microsoft Excel нажать кнопку «Экспорт в Excel». Экспорт осуществляется без переноса формул и алгоритма расчета программы.

Для корректировки введенных исходных данных и последующего перерасчета без закрытия программы, необходимо выделить нужную ячейку, ввести в нее новые данные, нажать кнопку «Рассчитать». Программа выполнит перерасчет с учетом корректировок. Закрытие и повторный запуск программы сбросит все введенные и рассчитанные данные.

Использование программы исключило ручные расчеты, что позволило существенно уменьшить затраты времени инженерно-технических работников на выполнение расчетов укорочений звеньев и порядка их укладки в кривых участках пути.

Список литературы

1. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ : СТП 09150.56.010-2005. Введ. 01.07.2006. – Минск : Управление Белорусской железной дороги, 2006. – 279 с.

2. Программа расчета укорочений звеньев пути и порядка их укладки / В.И. Матвеев, В.Л. Моисеенко, Н.В. Моисеенко, В.И. Жигар // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 37-39.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жигар Виктор Игоревич

Республиканское унитарное предприятие «Ремпуть Белорусской железной дороги» структурное подразделение путевая машинная станция Барановичи. Брестская ул., д. 280, г. Барановичи, 225320, Республика Беларусь. Магистр технических наук, аспирант кафедры «Детали машин, путевые и строительные машины», УО «Белорусский государственный университет транспорта». Тел.: +375 29 (163) 67-20-70. E-mail: viktor.zhigar@mail.ru

Моисеенко Владимир Леонидович

УО «Белорусский государственный университет транспорта». Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246653, Республика Беларусь. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование». Тел.: +375 232 95-39-74. E-mail: dm@bsut.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhihar Victor Igorevich

Republican unitary enterprise «Remput of the Belarusian Railways» structural unit track machine station Baranovichi. Brestskaya Str., 280, Baranovichi, 225320, Republic of Belarus. Master of technical sciences, post-graduate student «Machine parts, track and construction machines», Belarusian State University of Transport. Phone: +375 29 (163) 67-20-70. E-mail: viktor.zhigar@mail.ru

Moiseenko Vladimir Leonidovich

Belarusian State University of Transport. Kirova Str., 34, Gomel, 246653, Republic of Belarus. Ph. D. (Engineering), Associate professor «Transport and technological machines and equipment». Phone: +375 232 95-39-74. E-mail: dm@bsut.by

А. С. Харитонов¹, Г. Л. Штрапенин²

¹Первоуральский автоагрегатный завод (ООО ПААЗ), г. Первоуральск, Российская Федерация,

²Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЧЕТ ВЫРАБОТКИ СОТРУДНИКОВ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ДЛЯ АВТОАГРЕГАТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.

Разработана система автоматизированного учета выработки работников Первоуральского автоагрегатного завода, выпускающего амортизаторы для грузового автотранспорта. Логика работы системы базируется на четырех подсистемах, которые осуществляют фиксацию и сбор нужной производственной информации, ее обработку и формирование требуемых отчетов. Результатом функционирования системы являются данные о выработке сотрудников на рабочих местах как в режиме онлайн, так и за определенный указанный период времени.

Ключевые слова: Автомобильный транспорт, система учета выработки, отчеты о производительности.

Anton S. Kharitonov¹, Gennady L. Shtrapein²

¹Pervouralsky automobile Assembly Plant (PAAZ), Pervouralsk, the Russian Federation,

²Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

AUTOMATED ACCOUNTING OF EMPLOYEE PRODUCTION AT WORKPLACE FOR AUTOMATIC UNIT ENTERPRISE.

A system for automated accounting of the production of workers of the Pervouralsk Automobile Aggregate Plant, which produces shock absorbers for trucks, has been developed. The logic of the system is based on four subsystems that record and collect the required production information, process it and generate the required reports. The result of the functioning of the system is data on the production of employees at workplaces both online and for a certain specified period of time.

Keywords: Road transport, production accounting system, performance reports.

Общество с ограниченной ответственностью «Первоуральский автоагрегатный завод» (ООО ПААЗ) – единственное в стране предприятие, которое полностью специализируется на производстве амортизаторов для автомобильного транспорта. После распада СССР в России не было ни одного собственного предприятия подобного профиля, и в течении следующих пятнадцати лет ведущие автомобильные конвейеры страны, такие как КамАЗ, Урал, ГАЗ и другие, были вынуждены закупать амортизаторы в странах бывшего Союза. В 2006 году Первоуральский автоагрегатный завод заполнил образовавшуюся нишу в области отечественного автомобилестроения. Система менеджмента качества ПААЗ сертифицирована в сентябре 2008 года на соответствие требованиям международного стандарта *ISO 9001:2000* авторитетной международной сертификационной организацией *TUV*. В ноябре 2011 года был получен новый сертификат на соответствие требованиям измененного стандарта *ISO 9001:2008*.

По собственным оценкам предприятия, на сегодняшний день ПААЗ – это крупнейший в стране производитель амортизаторов коммерческого сектора с долей первичного рынка, превышающей 35 % [1].

В текущих реалиях сложно представить работу машиностроительного предприятия без наличия автоматизированных и роботизированных систем. В этой статье изложена концепция системы автоматизированного учета выработки сотрудников ООО ПААЗ на рабочих местах. Оригинальность и практическая ценность системы заключается в ее нестандартной архитектуре, позволяющей производить полную настройку, калибровку и администрирование комплекса силами самого предприятия.

Разработанный объемный аппаратно-программный комплекс системы автоматизированного учета выработки сотрудников на рабочих местах для Первоуральского автоагрегатного завода нагляднее рассматривать в виде совокупности подсистем – модулей, которые последовательно собирают, накапливают и обрабатывают производственную информацию. Преследуя цель представления максимума информации о логике работы комплекса, на рисунке 1 приведена его модель, описанная с применением методологии функционального проектирования *IDEFO*. Такой подход ранее уже был использован авторами статьи при разработке программного обеспечения для моделирования электронных устройств для транспортной отрасли [2].

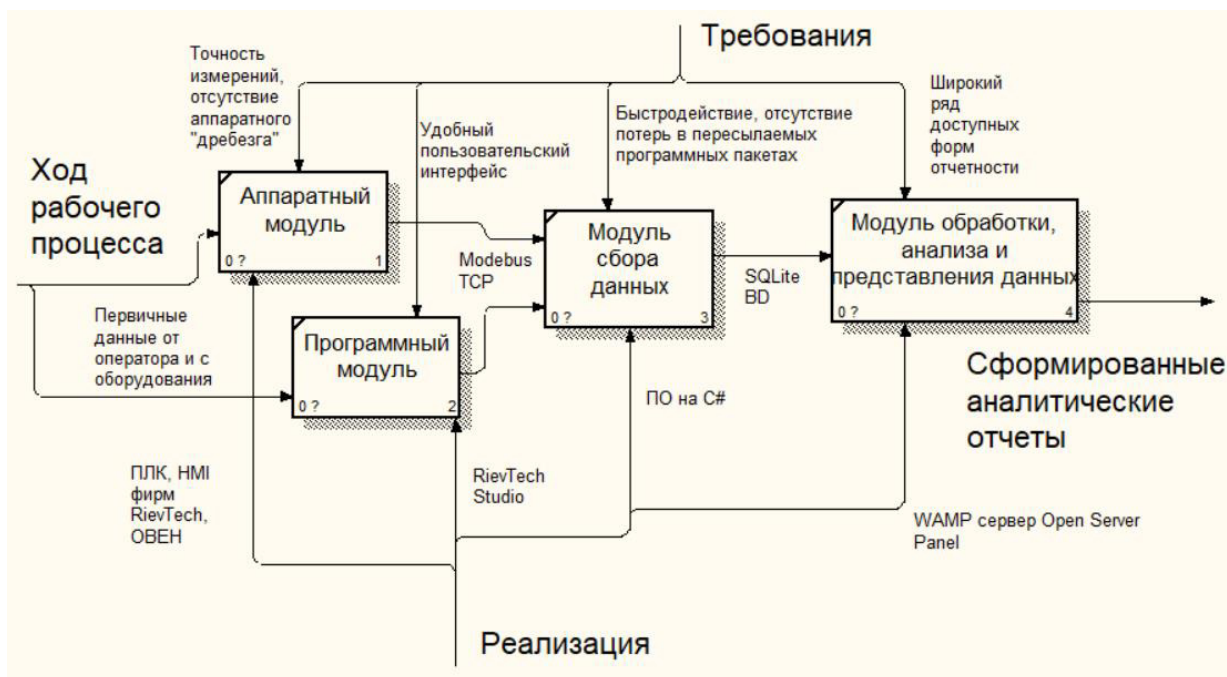


Рисунок 1 – IDEF0 модель системы автоматизированного учета

В составе системы можно выделить четыре основных модуля: программно-аппаратный модуль фиксации данных, модули сбора и обработки информации и модуль формирования отчетов.

1 Программно-аппаратный модуль фиксации данных

Модуль фиксации данных реализован в системе автоматизированного управления, построенной на программируемых логических контроллерах, блоках ввода-вывода, сенсорных панелях *HMI* (человеко-машинный интерфейс), индуктивных и лазерных датчиках фирм *Rievtech* и отечественного производителя ОВЕН.

Задача модуля – фиксировать следующие производственные данные:

- кто персонально работает на данном рабочем месте (ФИО оператора);
- что производят на данном рабочем месте (номенклатура изделий);
- сколько единиц изделий произведено;
- если работа остановлена, то по каким причинам происходит простой на рабочем месте.

Для авторизации оператора в системе осуществляется процедура идентификации по уникальному номеру, содержащемуся в персональной *RFID* метке каждого сотрудника (элемент системы контроля учета доступа ООО ПАЗ). Посредством *HMI* интерфейса оператор вводит данные о номенклатуре

производимого им изделия и статус его работы. Аппаратные счетчики ПЛК или блоков ввода-вывода проводят учет готовых изделий, при этом оборудование не сможет начать работу в случае, если отсутствует авторизация оператора или выбор производимой им операции (номенклатуры). На рисунке 2 представлен пользовательский интерфейс сенсорной *HMI* панели.

Программируемый логический контроллер (или аппаратный счетчик, тип устройства зависит от сложности станка, на котором устанавливается система) интегрируется в систему так, чтобы получать логический сигнал с рабочего органа производственного оборудования. Установка и настройка контроллера осуществляются индивидуально для каждого рабочего места. Ключевым параметром выполнения операции могут быть, например, крайнее положение фрезы, вращение привода, световая индикация оборудования, физическая кнопка «Старт» или сигнал выполнения рабочей программы на современных станках с ЧПУ.

Если работа на участке останавливается, сотрудник указывает причину простоя оборудования, например, регламентированный перерыв, техническое обслуживание, поломка оборудования и т.д.

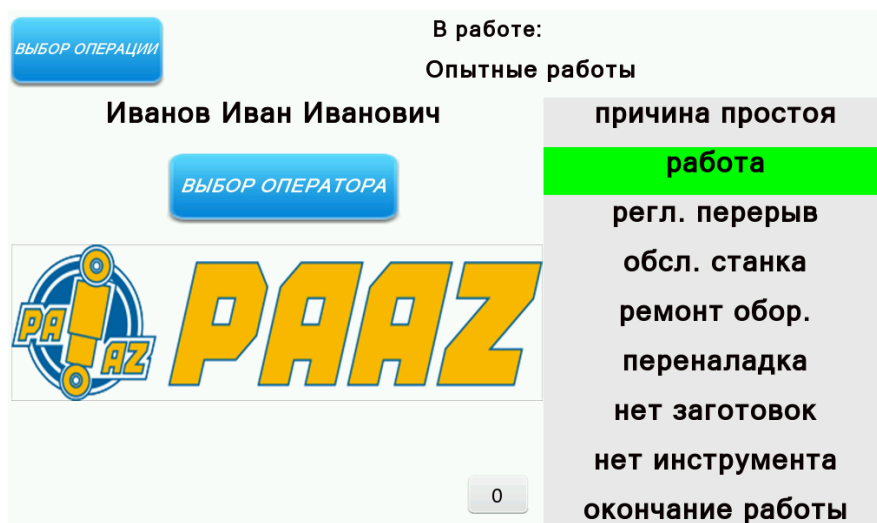


Рисунок 2 – Интерфейс сенсорной панели рабочего места

2 Модуль сбора данных

Все физические элементы комплекса имеют собственные статические зарезервированные *ip* адреса и выведены в отдельную «производственную» локальную сеть предприятия. Опрос устройств производится по интерфейсу Ethernet средствами отечественного универсального Modbus сервера «*Modbus Universal MasterOPC сервер*» [3]. Раз в секунду сервер опрашивает все

подключенные рабочие места по протоколу *Modbus TCP*, проверяет наличие актуальных данных и формирует записи в базе данных (БД) для каждого конкретного рабочего места. В качестве системы управления базами данных используется СУБД *SQLite*, обеспечивающая удобство хранения, обработки и передачи больших объемов данных.

Каждая производственная операция (например проточка одного штока на станке с ЧПУ) фиксируется в виде отдельной строки в базе данных, содержащей следующий набор информации:

- ФИО оператора (через уникальный идентификационный номер его персональной *RFID* метки);
- номенклатура операции (изделия);
- время начала операции;
- время окончания операции;
- значение счетчика регистра учета;
- присвоенная оценка операции (учитывается или не учитывается данная операция как совершенная).

3 Модуль обработки данных

Модуль обработки информации необходим для программной фильтрации постоянно обновляющихся баз данных. Данный модуль, созданный средствами языка программирования высокого уровня *C#*, проверяет базы данных на предмет корректности, осуществляет замену уникальных кодов операторов и номенклатур на их строковое представление, проводит обработку причин простоя рабочих мест с целью дальнейшего графического представления и копирует обновленные данные на отдельный сервер.

4 Модуль формирования отчетов

Финальную часть работы системы выполняет модуль формирования отчетов. На специальном производственном веб-сайте, базирующемся на *WAMP (Windows-Apache-MySQL-PHP)* сервере *Open Server Panel* [4] данные группируются по разделам, сменам и рабочим местам. Отчеты формируются как в режиме онлайн, так и за определенный указанный период времени. Доступны различные инструменты запроса необходимой информации, например, почасовая текущая производительность, месячная производительность, месячная производительность конкретного сотрудника (или целой смены), производительность согласно плану/графику, информация о простоях оборудования в минутах и процентах с указанием причин и многое другое (рисунки 3-4).

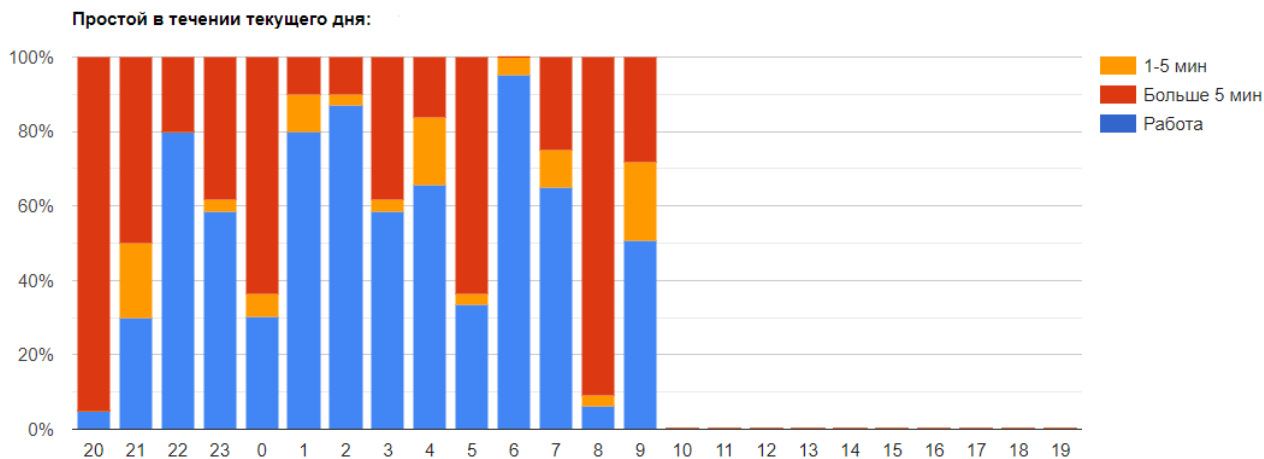


Рисунок 3 – Представление информации о простое оборудования

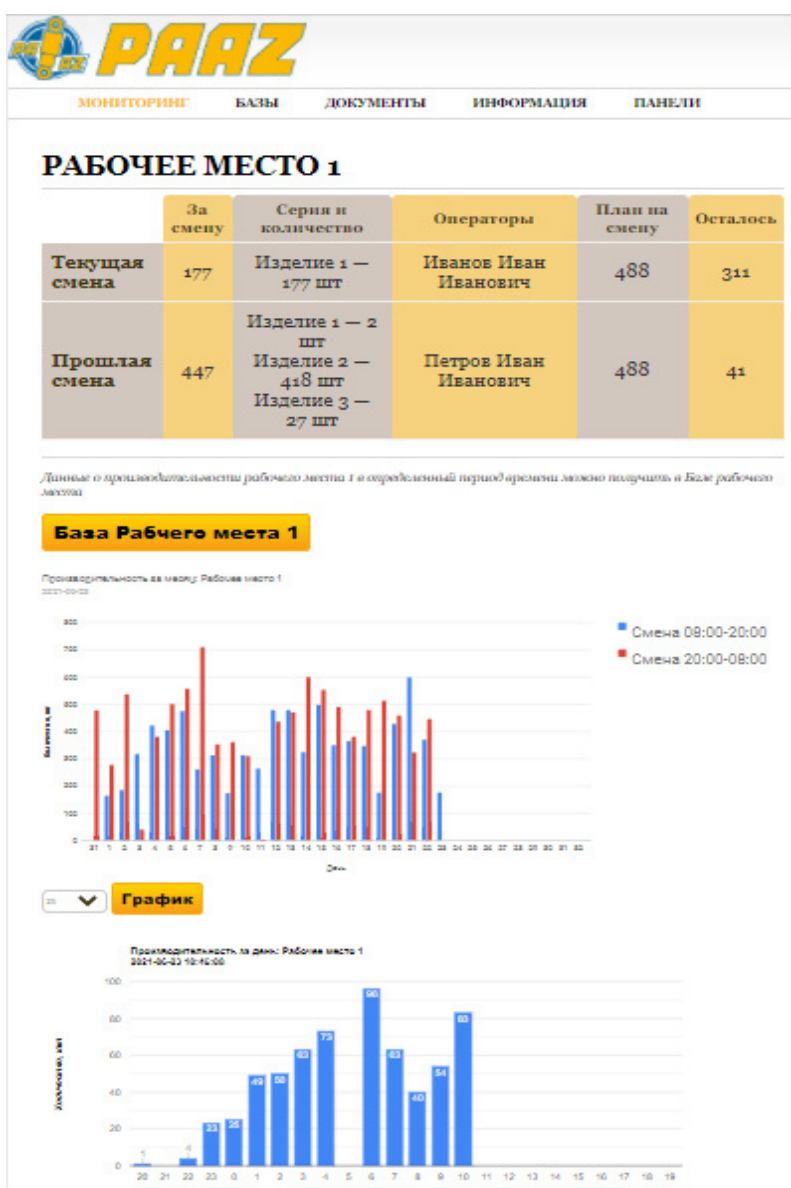


Рисунок 4 – Пример формируемого системой online отчета

Функционирование системы автоматизированного учета производительности позволяет решать многие задачи по анализу производства, планированию, координации работы складов, отдела сбыта готовой продукции и других структурных подразделений. Для сотрудников, чей труд оплачивается на основе коэффициентов трудового участия, открывается возможность оперативно получать информацию о заработанной ими сумме денежных средств.

Список литературы

1. ООО «ПААЗ» : официальный сайт. – URL: <https://www.paaz.ru>. – Текст : электронный.
2. Харитонов, А. С. Разработка программного обеспечения для оптимизации моделирования электронных устройств для транспортной отрасли / А. С. Харитонов, Г. Л. Штрапенин. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2019. – № 3. – С.37-40.
3. «ИнСАТ» : официальный сайт. – URL: <https://insat.ru/>. –Текст : электронный.
4. Open Server Panel : официальный сайт. – URL: <https://ospanel.io>. – Текст : электронный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харитонов Антон Сергеевич

Первоуральский автоагрегатный завод (ООО ПААЗ).

Ленина ул., 20, г. Первоуральск, 620000, Российская Федерация.

Ведущий инженер по автоматизированным системам управления производством.

Тел.: +79505620242

E-mail: the-best2012@mail.ru

Штрапенин Геннадий Львович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрические машины» УрГУПС.

Тел.: +79024407755

E-mail: shtrap@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharitonov Anton Sergeevich

Pervouralsky automobile Assembly Plant (PAAZ).

Lenin St., 20, Pervouralsk, 620000, the Russian Federation.

Leading Engineer for Automated Production Management Systems.

Phone: +79505620242

E-mail: the-best2012@mail.ru

Shtrapenin Gennady Lvovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova St., 66, Yekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the department «Electrical Machinery» USURT.

Phone: +79024407755

E-mail: shtrap@mail.ru

А. Л. Бобров, Д. В. Волобуев

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В работе приводятся данные результатов контроля технического состояния грузовых вагонов при их мониторинге. Также осуществлен анализ неисправностей узлов грузовых вагонов, определяемых в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: грузовой вагон, контроль, неисправность, мониторинг, осмотрщик, ремонт.

Aleksey L. Bobrov, Dmitriy V. Volobuyev

Sibirian State Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

TO THE QUESTION OF IMPROVEMENT OF MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF FREIGHT CARS

The paper provides data on the results of monitoring the technical condition of freight cars during their monitoring. Also, the analysis of malfunctions of the units of freight cars, determined during operation, was carried out.

Keywords: freight car, control, malfunction, monitoring, inspector, repair.

Качественный эксплуатационный контроль технического состояния грузовых вагонов является важным составляющим элементом обеспечения безопасности функционирования подвижного состава и железнодорожного транспорта в целом.

Современная система мониторинга состояния грузовых вагонов включает автоматизированные технические средства, такие как автоматизированная система контроля подвижного состава на ходу поезда (КТСМ), автоматизированный диагностический комплекс для измерения колесных пар (АДКИКП) и осмотр вагонов осмотрщиками на пунктах

технического обслуживания (ПТО), применяются также другие установки. В целом проблемы и особенности использования автоматизированных средств диагностирования грузовых вагонов, находящихся в движении на путях освещены в работах [1, 2].

Как показывает опыт работы нагрузка по мониторингу состояния вагонов на одно ПТО в 2020 году составляет более 2,5 млн. вагонов (как для автоматизированных систем, так и для непосредственного обследования осмотрщиками). Например, в по показаниям автоматизированной системы КТСМ ПТО ст. Инская обнаружено 912 неисправностей вагонов. За этот же период осмотрщиками вагонов без показания прибора КТСМ обнаружены неисправности в 120 грузовых вагонах. Подробно основные неисправности и дефекты, влекущие отказ буксового узла, а значит и вагона в целом приведены в работе [3].

Анализ обнаруживаемых неисправностей и последующего обследования узлов вагонов при деповском ремонте показывает, что ошибки автоматизированных систем в оценке параметров состояния узлов вагонов чаще всего связаны либо с наличием возникающих помех, либо с тем, что измерительные системы имеют заниженный порог срабатывания при регистрации той или иной неисправности. Например, часть нагревов буксовых узлов, определяемых КТСМ, не связаны с наличием неисправностей, приводящих к быстрому отказу узла.

Измерения параметров колесных пар при движении поезда оптическим методом устройством АДКИКП в 2020 году было реализовано для 86 384 поездов (6 054 609 вагонов), при этом было зарегистрировано 45 135 предельных показаний, из них:

- 1 715 показания были связаны с несоответствием толщины гребня;
- 103 связаны с регистрацией толщины обода менее допустимых значений;
- 524 срабатывания произошло из-за разницы толщин гребней в одной колесной паре;
- 76 срабатываний зафиксировало сдвиг буксы;
- 42077 срабатываний по дефектам на поверхности катания колес.

При последующем инструментальном замере выявленных дефектов подтвердилось 43 923 показания – 97,3%. Из них 1 385 показание по толщине

гребня, 1 показаний по разнице толщин гребней, 19 показаний по сдвину буксы, а также 42 077 показаний по дефектам колес на поверхности катания.

За этот же период осмотрщиками ремонтниками вагонов на станциях, расположенных на перегонах где размещаются АДКИКП, вагонов с дефектами, обнаруженными только осмотрщиками не обнаружено.

Таким образом, применение оптических автоматизированных средств позволяют исключить ошибку второго рода и иметь достаточно малую величину ошибки первого рода (частота ее появления не более 0,003).

Кроме того, для определения степени влияния дефекта на исправное состояние возможно использовать дополнительные напольные средства диагностирования поверхности катания колес, например, такие как тензометрический комплекс анализа силового воздействия проезжающего колеса на рельс с помощью динамической многоканальной тензометрической системы [4, 5].

Почти половина отказов, выявленных при осмотре, представляют собой недопустимых размеров несплошности на поверхности катания, контактирующей с рельсами. В целом качественно картину отказов, выявляемых осмотрщиками можно понять, анализируя данные даже из одного ПТО (рисунок 1). 10-15 % обнаруживаемых осмотрщиками дефектов связаны с неисправностями буксового узла, тормозной магистрали и рычажной передачи. Остальные виды дефектов, выявляемых при осмотрах встречаются реже, однако все виды неисправностей требуют устранения в ходе ремонта. Как правило, в компетенции осмотрщика остается выявление неисправностей, которые сложно обнаруживать с высокой степенью надежности существующими техническими средствами.

В то же время осмотр является наиболее уязвимой частью мониторинга состояния узлов грузовых вагонов, так как он во многом базируется на опыте осмотрщика и отсутствии инструментальных средств регистрации неисправностей. Субъективность результатов такого освидетельствования узлов вагонов осмотрщиками является недостатком, который как подрывает доверие владельцев подвижного состава, так и не позволяет адекватно оценивать масштаб и опасность таких неисправностей. Поэтому для совершенствования системы мониторинга состояния узлов грузовых вагонов необходимо оснащение осмотрщиков техническими средствами регистрации

неисправностей, способными объективно фиксировать состояние узлов и элементов путем измерения конкретных параметров и последующим их анализом.

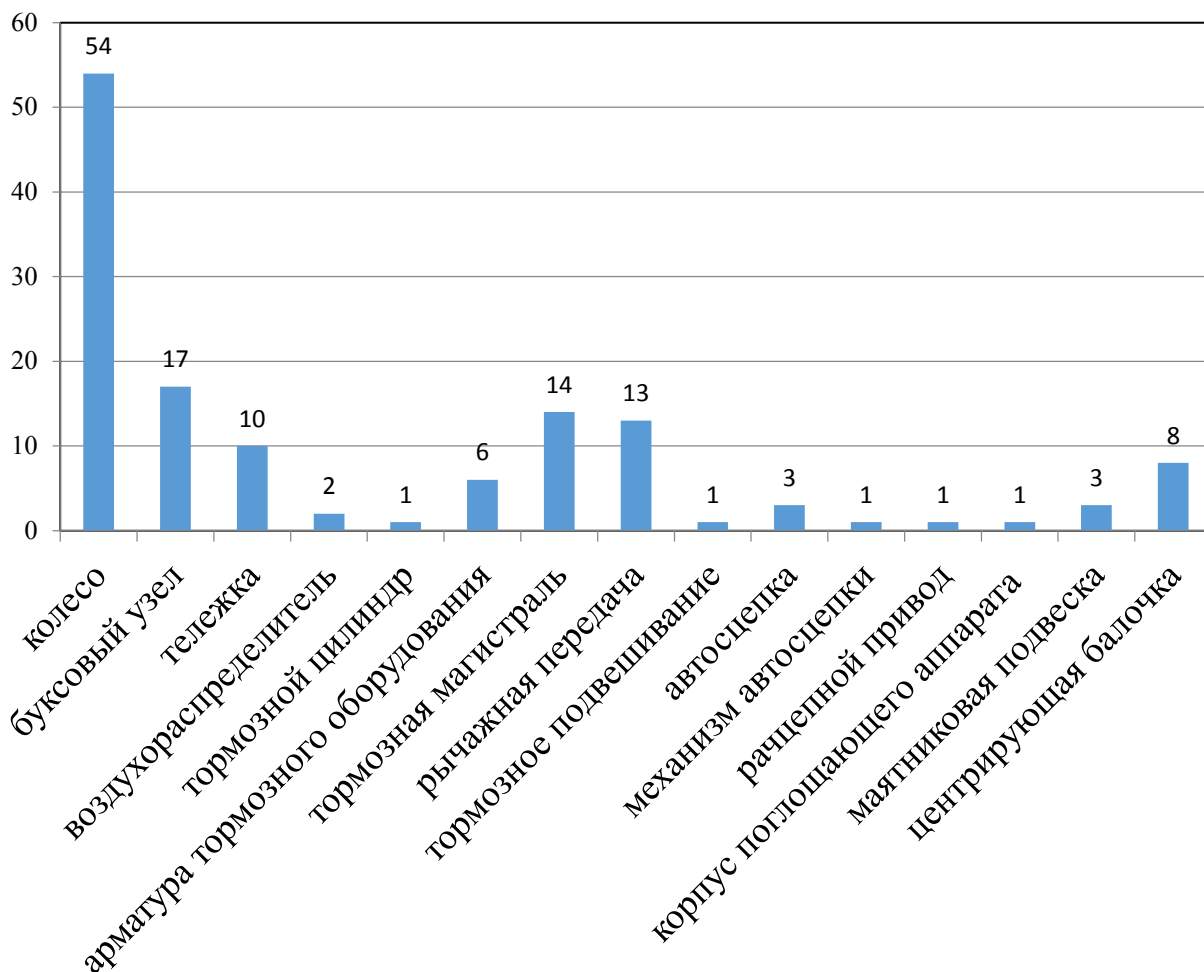


Рисунок 1 – Количественные показатели отцепок вагонов по результатам диагностики осмотрщиками на ПТО

За последние годы разработаны и применены различные средства диагностирования неисправностей колесных пар осмотрщиками, например, устройство осмотра в труднодоступных местах, включающее камеру, подключенную к смартфону, разработанное А. А. Власовым [6].

Вместе с тем, в работе [7] отмечается, что выявление основных видов дефектов производится с помощью шаблонов (измерительных инструментов), визуально и по извлечению характерных звуков. Поэтому повышения качества осмотра можно добиться двумя способами: совершенствованием компетенций осмотрщиков и разработкой средств регистрации дефектов встроенных в

единую информационную систему ПТО. Например, современные средства связи – смартфоны способны регистрировать не только изображения дефектов, которые в специализированном приложении могут отправлять результаты съемки в единую базу результатов осмотра, но и записывать сигналы свободных колебаний, возникающих при ударе молотками осматривщиков. Последний случай достаточно легко поддается автоматизации процедуры расшифровки, определения частотных характеристик колебаний и вынесения решения о состоянии буксовых узлов, колес и других элементов, в которых ударным способом возбуждены колебания. Такой подход к автоматизации процедуры фиксации результатов работы осматривщиков может существенно повысить и качество осмотров и решить вопросы взаимодействия с ремонтными предприятиями и обеспечить техническую поддержку договорного взаимодействия с собственниками вагонов.

Список литературы

1. Варгунин, В. И. Организация коммерческого осмотра поездов и вагонов / В. И. Варгунин, Р. Л. Владимиров, С. Н. Шишкина. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2014. – № 1. – С. 55-59.
2. Мусабаев, Б. К. Совершенствование технологии автоматизированной системы коммерческого осмотра поездов и вагонов / Б. К. Мусабаев. – Текст : непосредственный / Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : сборник материалов ХLI Межд. научно-практ. конф. / под редакцией Б. М. Ибраева. – 2017. – С. 86-91.
3. Обеспечение безопасности движения подвижного состава по показателям КТСМ в зависимости от типа буксового узла / В. Н. Железняк, Л. В. Мартыненко, В. А. Иванова [и др.]. – Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2020. – № 4 (10). – С. 11-17.
4. Разработка алгоритмов определения информативных параметров сигналов с тензодатчиков для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении / С. А. Бехер, А. О. Коломеец, Л. Н. Степанова, А. С. Кочетков. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 30. – С. 129-136.
5. Бехер, С. А. Повышение достоверности контроля колес грузовых вагонов в движении с использованием цифровых методов обработки

информации / С. А. Бехер, А. О. Коломеец. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 61-68.

6. Власов, А. А. Приспособление для осмотра деталей вагонов в труднодоступных местах / А. А. Власов. – Текст : непосредственный // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2018. – № 3 (55). – С. 42-43.

7. Ивахно, И. В. Технология осмотра вагонов в парке прибытия ПТО-Юг ст. Батайск СКЖД / И. В. Ивахно, В. Г. Козубенко, Н. А. Кокунина. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 1. – С. 130-132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бобров Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
Ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», СГУПС
Тел.: +7 (383) 328-03-46
E-mail: beaver@stu.ru

Волобуев Дмитрий Валерьевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
Ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», СГУПС
Тел.: +7 (383) 328-03-46
E-mail: Volobuevdmitry@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bobrov Aleksey Leonidovich

Siberian State Transport University (STU).
191, D.Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.
Professor of the Department «Electrical engineering, diagnostics and certification» STU.
Phone: +7 (383) 328-03-46.
E-mail: beaver@stu.ru

Volobuev Dmitry Valerievich

Siberian State Transport University (STU).
191, D.Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.
Graduate student of the Department «Electrical engineering, diagnostics and certification» STU.
Phone: +7 (383) 328-03-46
E-mail: Volobuevdmitry@mail.ru

Д. А. Еловенко, Ф. М. Минаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
г. Иркутск, Российская Федерация

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
КОНСТРУКЦИИ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.
ОБЗОР ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ**

Приведены основные современные исследования моделирования и анализа остаточных напряжений процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкций. Сделан обзор методов и моделей процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкций, а также анализа остаточных напряжений и деформаций после формообразования. Все исследования имеют практическое приложение к созданию корпусов сосудов высокого давления и реакторов, несущая часть которых собирается из нескольких многослойных цилиндрических узлов. Многие могут быть развиты и адаптированы с целью дальнейшего применения на этапе анализа результирующих остаточных напряжений и деформаций, возникающих в результате формообразования многослойных цилиндрических конструкций.

Представленный обзор также дает понимание главных трендов их развития.

Ключевые слова: многослойная цилиндрическая конструкция, остаточные технологические напряжения, сосуд давления, моделирование процесса формообразования, спиральная навивка стальной ленты.

Denis A. Elovenko, Fedor M. Minaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

**SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMATION
OF A MULTILAYER CYLINDRICAL STRUCTURE AND ESTIMATION
OF RESIDUAL STRESS. OVERVIEW OF APPROACHES AND METHODS**

The main modern studies of modeling and analysis of residual stresses of the process of forming multilayer cylindrical structures are presented. An overview of the methods and models of the process of forming multilayer cylindrical structures, as well as the analysis of residual stresses and deformations after forming is made. All studies have a practical application to the creation of

vessels for pressure vessels and reactors, the load-bearing part of which is assembled from several multilayer cylindrical assemblies. Many can be developed and adapted for further use at the stage of analysis of the resulting residual stresses and deformations resulting from the formation of multilayer cylindrical structures.

The presented review also provides an understanding of the main trends in their development.

Keywords: multilayer cylindrical structure, residual technological stresses, pressure vessel, modeling of the shaping process, spiral winding of a steel strip.

Моделирование технологического процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкции является одним из основных этапов производства и изготовления сосудов высокого давления и реакторов.

В нашем докладе мы коротко приводим основные современные исследования, направленные на моделирование, анализ и оптимизацию технологического процесса формообразования различных многослойных цилиндрических конструкции. Они имеют прямое практическое приложение к созданию корпусов СВД (сосудов высокого давления) и реакторов, а также могут быть полезны для развития и адаптации приведенных результатов исследований.

В 1979 г. Гордеев, Микитаренко и Перельмутер одними из первых применили метод конечных элементов для описания решения проблемы упругой и упругопластической работы, намотанной многослойной толстостенной оболочки (рисунок 1) [1]. Этот подход позволяет исследовать напряженное состояние и деформации на упругих и упругопластических стадиях работы многослойных конструкций в корпусах сосудов спирального типа, нагруженных внутренним давлением, и проследить поведение конструкций в случае циклического нагружения.

В 1979 Ильин, Лобкова, Нехотящий и Стариков исследовали напряженно-деформированного состояния многослойной цилиндрической стенки из прокатанной стальной ленты [2]. Идеальный контакт слоев, наличие их проскальзывания оказывает существенное влияние на состояние деформации многослойной цилиндрической конструкции только при малых значениях коэффициента трения. Наличие эффекта контактной податливости оказывает существенное влияние на периферийные (краевые) напряжения на внутренних поверхностях многослойной конструкции, увеличивая их до 75%.

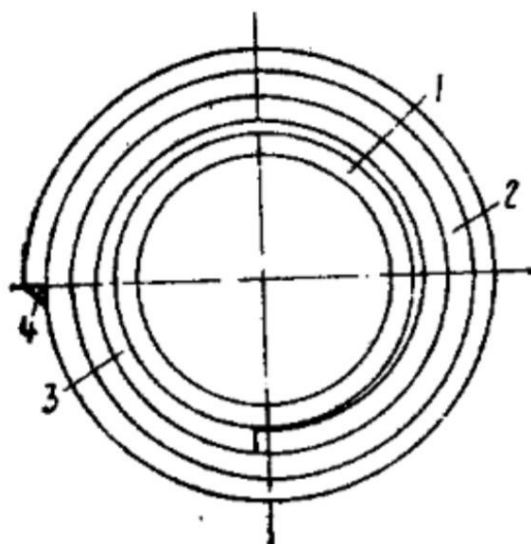


Рисунок 1 – Поперечное сечение навитого многослойного цилиндрического корпуса сосуда:

1 – центральный цилиндрический элемент; 2 – основная многослойная часть; 3 – вставка клиновидной формы; 4 – замыкающий сварочный шов, расположенный вдоль образующей царги

Также отметим, что Пимштейн, Тупицын, Борсук и Цвик в 1963 впервые предложили физически корректную аппроксимацию функции контактной податливости (сближения шероховатых контактирующих поверхностей в многослойных конструкциях) [3].

В 1995 году Дроздов и Каламкаров [4] разработали модель оптимизации процесса навивки многослойных цилиндрических конструкций для корпусов сосудов давления. Оптимизация реализуется с точки зрения анализа изменения силы натяжения процессе навивки. Ими рассмотрены процессы с релаксирующими материалами, а также с материалами не подверженными релаксации. Предложена функция $\xi(r)$, характеризующая приложенную силу натяжения к навиваемой ленте. Ее величина не фиксирована и может изменяться для получения оптимального состояния структуры многослойной конструкции. Авторами предложен метод поиска этой функции в таком виде, чтобы она гарантировала однородную интенсивность напряжений, после приложения силы натяжения, во всех слоях многослойной конструкции.

Годом позже (1996) китайские ученые Чжу предложили математическую модель анализа осевых и кольцевых деформаций, а также давления разрыва для многослойных корпусов сосудов из намотанной стальной ленты [5]. Уровень осевых деформаций немного превышают кольцевые. При этом границ

оптимальных значений угла навивки ленты (α) находятся в пределах $20^{\circ} - 25^{\circ}$ (рисунок 2).

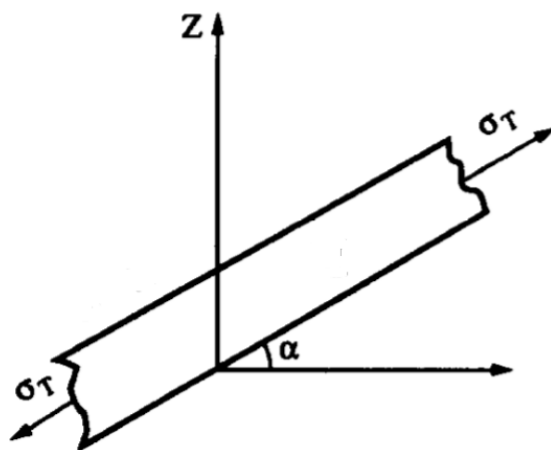


Рисунок 2 – Фрагмент навиваемой ленты с углом навивки α и напряжением от ее натяжения σ_T

В том же 1996 г. Дворак и Прочазка рассмотрели многослойный цилиндр из ортотропных слоев, нагруженный равномерными осесимметричными поверхностными растяжениями и кусочно-однородными собственными напряжениями в слоях (рисунок 3). Процедура их оптимизации реализована для поиска распределений собственных напряжений, которые корректируют с напряжениями в слоях до определенных уровней, позволяя применять определенные диапазоны величины предварительного напряжения навиваемой ленты для уменьшения волнистости слоев [6].

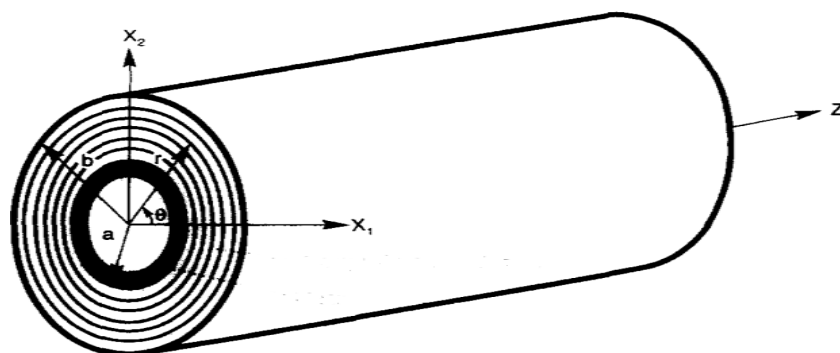


Рисунок 3 – Конструктивная схема формообразованного многослойного цилиндра

В 2002 г. Шринивас и Дворак [7] проанализировали влияние предварительного натяжения прокатанной ленты на результирующее остаточное напряженное состояние в многослойном цилиндре,

формообразованном на стальной оправке. Определены элементы, влияющие на результирующее остаточное напряженное состояние, и получены соответствующие функции, связывающие напряжения слоев с натяжением ленты. Процедура оптимизации реализована для определения распределений преднатягов, которые создают минимальные остаточные напряжения в слоях.

В 2008 г. Чжэн и Лэй [8] разработана математическая модель для исследования эффекта предварительного натяжения слоев многослойной конструкции и центрального цилиндрического элемента, а также предложен оптимальный метод проектирования конструкции с целью обеспечения благоприятного распределения уровня напряжений по толщине многослойной стенки корпуса сосуда в процессе его эксплуатации. Продолжили это исследование Амин и Ахмед [9], разработав аналитические формулы для расчета кольцевых и осевых напряжений в тонкостенных сосудах давления с многослойными стенками, формообразованными намоткой плоской металлической ленты под влиянием изменения угла ее спиральной намотки (навивки). Моделирование и исследование процесса проведено в *ANSYS*. Намотка ленты на внутренний (центральный) цилиндрический элемент реализована с предварительным натягом. Сравнение результатов кольцевых и осевых напряжений между аналитическим и КЭМ показывает хорошую корреляцию.

В 2007 г. Каборе, Джафар, Хамад, Ван и Ван [10] представили модель нелинейного поведения модуля радиального сжатия в процессе формообразования многослойных цилиндрических конструкций. Авторы ссылаются на уже известные к тому моменту работы Пфайфера, в которых намотанные слои рассматриваются как многослойный пакет под давлением.

Линейная и нелинейная модель для оценки напряжений и деформаций в процессе формообразования многослойных цилиндров разработана Лю в 2009 году [11]. Это модель уточняет граничные условия и другие особенности процесса формообразования относительно его прошлого исследования и предлагает решение для анизотропной конструкции. Говоря о нелинейном характере заготовки формобразуемого ортотропного цилиндра, Лю также ссылается на модель Пфайфера. Ценность полученных результатов и предложенных методов заключается в возможности оценки НДС формобразуемой конструкции и навиваемого следующим слоем участка

заготовки (ленты) до и после момента наложения очередного слоя (рисунок 4). Нелинейную модель Лю представляет на основе того, что все коэффициенты Пуассона приняты равными нулю, а нелинейность конструкции учитывается только в радиальном направлении.

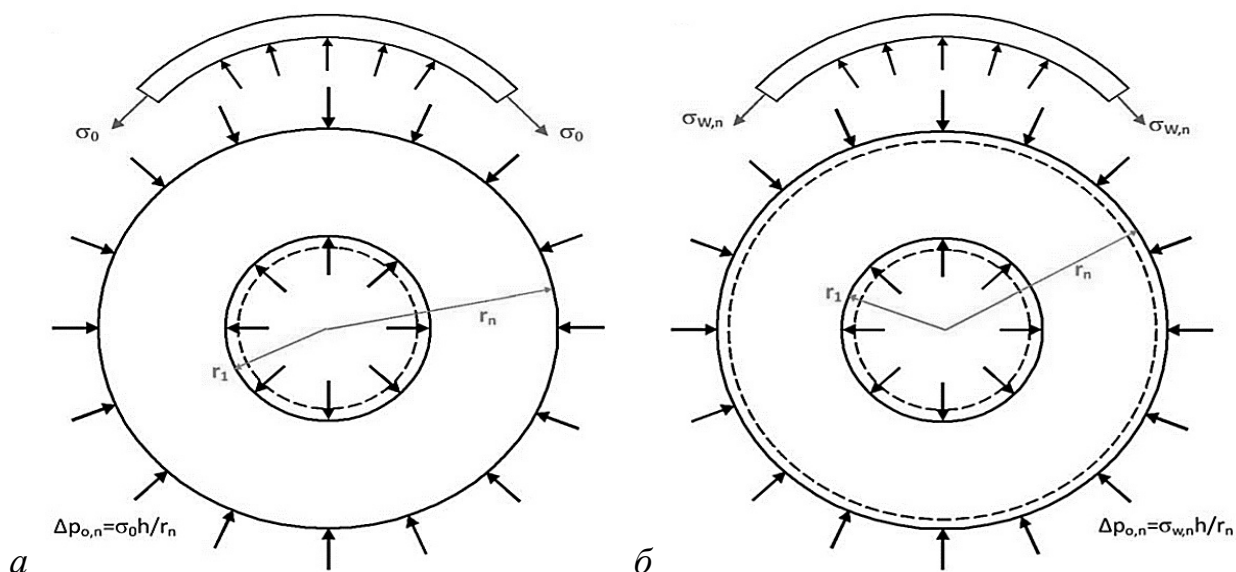


Рисунок 4 – Момент процесса формообразования с новым навиваемым слоем:
 а – исходные граничные условия (текущий навиваемый слой имеет (сохраняет) напряжение σ_0 ;

наружный радиус формообразованного к этому моменту цилиндра еще не деформирован);
 б – результирующие граничные условия (текущий навиваемый слой уже навит $\sigma_{w,n} \neq \sigma_0$;
 наружный радиус цилиндра деформирован)

В 2010 г. Алегри, Браво, Пресиано и Солагурен-Баскоа [12] представили методику моделирования процесса формообразования многослойной конструкции узкой заготовкой прямоугольного поперечного сечения (рисунок 5) из высокопрочной стали для анализа остаточных напряжений. В процессе формообразования заключается в последовательной укладке каждого слоя заготовки по ширине «стык в стык» с постепенным формированием сжимающих напряжений во внутреннем цилиндрическом элементе.

Предложенная методика дает возможность оценить вариации непродолжительных напряжений навивки для различных слоев, а также учитывать существующую разницу между модулями упругости материала центрального цилиндрического элемента и материала навиваемой заготовки.

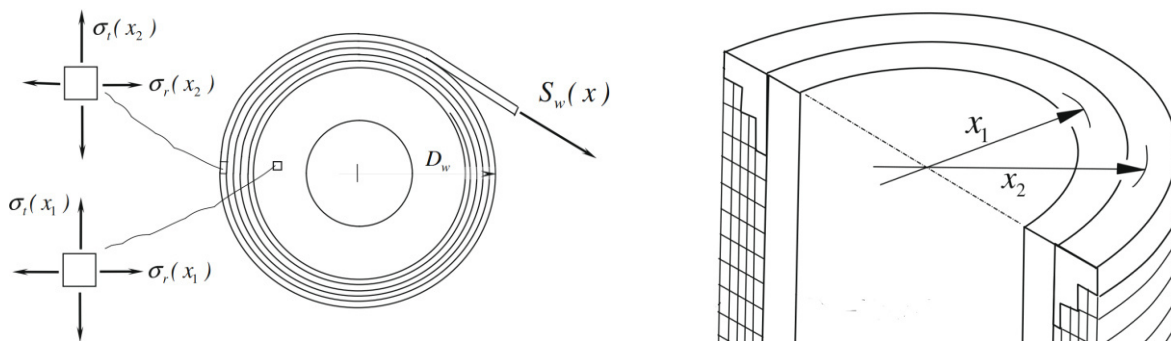


Рисунок 5 – Схема многослойной конструкции для сборки корпуса сосуда давления, намотанная узкой стальной лентой

В 2015г. Молламахмутоглу и Гуд [13] доказали, что ключевой характеристикой конечных элементов в КЭ-модели формообразования многослойных цилиндрических конструкций должно быть правильное распределение натяжения полотна формообразуемой ленты по ширине на текущем слое с изменением радиуса в зависимости от длины и толщины формообразуемой ленты. Сила натяжения навиваемой ленты, свойства ее материала, жесткость центрального цилиндрического элемента, а также конечный диаметр формообразуемой конструкции в конечном итоге оказывают влияние на изменение остаточных напряжений, которое может вызвать дефекты по длине и толщине. Предложенная Молламахмутоглу и Гудом модель может анализировать любые дефекты по всей длине полотна формообразуемой ленты также с учетом осевой симметрии.

В 2017 Джэн, Син и Чен [14] предложили методики определения деформации и остаточных напряжений толстостенного цилиндра с различными углами ленты под равномерным внутренним давлением (рисунок 6).

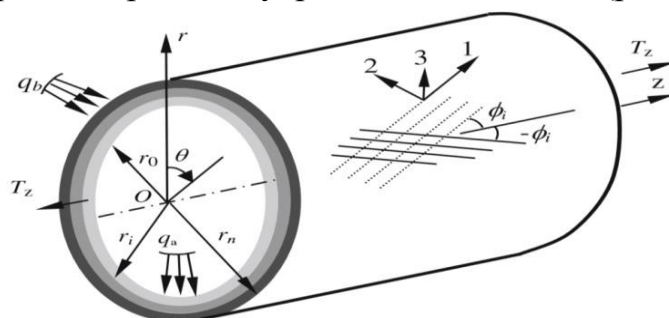


Рисунок 6 – Цилиндр, формообразованный намотанной лентой

Формируется модель и проводится расчет напряжений каждого ортотропного слоя, а также продольные напряжения вдоль направления ленты. Также рассчитываются поперечные напряжения, перпендикулярные

направлению навитой ленты и напряжения сдвига в слое ленты. Построена оптимизационная модель сосуда с концевыми элементами под равномерным внутренним давлением, подвергнутым критерию отказа Цай-Ву, для максимизации самой малой степени прочности по толщине с оптимальным изменением угла намотки.

Развитие моделей численного анализа радиальных напряжений в формообразуемых по спирали конструкциях с учетом эффектов гравитации, технологических (растягивающих ленту) и изгибающих напряжений представили коллеги Ли в 2016г. Полученная ими модель применима для различных материалов в том числе и не металлического происхождения показывает, как радиальные напряжения зависят от характеристик материала формообразуемой заготовки и от силы ее натяжения [15]. Компьютерная модель Ли учитывает эффект влияния гравитации и изгибающих напряжений на увеличение радиальных напряжений. Исследователи Ли показали, что радиальные напряжения возрастают с увлечением плотности материала формообразуемой заготовки, а изгибные снижаются. Максимум радиальных напряжений достигается при максимальном натяжении ленты формообразуемой конструкции. Однако, эта тенденция меняется с возрастанием разницы в величинах компонент результирующих напряжений.

Заключение

Представленный нами обзор результатов исследований методов моделирования процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкции и анализа остаточных напряжений позволяет проследить тренды развития.

Нами будет предпринята попытка развития некоторых из них. На основе метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе Simufact Forming и в программном комплексе Abaqus FEA мы планируем создать уточненные (максимально приближенные к условиям реальной физики процесса формообразования многослойной цилиндрической конструкции) модели технологического процесса. Оптимизация процесса относительно его режимов и параметров заготовки приведет нас к получению наиболее благоприятной картины остаточных напряжений в конструкции. Сравнить полученные результаты будем с математическими моделями, на основе которых нами разработаны два алгоритма расчета остаточных напряжений. Также мы попробуем уточнить какую-то из уже известных и приведенных выше моделей и методов расчета.

Список литературы

1. Gordeev, V. N. Stress analysis of coiled multilayer high-pressure vessels in the elastoplastic stage / V. N. Gordeev, M. A. Mikitarenko, A. V. Perel'muter // *Strength of Materials*. – 1979. – Vol. 11. – № 7. – PP. 778-783.
2. Investigation of the stress-strain condition of a multilayer rolled wall / П'ин L.A. [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 1979. – Vol. 15. – № 9. – PP. 668-671.
3. Об аппроксимирующей функции сближения шероховатых контактирующих поверхностей в многослойных конструкциях / П. Г. Пимштейн, А. А. Тупицын, Е. Г. Борсук, Л. Б. Цвик. – Текст : непосредственный // *Известия ВУЗов. Машиностроение*. – 1963. – № 12. – С. 3-9.
4. Drozdov, A. D. Optimization of winding process for composite pressure vessels / A. D. Drozdov, A. L. Kalamkarov // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1995. – Vol. 62. – № 1. – PP. 69-81.
5. Zhu R. Strength and safety analysis of flat steel ribbon helically wound pressure vessel / R. Zhu, G. Zhu // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1996. – Vol. 65. – № 1. – PP. 7-11.
6. Dvorak, G. J. Thick-walled composite cylinders with optimal fiber prestress / G. J. Dvorak, P. Prochazka // *Composites Part B: Engineering*. – 1996. – Vol. 27. – № 6. – PP. 643-649.
7. Srinivas, M. V. Design of Composite Cylinder Fabrication Process / M. V. Srinivas, G. J. Dvorak // *IUTAM Symposium on Transformation Problems in Composite and Active Materials* / ed. Bahei-El-Din Y.A., Dvorak G.J. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. – Vol. 60. – PP. 209–219.
8. Zheng, C. Optimal Winding Conditions of Flat Steel Ribbon Wound Pressure Vessels With Controllable Stresses / C. Zheng, S. Lei // *Journal of Applied Mechanics*. – 2008. – Vol. 75. – № 4. – PP. 041009.
9. Amin, M. Finite element analysis of pressure vessel with flat metal ribbon wound construction under the effect of changing helical winding angle / M. Amin, S. Ahmed // *Journal of Space Technology*. – 2011. – Vol. 1. – № 1. – PP. 34-39.
10. Modelling Radial Compressive Modulus in Wound Rolls / Kaboré P. [et al.] // *Measurement and Control*. – 2007. – Vol. 40. – № 7. – PP. 207-210.
11. Liu, M. L. A nonlinear model of center-wound rolls incorporating refined boundary conditions / M. L. Liu // *Computers & Structures*. – 2009. – Vol. 87. – № 9-10. – PP. 552-563.

12. Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique / J. M. Alegre [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2010. – Vol. 17. – № 1. – P. 61-69.

13. Mollamahmutoglu, C. Modeling the influence of web thickness and length imperfections resulting from manufacturing processes on wound roll stresses / C. Mollamahmutoglu, J. K. Good // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – Vol. 8. – PP. 22-33.

14. Geng, P. Winding angle optimization of filament-wound cylindrical vessel under internal pressure / P. Geng, J. Z. Xing, X. X. Chen // Arch Appl Mech. 2017. – Vol. 87. – № 3. – PP. 365-384.

15. Lee, J. An advanced model for the numerical analysis of the radial stress in center-wound rolls / J. Lee, C. Lee // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – Vol. 105. – PP. 360-368.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Еловенко Денис Александрович

Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Лермонтова 83, г. Иркутск, 644074,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Конструирования и стандартизации в
машиностроении».

Тел.: +7 (908) 653-80-10

E-mail: elovenko03@gmail.ru

Минаев Фёдор Михайлович

Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Лермонтова 83, г. Иркутск, 644074,
Российская Федерация.

Студент группы СДМ-18-1.

Тел.: +7 (950) 117-91-22

E-mail: minaev3000@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elovenko Denis Aleksandrovich

Institute of aircraft engineering and transport
Irkutsk National Research Technical University.

83, Lermontov st., Irkutsk, 644074,
the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Professor of
«Design and Standardization in Mechanical
engineering».

Phone: +7 (908) 653-80-10.

E-mail: elovenko03@gmail.ru

Minaev Fedor Mikhailovich

Institute of aircraft engineering and transport
Irkutsk National Research Technical University.

83, Lermontov st., Irkutsk, 644074,
the Russian Federation.

Student.

Phone: +7 (950) 117-91-22

E-mail: minaev3000@inbox.ru

**Г. М. Муртазалиев¹, К. Р. Айдемиров¹, Ш. А. Омаров¹,
М. М. Пайзулаев¹, М. М. Муртузов²**

¹Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ),
г. Махачкала, Российская Федерация,

²Махачкалинский филиал МАДГТУ (МАДИ), г. Махачкала, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКИ

Разработана методика расчета энергосиловых параметров магнитно-эластимпульсной формовки (МЭИФ) путем совместного решения задач, описывающих деформирование заготовки под действием заданного давления с определением функции жесткости эластичная среда–заготовка, а также с учетом электромеханических процессов в технологическом устройстве МЭИФ при заданной функции жесткости с определением закона изменения давления. Численные расчеты показывают, что индуктивность и сопротивление разрядного контура значительно меняются в процессе воздействия электромагнитного усилия на подвижный элемент.

Ключевые слова: энергосиловые параметры; технологическое устройство; магнитное поле; деформирование заготовки; эластичная среда; разрядный контур.

**Gelani M. Murtazaliev¹, Kurban R. Aidemirov¹, Shamil A. Omarov¹,
Magomed M. Payzulaev¹, Murtuz M. Murtuzov²**

¹Dagestan State Technical University (DSTU), Makhachkala, the Russian Federation,

²Makhachkala branch of MADSTU (MADI), Makhachkala, the Russian Federation.

MATHEMATICAL MODELING OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF MAGNETIC-ELASTIC-PULSE MOLDING

The developed method of calculation of power parameters of magnetic forming anastomoses (MEIF) by solving problems describing the deformation of the workpiece under the action of a predetermined pressure with the definition of the function of elastic stiffness environment-stocking, and also taking into account the Electromechanical processes in the technological system of MEEF for a given function of rigidity in the definition of the law of change of pressure. Numerical calculations show that the inductance and resistance of the discharge circuit change significantly during the action of an electromagnetic force on the moving element.

Keywords: power parameters; technological device; magnetic field; deformation of the workpiece; elastic medium; discharge circuit.

Повышение эффективности производства, качества, надежности и долговечности изделий – одна из главных задач современной промышленности. Решить ее можно путем широкого использования прогрессивных технологических процессов, в частности обработки металлов давлением (ОМД). Основными проблемными задачами совершенствования технологии являются: обеспечение наилучших служебных характеристик изделий, экономичность изготовления деталей их составляющих, снижение расхода материалов, используемых для их изготовления, повышение культуры производства при обеспечении его экологической чистоты [1].

Решение данной задачи может быть найдено путем рационального использования в едином технологическом процессе различных разновидностей технологии обработки материалов и умелого использования их возможностей. При опытном и мелкосерийном производстве к таким процессам относятся методы обработки листового материала давлением с применением эластичных сред, в частности магнитно-эластоимпульсная формовка (МЭИФ). Этому способствует ряд положительных характеристик, среди которых основными являются: возможность получения сравнительно тонкостенных деталей, имеющих минимальный вес при заданной прочности и жесткости; возможность получения пространственных деталей весьма сложной конфигурации; возможность существенного сокращения объема отделочных операций, в том числе и обработки резанием; возможность управления конечными служебными характеристиками деталей [2]. Этот способ позволяет быстро и с минимальными затратами переходить с одного вида продукции на другой, что особенно важно для реагирования на динамический рынок бытовых товаров в условиях конверсии.

Эффективность промышленного применения МЭИФ в значительной степени определяется уровнем разработки научных и практических рекомендаций для выбора оборудования, проектирования технологической оснастки. Такие рекомендации могут быть даны на основе расчета энергосиловых и деформационных параметров процесса. В разработанных в настоящее время моделях расчета технологического устройства МЭИФ не учитываются взаимное влияние нестационарной диффузии магнитного поля в металл индуктора и подвижного элемента на индуктивность и сопротивление разрядного контура магнитно-импульсной установки (МИУ), а также жесткости

системы эластичная среда–заготовка на параметры давления в эластичной среде при учете реального характера деформирования заготовки как динамической системы с распределенными параметрами, моделируемой моментной оболочкой из упрочняемого материала. Учет этих факторов при разработке математических моделей МЭИФ позволит более точно прогнозировать энергосиловые и деформационные характеристики процесса и поэтому представляется актуальным [3].

Цель данной работы – на основе принятия системы допущений получить математическую модель расчета преобразования давления в технологическом устройстве МЭИФ, учитывающая в комплексе взаимное влияние переходных электрических процессов в разрядном контуре, диффузии магнитного поля в материал индуктора и подвижного элемента, движения подвижного элемента, а также жесткости системы эластичная среда–заготовка.

Постановка задачи

Преобразование электрической энергии, запасенной в конденсаторной батарее в работу пластического деформирования отформованной заготовки представляет весьма сложный электромеханический процесс с взаимосвязанными отдельными составляющими, включающими: нелинейный разряд конденсаторной батарейки на переменные сопротивления и индуктивность; диффузию магнитного поля в материал индуктора и подвижного элемента, определяющую вместе с перемещением его величину эквивалентного объема, занимаемого магнитным полем и, соответственно, электромагнитное усилие; движение подвижного элемента под действием этого усилия и сопротивления со стороны эластичной среды; взаимодействие эластичной среды с формуемой заготовкой, наконец, взаимодействие заготовки с рельефом матрицы.

Так как основной задачей является оценка энергоемкости процесса и определение параметров напряженно-деформированного состояния заготовки, то это может быть достигнуто, если расчетная модель позволяет определить параметры давления в эластичной среде. Поэтому представляется целесообразным разбить данную достаточно сложную задачу на две взаимосвязанные параметрами давления в эластичной среде:

1. Преобразование электрической энергии конденсаторной батареи в потенциальную энергию сжатой эластичной среды, определяющую давление в ней;

2. Деформирование заготовки под действием давления в эластичной среде и оценка влияния на параметры давления через функцию жесткости.

Данные задачи предлагается объединить в общем внешнем итерационном вычислительном процессе, который проводится до тех пор, пока параметры давления в эластичной среде, которое связывает обе задачи, не стабилизируются с достаточной для технологических расчетов погрешностью [3].

При этом считаем, что функция жесткости системы эластичная среда–заготовка задана для первого шага внешнего итерационного процесса (k), и для шага ($k+1$) справедливо соотношение:

$$C_{эз} (x_3, P_9^k) - P_9^{k+1} F_2 x_3 = 0 \quad (1)$$

где $C_{эз}$ – функция жесткости системы эластичная среда-заготовка; P_9^k – давление в эластичной среде; F_2 – площадь контейнера; x_3 – перемещение торца подвижного элемента.

При разработке методики дополнительно принимаем следующие допущения:

- индуктивность и сопротивление разрядного контура полагаются сосредоточенными и состоящими из двух частей: установки ($R_y; L_y$) с постоянными и системы индуктор–подвижный элемент ($R_{1,2}; L_{1,2}$), определяющейся проникновением магнитного поля в металл элементов системы, а также увеличением зазора между элементами за счет перемещения подвижного элемента;

- при рассмотрении диффузии магнитного поля в металл индуктора и подвижного элемента предполагается плоская электромагнитная волна, а распределение напряженности магнитного поля в металле спирали индуктора и подвижного элемента предполагается одномерным;

- нагрев подвижного элемента и спирали индуктора не учитывается, и поэтому коэффициенты электропроводности считаются постоянными, а уравнения диффузии магнитного поля – линейными при нелинейности общей задачи диффузии вследствие нелинейности граничных условий;

- контейнер и подвижный элемент полагаются абсолютно жесткими, вследствие чего их упругими деформациями пренебрегаем;

- считаем, что давление во всем объеме эластичной среды распределено

равномерно, что эквивалентно в данном случае предположению о квазистатичности процесса деформирования эластичной среды;

- на основе двух последних допущений пренебрегаем волновыми переходными процессами в подвижном элементе и эластичной среде, что допустимо с учетом относительно большой длительности давления в эластичной среде в условиях относительно большой податливости заготовки;

- учитывая марку полиуретана, применяемого при МЭИФ (СКУ-6Л), а также уровень давления в эластичной среде при формовке (в пределах 10–100 МПа), дополнительным давлением, необходимым для формоизменения самого эластичного блока пренебрегаем;

- исходя из аналогичных соображений, учитывая малость коэффициента трения в данных условиях (менее 0,01), работой сил трения эластичной среды о стенки контейнера, торец подвижного элемента и заготовку пренебрегаем по сравнению с работой пластического деформирования заготовки;

- эластичную среду в условиях указанных выше давлений рассматриваем в виде идеальной линейно упругой жидкости, сжимаемость которой определяется усредненным динамическим модулем объемного сжатия.

Численное решение поставленной задачи осуществляется конечно-разностным методом на ЭВМ. Алгоритм численного решения описан в статье [4].

Выводы:

1. На основе принятия системы допущений предложена методика расчета энергосиловых параметров МЭИФ путем совместного решения задач, описывающих деформирование заготовки под действием заданного давления с определением функции жесткости эластичная среда–заготовка, а также электромеханические процессы в технологическом устройстве МЭИФ при заданной функции жесткости с определением закона давления.

2. Разработана расчетная модель преобразования давления в технологическом устройстве МЭИФ, учитывающая в комплексе взаимное влияние переходных электрических процессов в разрядном контуре, диффузии магнитного поля в материал индуктора и подвижного элемента, движения подвижного элемента, а также жесткости системы эластичная среда–заготовка.

3. Численные расчеты показывают, что индуктивность и сопротивление разрядного контура значительно меняются в процессе воздействия электромагнитного усилия на подвижный элемент.

4. Показано, что данная расчетная модель позволяет определить необходимое напряжение заряда конденсаторной батарейки и тем самым энергоемкость процесса.

Список литературы

1. Мамутов, В. С. Вырубка-пробивка особо тонколистовых металлов на магнитно-импульсной установке / В. С. Мамутов. – Текст : непосредственный // Современное машиностроение. Наука и образование : Материалы международной науч.-практ. конференции. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 867-874.

2. Омаров, Ш. А. Совершенствование предельного формоизменения при обработке материалов давлением / Ш. А. Омаров. – Текст : непосредственный // Проблемы механики и управления : Материалы Международной конференции (16–22 сентября 2018 г. Махачкала). – Москва : Издательство Московского университета, 2018. – С. 306-310.

3. Омаров, Ш. А. Разработка технологических процессов магнитно-эластоимпульсной формовки листовых материалов на основе математического моделирования энергосиловых и деформационных параметров / Ш. А. Омаров. – Текст : непосредственный. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 1995. – 181 с.

4. Расчет технологического устройства магнитно-эластоимпульсной штамповки / П. В. Верещагин, Р. К. Жукеев, В. С. Мамутов, Ш. А. Омаров. – Санкт-Петербург : С.-Петербургский гос. тех. ун-т, 1994. – 30 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич
Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ).
Им. Шамиля пр., д. 70, г. Махачкала, 367026, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Сопrotивление материалов, теоретическая и строительная механика».
E-mail: smdstu@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Murtazaliev Gelani Murtazalievich
Dagestan State Technical University (DSTU).
Shamil Ave., 70, Makhachkala, 367026, Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Resistance of Materials, theoretical and structural mechanics"
E-mail: smdstu@mail.ru

Айдемиров Курбан Рабаданович

Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ).

Им. Шамиля пр., д. 70, г. Махачкала, 367026, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов, теоретическая и строительная механика».

Тел.: +7 (928) 054-22-49

E-mail: kyraydu@mail.ru

Aidemirov Kurban Rabadanovich

Dagestan State Technical University (DSTU).
Shamil Ave., 70, Makhachkala, 367026, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Resistance of Materials, theoretical and structural mechanics».

Phone: +7 (928) 054-22-49

E-mail: kyraydu@mail.ru

Омаров Шамиль Абдулаевич

Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ).

Им. Шамиля пр., д. 70, г. Махачкала, 367026, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов, теоретическая и строительная механика».

Тел.: +7 (928) 869 45-96

E-mail: keger1963@mail.ru, smdstu@mail.ru

Omarov Shamil Abdulayevich

Dagestan State Technical University (DSTU).
Shamil Ave., 70, Makhachkala, 367026, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Resistance of Materials, theoretical and Structural Mechanics»

Phone : +7 (928) 869 45-96

E-mail: keger1963@mail.ru , smdstu@mail.ru

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич

Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ).

Им. Шамиля пр., д. 70, г. Махачкала, 367026, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов, теоретическая и строительная механика».

Тел.: +7 (960) 421 72-75

E-mail: smdstu@mail.ru

Payzulaev Magomed Murtazalievich

Dagestan State Technical University (DSTU).
Shamil Ave., 70, Makhachkala, 367026, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Resistance of Materials, theoretical and construction mechanics»

Phone : +7 (960) 421 72-75

E-mail: smdstu@mail.ru

Муртузов Муртуз Магомедович

Махачкалинский филиал МАДГТУ (МАДИ).

Кандидат технических наук.

Murtuz Murtuz Magomedovich

Makhachkala branch of MADSTU (MADI).

Candidate of Technical Sciences.

О. Б. Скворцов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),
г. Москва, Российская Федерация

АДДИТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВИБРАЦИИ И СИНЕРГИЧНОСТЬ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

В работе рассмотрены вопросы оценки вибрационных процессов со сложным спектральным составом на элементы конструкции оборудования. Действующая в области контроля вибрации нормативная база ориентирована на контроль интенсивности вибрационных процессов по среднему уровню вибрационной скорости. Такие методы оценки существенно отличаются от применяемых при исследовании вибрационной прочности материалов оценок по интегральному уровню вибрационного воздействия. Для таких методик также характерно использование оценки вибрации по результатам измерения действующего ускорения. При исследовании прочности в условиях циклического нагружения для материалов в качестве действующего на материал нагружения используются результаты оценки механических напряжений по величине деформаций. Вибрационное воздействие является частным случаем циклического нагружения, а используемые оценки деформации соответствуют вибрационным перемещениям исследуемых материалов. Такие особенности в случае сложного спектрального состава вибрации приводят к существенной недооценке вклада высокочастотных составляющих, что подтверждается результатами испытаний на циклическую усталость материалов и конструкционных элементов в условиях многочастотных комбинированных нагружений.

Ключевые слова: вибрация, прочность, ускорение, динамические силы, вибрационное перемещение, деформация, усталость.

Oleg B. Skvortsov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH),
Moscow, the Russian Federation

ADDITIVE HIGH-FREQUENCY VIBRATIONS AND SYNERGICITY OF FATIGUE STRENGTH

The paper deals with the assessment of vibration processes with a complex spectral composition for equipment design elements. The current regulatory framework in the field of

vibration control is focused on controlling the intensity of vibration processes by the average level of vibration speed. Such assessment methods differ significantly from those used in the study of the vibration strength of materials, estimates for the integral level of vibration exposure. Such techniques are also characterized by the use of vibration assessment based on the results of measuring the effective acceleration. When studying the strength under cyclic loading for materials, the results of evaluating mechanical stresses by the magnitude of deformations are used as the loading acting on the material. Vibration action is a special case of cyclic loading, and the used deformation estimates correspond to the vibrational displacements of the materials under study. Such features in the case of a complex spectral composition of vibration lead to a significant underestimation of the contribution of high-frequency components, which is confirmed by the results of cyclic fatigue tests of materials and structural elements under conditions of multifrequency combined loading.

Keywords: vibration, strength, acceleration, dynamic forces, vibration displacement, deformation, fatigue.

Введение.

При мониторинге вибрационного состояния машин и механизмов, а также конструктивных элементов оборудования и сооружений контроль вибрации используется для оценки текущего состояния и диагностики по средним уровням вибрационной скорости. Вопросы вибрационной усталости при этом, как правило, не учитываются. С другой стороны, действие вибрации сопровождается часто значительными по величине дополнительными динамическими нагрузками, которые могут приводить к развитию дефектов в конструктивных материалах и элементах оборудования. Процессы усталостного накопления повреждений обычно характеризуют *S-N* диаграммами. Такие диаграммы позволяют оценить величину допустимых механических напряжений. Для вибрационных воздействий могут быть использованы, например, оценки вибрационной скорости [1]. Максимальное значение изгибного напряжения для конструктивного элемента в виде балки:

$$\sigma_{MAX} = \sqrt{E_{DYN} \cdot \rho} \cdot \sqrt{3 \frac{G_{TOL}}{G_{BEAM}} \cdot k_n \cdot V_{MAX}} \quad (1)$$

где V_{MAX} – максимальное значение скорости по всей длине балки;

E_{DYN} – динамический модуль упругости материала балки (модуль Юнга $E=Pa/\varepsilon$, где ε - безразмерная деформация);

ρ - плотность материала балки;

G_{TOL}/G_{BEAM} – коэффициент нагрузки. При нагружении балки кроме собственного веса G_{BEAM} на нее действует еще и равномерно распределенное по всей длине балки силовое воздействие $G_{OTHERLOADS}$ ($G_{TOL} = G_{BEAM} + G_{OTHERLOADS}$);

k_n – безразмерный модальный коэффициент, имеющий значение в диапазоне от 1 до 1,33 и зависящий от условий закрепления и моды колебаний.

Обзор стандартов, определяющих методики контроля вибрации механического оборудования, представлен в [2]. В стандарте [3] в качестве основного параметра при вибрационных измерениях рекомендовано использовать оценки среднего значения вибрационной скорости в точках контроля.

Мониторинг вибрации сложного механического оборудования показывает, что для адекватной оценки вибрационного воздействия и учета процессов, связанных с вибрационной усталостью необходимо учитывать влияние, как низкочастотных составляющих сложных вибрационных процессов, так и высокочастотные составляющие [4, 5]. Влияние высокочастотных вибраций может быть учтено при контроле по результатам измерения вибрационного ускорения. Это обеспечивает учет динамических силовых локальных воздействий и учет диаграмм усталости «виброперегрузка-число циклов нагружения», которые являются эквивалентным представлением $S-N$ диаграмм для случая вибрационной усталости.

Методика контроля широкополосного вибрационного воздействия

Вибрацию конструктивных элементов машин и механизмов контролируют с использованием датчиков вибрационных перемещений (проксиметров), датчиков вибрационной скорости (велосиметров) и датчиков вибрационных ускорений (акселерометров). Наиболее широкое распространение получило использование акселерометров. Акселерометры просты по конструкции, надежны, обеспечивают получение хорошей точности и имеют относительно низкую стоимость. В особенности это относится к акселерометрам в микроэлектронном исполнении, называемым MEMs акселерометрами. Недостатком проксиметров и велосиметров является ограниченность частотного диапазона вибраций при их использовании для измерений. Акселерометры позволяют выполнять измерение вибрации на частотах в десятки килогерц. Если контроль вибрации при их использовании

выполняется по величине скорости, сигнал ускорения приходится интегрировать аналоговыми или цифровыми методами. При интегрировании сигналов происходит ослабление высокочастотных составляющих. Это приводит к потере информации о влиянии высокочастотных составляющих на результаты вибрационного мониторинга оборудования [4].

Рассмотрим измерение вибрации простого механического узла. На рисунке 1 показана конструкция в виде массивного элемента закрепленного на неподвижном основании.

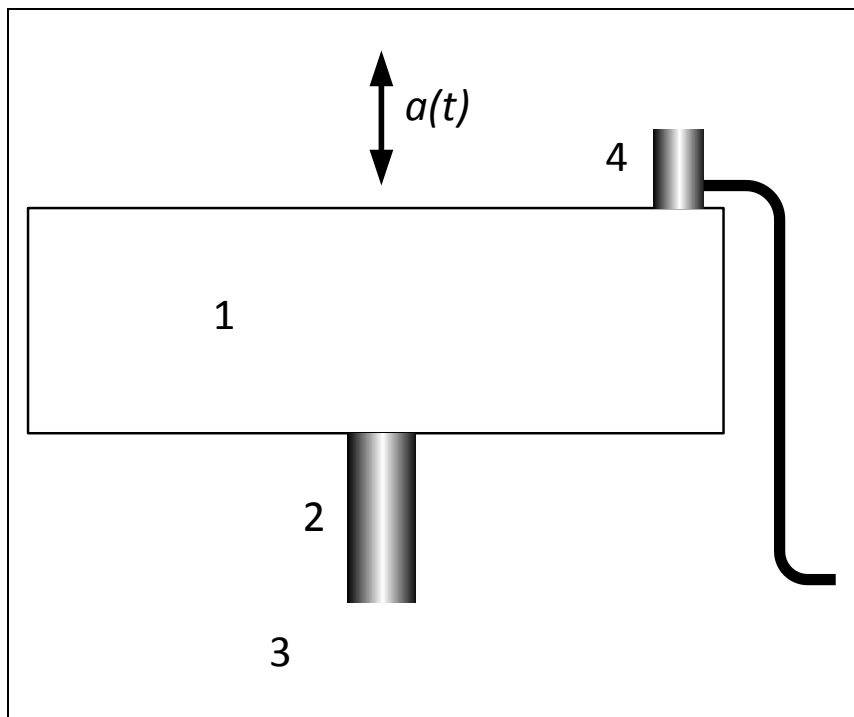


Рисунок 1 – Элемент конструкции 1 закреплен через элемент крепления 2 на неподвижном основании 3. Элемент 1 конструкции вибрирует под действием внешних воздействий с ускорением $a(t)$, которое контролируется акселерометром 4.

Сила $F(t)$ действующая на элемент крепления

$$F(t) = M \cdot a(t) , \quad (2)$$

где M масса элемента конструкции.

Если площадь поперечного сечения элемента крепления 2 равна S , а предельное значение циклической нагрузке равно P можно оценить допустимую величину вибрации по ускорению как

$$P \geq \frac{F(t)}{S} = \frac{M}{S} a(t) , \quad (3)$$

откуда

$$a(t) < \frac{PS}{M}, \quad (4)$$

или

$$d(t) = \frac{a(t)}{4\pi^2 f^2} < \frac{PS}{4\pi^2 f^2 M}, \quad (5)$$

где f – частота вибрации.

Полученные соотношения показывают, что незначительные по амплитуде перемещения высокочастотные вибрации могут создавать значительные динамические ускорения и механические напряжения в элементах крепления. Такие механические напряжения могут приводить к ускоренному проявлению вибрационной усталости. Это может быть особенно заметно, поскольку действие высокочастотной вибрации приводит к получению большого числа циклов нагружения за короткий промежуток времени эксплуатации оборудования. Из типовых $S-N$ диаграмм следует, что при большом числе циклов нагружения пороговые уровни усталостного разрушения существенно (часто на порядок) снижаются.

Экспериментальные исследования вибрационных сигналов от датчиков, установленных на элементах агрегатов мощного энергетического оборудования [6] показывают, что интегрирование сигналов ускорения для получения оценок вибрационных скорости и перемещения сопровождается потерей информативных составляющих об имеющемся влиянии высокочастотных вибраций в процессе эксплуатации.

Величина вибрационного ускорения (виброперегрузки) и комбинация периодических и ударных ускорений являются важной причиной образования и развития дефектов в работающем промышленном оборудовании [7]. Присутствие этих факторов влияет на быстрый нелинейный (квадратичный) рост повреждений оборудования.

На рисунке 2 приведены сигналы суммарного вибрационного перемещения и ускорения:

$$d(t) = D_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + D_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t), \quad (6)$$

и

$$a(t) = A_1 \cdot \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \cdot \sin(2\pi f_2 t), \quad (7)$$

для $D_1=100$ мкм, $f_1=10$ Гц, $D_2=1$ мкм и $f_2=500$ Гц.

Такая вибрация при контроле перемещения представляет практически только один низкочастотный сигнал, а при контроле ускорения – практически только один высокочастотный сигнал значительной амплитуды.

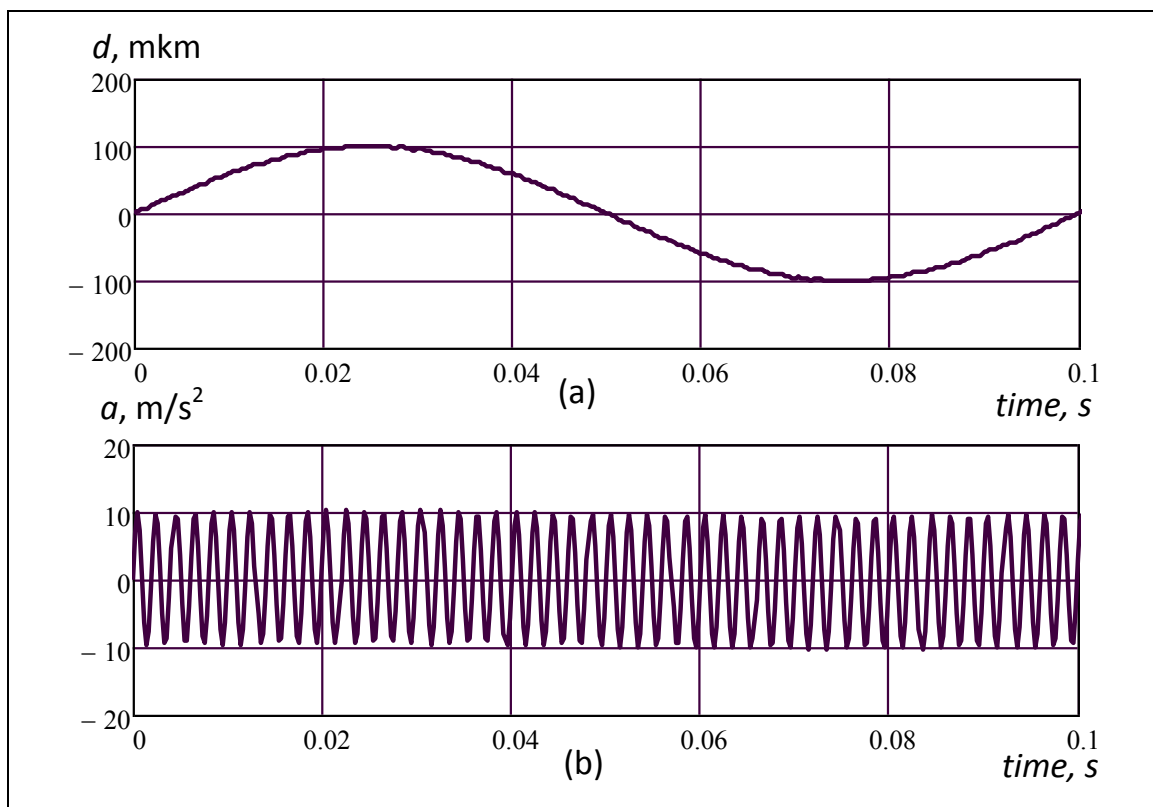


Рисунок 2 – Сигналы двухчастотного вибрационного перемещения (а) и вибрационного ускорения (b)

Длительные и многочисленные исследования разных авторов механической прочности конструкционных материалов в условиях двухчастотного (бигармонического) нагружения [8-15] показали, что дополнение низкочастотного циклического нагружения высокочастотным воздействием существенно снижает порог усталостного разрушения. При этом амплитуда высокочастотного нагружения, оцениваемая по величине деформации существенно ниже низкочастотной составляющей. Такую особенность сильного влияния малых высокочастотных воздействий обычно объясняют явлением синергизма. Для объяснения этого можно предположить, что высокочастотное нагружение создает в испытываемых образцах значительные динамические механические напряжения за счет локального возбуждения механических ускорений. Высокочастотные динамические механические напряжения в свою очередь вызывают процессы развития

многоциклового усталости, для которой характерно значительное снижение порога усталости по сравнению со статической и малоциклового усталостью из-за действия низкочастотных нагрузений.

В случае полигармонического нагружения сложение различных частотных составляющих с некратными частотами порождает кратковременные всплески уровня ускорения, эквивалентные ударным динамическим процессам. Несмотря на кратковременный и достаточно редкий характер таких всплесков амплитуды, они способствуют процессу зарождения дефектов в конструкционных материалах с последующим их развитием при циклических нагружениях.

Высокие уровни высокочастотных вибрационных составляющих и соответствующие им большие динамические нагрузки в локальных областях конструктивных элементов могут быть также связаны с проявлением резонансных явлений. Резонансные процессы проявляются на собственных частотах различных элементов. Оценки таких частот для различных примеров выполнения элементов и особенностей их крепления даны в [16]. Увеличение амплитуды колебаний в этих случаях может превышать десятикратное значение, что приводит к увеличению возможных усталостных повреждений.

Выводы

Высокочастотные вибрационные процессы создают в элементах машин и механизмов значительные динамические напряжения. При этом амплитуда соответствующих им перемещений незначительна и составляет малую часть суммарных вибрационных перемещений. Влияние высокочастотных вибрационных составляющих и их вклад можно оценить при контроле вибрационных ускорений, но такие измерения, как правило, не предусмотрены действующими нормативными документами. Механизмы влияния высокочастотных вибрационных составляющих можно отнести к проявлениям вибрационной усталости. Контроль за усталостью материалов в элементах промышленного оборудования также не регламентирован в большей части стандартов касающихся контроля вибрации машин и механизмов, что ограничивает возможности их эффективного применения. Внесение соответствующих дополнений в нормативно-правовые документы может способствовать снижению аварийности и повышению надежности различного промышленного оборудования, работа которого связана с действием вибрации.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 16 с. – Текст : непосредственный.
2. Standardization of absolute vibration level and damage factors for machinery health monit / S. Kumaraswamy, J. Rakesh, A. K. Nalavade [et al] // Proceedings of VETOMAC-2, 16-18 December, 2002. – 8 p.
3. ГОСТ Р 56646-2015 Вибрация. Руководство по выбору критериев оценки вибрационного состояния машин. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 31 с. – Текст : непосредственный.
4. Скворцов, О. Б. Перспективы развития нормативной базы и расширения вибрационного мониторинга роторного оборудования / О. Б. Скворцов. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – № 8. – 2017. – С. 46-53.
5. Скворцов, О. Б. Вибрационный мониторинг и прочность конструктивных элементов с учетом инерционных свойств материалов при воздействии широкополосной вибрации / О. Б. Скворцов. – Текст : непосредственный // Инженерный журнал: наука и инновации. – № 6. – 2020. – 17 с.
6. Трунин, Е. С. Эксплуатационный контроль технического остояния гидроагрегатов / Е. С. Трунин, О. Б. Скворцов. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – № 6. – 2010. – С. 38-45.
7. Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок / И. И. Блехман, Л. И. Блехман, В. Б. Васильков [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник научно-технического развития №11 (63), 2012. – 12 с.
8. Буглов, Е. Г. Исследование усталости стали при бигармоническом нагружении. / Е. Г. Буглов, Э. А. Коликов, М. Я. Филатов. – Текст : непосредственный // Проблемы прочности. – №1. – 1970. – С. 46-49.
9. Зайцев, Г. З. Усталостная прочность деталей гидротурбин – влияние двухчастотного нагружения на усталостную прочность сталей / Г. З. Зайцев, А. Я. Аронсон. – Москва : Машиностроение, 1975. – 160 с. – Текст : непосредственный.
10. Гаденин, М. М. Особенности развития деформаций и накопления повреждений при двухчастотном малоцикловом нагружении и повышенных температурах / М. М. Гаденин. – Текст : непосредственный // Машиноведение. – 1976. – №1. – С. 66–79.

11. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: учеб. пособие / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с. – Текст : непосредственный.

12. Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, Д. О. Резников, Д. А. Неганов. – Текст : непосредственный // Чебышевский сборник, 2017. – Том 18. – Выпуск 3. – С. 394-416.

13. Агамиров, Л. В. Усталостная долговечность и повреждаемость авиационных конструкций / Л. В. Агамиров, В. Л. Райхер. – Москва, 2018. – 134 с. – Текст : непосредственный.

14. Махутов, Н. А. Закономерности накопления малоцикловых повреждений с учетом эксплуатационных параметров процесса нагружения / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин. – Текст : непосредственный // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 56. – С. 45-57.

15. Пахоменков, А. В. Расчётно-экспериментальное прогнозирование малоцикловой долговечности и ресурса дисков ГТД с учётом влияния аналитических и эксплуатационных факторов / А. В. Пахоменков. – Текст : непосредственный // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Рыбинск, 2020. – 156 с.

16. Blevins, R. D. Formulas for natural frequency and mode shapes / R. D. Blevins // VNR. – 1979. – 492 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Скворцов Олег Борисович

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН).
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва,
101990, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник лаборатории
структурной акустики, ИМАШ РАН.

Тел.: +7 (499) 135-81-20

E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Skvortsov Oleg Borisovich

Mechanical Engineering Research Institute of
the Russian Academy of Sciences (IMASH).
4, M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow,
101990, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Senior
Researcher, Structural Acoustics Laboratory,
IMASH RAS.

Phone: +7 (499) 135-81-20

E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

В. П. Клюка¹, С. А. Мосол¹, А. М. Курманов²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация,

²Эксплуатационное локомотивное депо Омск Западно-Сибирской дирекции тяги – филиала
Дирекции тяги ОАО «РЖД», г. Омск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВА ЗАРЯДКИ И ОПРОБОВАНИЯ ТОРМОЗОВ ПОЕЗДА С ФУНКЦИЯМИ ИХ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ НА БАЗЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРАНОВ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЗАМИ № 130 И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ ЛОКОМОТИВАМИ

В настоящее время на железных дорогах ОАО «РЖД» эксплуатируется значительное количество современных локомотивов, оборудованных кранами дистанционного управления тормозами № 130 и микропроцессорными системами управления (МПСУ). При некоторой доработке появляется возможность дополнить указанные устройства такие локомотивы функциями устройств зарядки и опробования тормозов поезда с диагностикой и мониторингом их состояния как на стоянках, так и в пути следования.

Данные усовершенствования особенно актуальны при увеличении протяженности гарантийных участков безопасного проследования вагонов в составах поездов, когда смена локомотивов может производиться в ряде случаев станциях со слабо оснащенными ПТО вагонов. При этом использование бортовых устройств локомотивов с расширенным перечнем функций для диагностики и мониторинга тормозов поезда позволит значительно сократить время простоев транзитных поездов при опробовании тормозов, непрерывно контролировать техническое состояние тормозов поезда в пути следования, повысить безопасность движения и в целом способствовать повышению эффективности перевозок.

Ключевые слова: локомотивы, автотормоза, кран дистанционного управления тормозами № 130, микропроцессорные системы управления локомотивами, диагностика технического состояния тормозов поезда, их опробование на стоянке и мониторинг в пути следования.

Vladislav P. Klyuka¹, Sergey A. Mosol¹, Aslan M. Kurmanov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Operational locomotive depot Omsk of the West Siberian Traction Directorate of the branch of the Traction Directorate of JSC «Russian Railways», Omsk, the Russian Federation

TO THE QUESTION OF DEVELOPING A DEVICE FOR CHARGING AND TESTING TRAIN BRAKES WITH THE FUNCTIONS OF THEIR DIAGNOSIS AND MONITORING IN THE WAY OF FOLLOWING ON THE BASIS OF THE USE OF REMOTE CONTROL CRANES OF SOREMIC BRAKES LIKE No.130

Currently, a significant number of modern locomotives equipped with remote brake control cranes No. 130 and microprocessor control systems (MPCS) are operated on the railways of JSC "Russian Railways". With some refinement, it becomes possible to supplement such locomotives with the functions of charging devices and testing train brakes with diagnostics and monitoring of their condition both at parking lots and en route. These improvements are especially relevant when increasing the length of the guaranteed sections of the safe passage of cars in train trains, when the change of locomotives can be carried out in some cases at stations with poorly equipped railcars. At the same time, the use of on-board devices of locomotives with an expanded list of functions for diagnostics and monitoring of train brakes will significantly reduce the downtime of transit trains when testing brakes, continuously monitor the technical condition of train brakes en route, improve traffic safety and generally contribute to improving transportation efficiency.

Keywords: locomotives, auto brakes, remote brake control crane No. 130, microprocessor control systems for locomotives, diagnostics of the technical condition of train brakes, their testing in the parking lot and monitoring en route.

В настоящее время многие ПТО вагонов станций сети железных дорог ОАО «РЖД» оборудованы стационарными устройствами зарядки и опробования тормозов в составах поездов от станционной сети (компрессорной установки) при подготовке их к отправлению. К таким устройствам относятся системы ЦПА, УЗОТ-Р, УЗОТ-РМ, УЗОТ-Радио, «АСДТ» (разных модификаций). Эти устройства позволяют производить зарядку тормозной сети составов, полное и сокращенное опробование тормозов в них без участия локомотива и локомотивной бригады (в том числе диагностику технического состояния тормозного оборудования в системах УЗОТ-РМ, УЗОТ-Радио и АСДТ). Однако такие устройства требуют наличия компрессорных установок и

развитой воздушной сети на станциях, что само по себе вызывает необходимость выделения значительного объема инвестиционных средств для оборудования ими ПТО вагонов. В свою очередь такие устройства окупаются лишь при значительном количестве обрабатываемых составов, поэтому стационарные установки зарядки и опробования тормозов применяются лишь на крупных ПТО вагонов (в основном на сортировочных станциях и станциях массовой погрузки грузов).

В то же время на сети железных дорог ОАО «РЖД» существует достаточно много ПТО вагонов со средними и малыми объемами работы по техническому обслуживанию вагонов (в том числе - выполнению полного и сокращенного опробования тормозов в поездах). Оборудование таких ПТО вагонов вышеуказанными стационарными устройствами зарядки и опробования тормозов в составах поездов не предусматривается в силу причин экономического характера, вследствие чего на этих ПТО отсутствует возможность проведения диагностики состояния тормозного оборудования вагонов современными техническими средствами. Поэтому на таких станциях при проведении полного опробования тормозов в поездах от локомотивов спектр выявляемых осмотрщиками - ремонтниками вагонов неисправностей тормозного оборудования вагонов ограничен уровнем квалификации и опытом работы персонала, что не гарантирует безопасности движения поездов на высоком уровне из-за повышенной вероятности появления отказов технических средств.

С другой стороны, в последние годы на сеть железных дорог поступает значительное количество современных локомотивов новых серий, которые оборудованы микропроцессорными системами управления - далее МПСУ - и одновременно кранами дистанционного управления тормозами № 130 - далее кран № 130 (функционал которого предусматривает его непосредственное взаимодействие с МПСУ). К таким локомотивам относятся грузовые электровозы постоянного тока 2ЭС6, 2ЭС10, грузовые электровозы переменного тока 2ЭС7, пассажирские электровозы переменного тока ЭП1М, пассажирские электровозы двойного питания ЭП20, грузовые тепловозы 2ТЭ25А и другие современные локомотивы.

Потенциальные возможности МПСУ современных локомотивов в сочетании с кранами № 130, согласно [1], позволяют при некоторых

доработках указанных устройств оснастить их функциями современных систем зарядки и опробования тормозов УЗОТ-РМ и АСДТ (для одного состава с поездным локомотивом в голове). Указанная модернизация даст возможность не только проведения полноценной диагностики технического состояния тормозного оборудования вагонов состава перед выполнением полного опробования тормозов поезда и в ходе его выполнения (что особенно важно, например, при полном опробовании тормозов перед отправлением поезда с промежуточной станции после его стоянки без локомотивной бригады), но и предоставит возможность постоянного мониторинга тормозов поезда машинистом в пути следования. Отслеживание функций мониторинга будет выглядеть аналогично выводу на окно дисплея МПСУ, например, информации о работе электрооборудования локомотива (с автоматическим выводом при необходимости тревожных сообщений для машиниста о ненормальной работе тормозов поезда на любое используемое в данный момент времени окно дисплея МПСУ).

Для оценки потенциальных возможностей предлагаемой модернизации МПСУ локомотива и крана № 130 рассмотрим сравнительную характеристику функций систем УЗОТ-РМ и АСДТ в сочетании с обобщенными функциями в объеме предлагаемой модернизации МПСУ/крана № 130 (табл. 1):

Таблица 1

Сравнительная характеристика функций систем УЗОТ-РМ и АСДТ

Перечень функций:		Обобщенные функции в объеме предлагаемой модернизации МПСУ/крана № 130
УЗОТ-РМ	АСДТ	
1	2	3
- продувка тормозной магистрали сжатым воздухом давлением 1,6 ... 1,9 кгс/см ² при соединении тормозных рукавов;	- продувка тормозной магистрали пониженным давлением 1,7...2,2 кгс/кв. см (используется при соединении рукавов при формировании состава);	- продувка тормозной магистрали пониженным давлением 1,7...2,2 кгс/кв. см (используется при соединении рукавов в ходе формирования состава);

<p>- ускоренная (за 8...20 минут) зарядка тормозной магистрали повышенным давлением с последующей автоматической ликвидацией его темпом, не приводящим к срабатыванию тормозов;</p> <p>- проверка тормозов на «мягкость» с контролем срабатывания при ликвидации сверхзарядного давления темпом «мягкости» (0,2 кгс/см² за 80 – 120 с) и выявлением самопроизвольного срабатывания ВР;</p> <p>- проверка плотности тормозной сети состава длиной до 580 осей в автоматическом и ручном режимах, при</p>	<p>- зарядка тормозной сети состава до установленного давления (при значительном числе осей в составе возможно применение ускоренной зарядки тормозной магистрали с последующей ликвидацией сверхзарядного давления до установленного);</p> <p>- автоматический контроль окончания процессов зарядки, отпуска и торможения;</p> <p>- проверка плотности тормозной магистрали в состоянии отпуска/торможения/заторможенности;</p> <p>- автоматическая</p>	<p>- ускоренная зарядка тормозной магистрали повышенным давлением с последующей автоматической ликвидацией его до установленного зарядного темпом, не приводящим к срабатыванию тормозов;</p> <p>- автоматический контроль окончания процесса зарядки;</p> <p>- проверка тормозов на «мягкость» с контролем срабатывания при ликвидации сверхзарядного давления темпом «мягкости» (0,2 кгс/см² за 80...120 с) и выявлением самопроизвольного срабатывания;</p> <p>- проверка плотности тормозной сети состава в автоматическом и ручном режимах, при зарядном давлении, ступени торможения и заторможенности (перекрыше);</p> <p>- автоматическая</p>
--	--	--

<p>зарядном давлении и при ступени торможения;</p> <p>- непрерывный контроль плотности и давления воздуха в ТМ;</p> <p>- определение воздухораспределителей, имеющих замедленный отпуск;</p> <p>- проверка целостности тормозной магистрали состава при продувке тормозной магистрали открыванием концевого крана хвостового вагона;</p>	<p>локализация вагона с самопроизвольно срабатывающими тормозами, чувствительными к темпу мягкости;</p> <p>- автоматическое измерение давления в тормозной магистрали хвостового вагона с сопоставлением нормативу;</p> <p>- обнаружение замедленного отпуска одного или нескольких вагонов;</p> <p>- автоматическая проверка целостности тормозной магистрали с выдачей результатов в компьютер на этапе зарядки тормозной сети;</p> <p>- автоматическая локализация пробки в тормозной магистрали;</p> <p>- автоматическая оценка заужения тормозной магистрали;</p> <p>- автоматическое определение факта перекрытия концевых кранов в процессе опробования тормозов с локализацией перекрытого крана;</p>	<p>локализация вагона с самопроизвольно срабатывающими тормозами, чувствительными к темпу мягкости;</p> <p>- непрерывный контроль плотности и давления воздуха в тормозной магистрали (с автоматическим измерением давления в ТМ хвостового вагона и сопоставлением его нормативу);</p> <p>- обнаружение замедленного отпуска воздухораспределителей одного или нескольких вагонов;</p> <p>- автоматическая проверка целостности тормозной магистрали с выдачей результатов в компьютер на этапе зарядки тормозной сети и при продувке ТМ открыванием концевого крана хвостового вагона;</p> <p>- автоматическая оценка заужения тормозной магистрали (с локализацией места заужения или пробки в ТМ);</p> <p>- автоматическое определение факта перекрытия концевых кранов в процессе опробования тормозов (с локализацией местонахождения перекрытого</p>
--	---	---

<p>- проверка автоматических тормозов на торможение ступенями;</p> <p>- проверка автоматических тормозов на отпуск зарядным давлением;</p> <p>- регистрация хода опробования и параметров тормозных процессов в составе;</p> <p>- формирование и сохранение в электронном виде отчетов по обработке тормозов поезда, справок ВУ-45, суточных отчетов;</p>	<p>- торможение;</p> <p>- отпуск тормозов (при значительном числе осей в составе возможно применение ускоренног о отпуска);</p> <p>- формирование справки формы ВУ-45 с автоматическим подсчётом требуемого и фактического нажатия тормозных колодок на основании введённой машинистом информации о составе (вес состава и число гружённых/порожних вагонов).</p>	<p>крана ТМ);</p> <p>- проверка автоматических тормозов на торможение (с автоматическим контролем окончания процесса торможения);</p> <p>- проверка автоматических тормозов на отпуск зарядным давлением (при значительном числе осей в составе возможно применение ускоренного отпуска) с автоматическим контролем окончания процесса отпуска;</p> <p>- регистрация хода опробования автоматических тормозов и параметров тормозных процессов в составе (в памяти МПСУ);</p> <p>- формирование и сохранение в электронном виде (в памяти МПСУ) справок формы ВУ-45 с автоматическим подсчётом требуемого и фактического нажатия тормозных колодок на основании введённой машинистом информации о составе (масса и количество осей состава, число гружёных / порожних вагонов, другие необходимые данные), отчетов по обработке тормозов поезда.</p>
---	---	--

Как это можно увидеть из таблицы 1, система АСДТ, согласно [2],

обладает более полным набором функций по диагностике технического состояния тормозного оборудования вагонов по сравнению с системой УЗОТ-РМ. Поэтому обобщенный перечень функций в объеме предлагаемой модернизации МПСУ/крана № 130 определен на основе именно системы АСДТ (с учетом отдельных функций УЗОТ-РМ, которыми система АСДТ не обладает). Однако ряд функций системы АСДТ (рисунок 1) связан с использованием мобильного измерителя давления в тормозной магистрали хвостового вагона (рисунок 2) и передачей данных по радиоканалу через модем на персональный компьютер оператора ПТО вагонов при диагностике технического состояния и полном опробовании тормозов поезда в системе АСДТ. Мобильный измеритель устанавливается осмотрщиком вагонов на соединительный рукав хвостового вагона, после чего производится автоматическое измерение давления сжатого воздуха в тормозной магистрали в ходе технического обслуживания поезда до окончания полного опробования автоматических тормозов (с занесением в электронный файл справки ВУ-45).

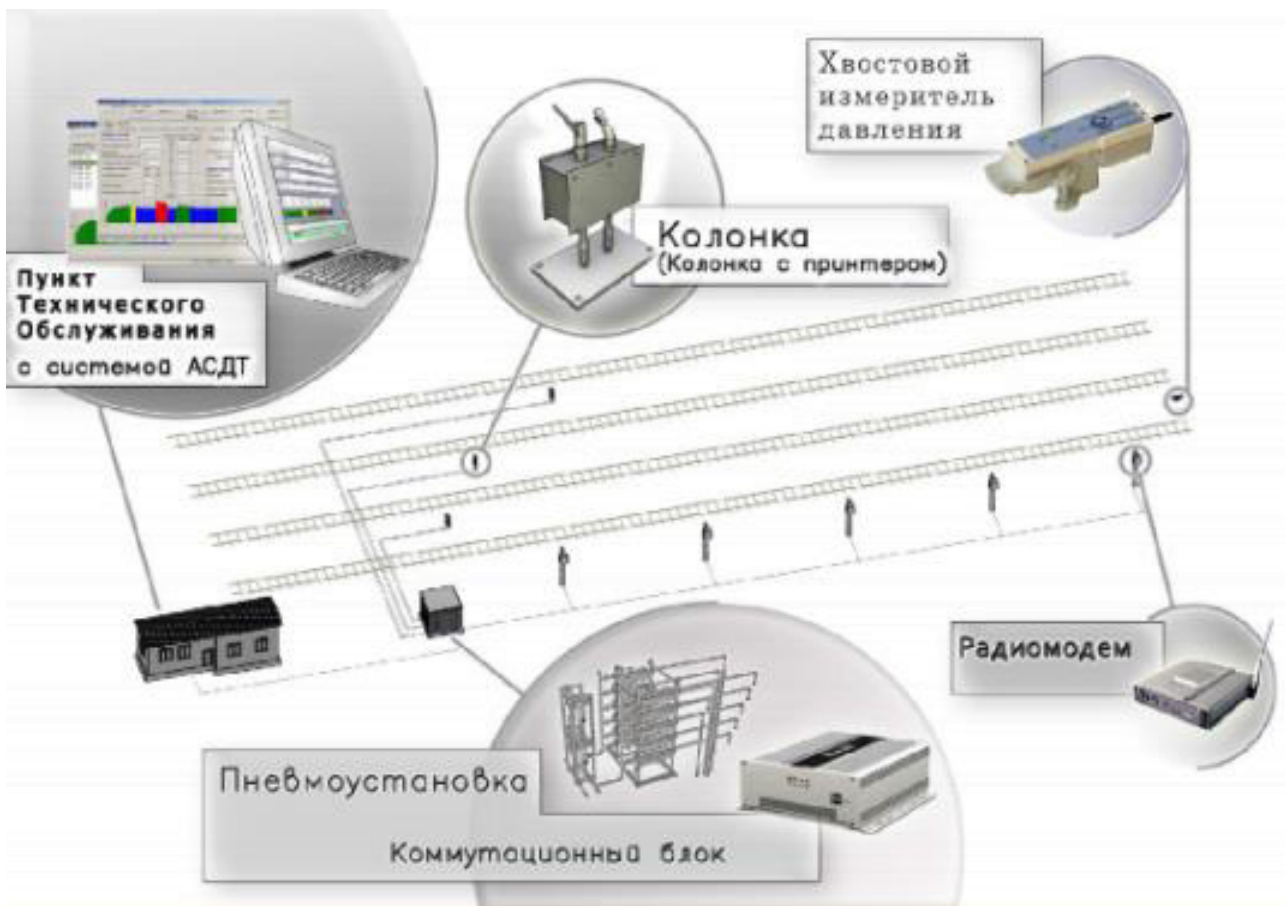


Рисунок 1 – Состав системы АСДТ.

Кнопки выбора номера пути

Кнопка включения



Индикатор наличия связи с системой

(зеленый мигающий – есть связь с системой,
красный мигающий – нет связи с системой)

Фиксатор на головке

соединительного рукава ТМ

Рисунок 2 – Мобильный измеритель давления в тормозной магистрали
хвостового вагона

Поэтому, вероятно, потребуется использовать подобный мобильный измеритель давления в тормозной магистрали хвостового вагона для технической диагностики с полным (сокращенным) опробованием автоматических тормозов поезда, в том числе и при отсутствии на ПТО вагонов системы АСДТ. При этом для сохранения набора необходимых функций (согласно графы 3 таблицы 1) необходимо будет совместить работу мобильного измерителя давления в тормозной магистрали хвостового вагона с работой МПСУ локомотива через радиомодем системы РУТП (которой современные грузовые электровозы из числа указанных выше также в большинстве своем оборудованы).

Кроме мобильных измерителей, в системе АСДТ также используются стационарные измерители давления сжатого воздуха в тормозной магистрали состава, которые встроены в питающие колонки на междупутьях для подключения обрабатываемых составов (рисунок 3):



Рисунок 3 – Питающая колонка со стационарным измерителем давления в головной части состава

Стационарные и мобильные измерители давления сжатого воздуха в системе АСДТ предназначены для наиболее точной и эффективной реализации режимов проверки целостности тормозной магистрали, контроля её зарядки. Они используются во всех режимах для автоматического измерения и обработки сигналов давления сжатого воздуха в головной и хвостовой частях тормозной магистрали состава. На основе автоматического измерения и обработки сигналов давления сжатого воздуха производится диагностика тормозов состава, в том числе при локализации вагона с самопроизвольно срабатывающими тормозами. Очевидно, что данные функции потребуются реализовать в конструкции МПСУ локомотива и крана № 130.

Кроме того, система АСДТ обеспечивает:

1. Высокую производительность пневматического оборудования системы (вследствие чего быстрее производится зарядка тормозной сети).
2. Сокращение временных затрат на зарядку, торможение, отпуск тормозов состава (что достигается за счёт автоматического контроля окончания указанных процессов, а также позволяет повысить достоверность дальнейших этапов опробования и диагностики тормозов).
3. Дистанционное изменение темпов снижения и нарастания давления в тормозной магистрали (что позволяет осуществлять «провоцирование» чувствительных воздухораспределителей на самопроизвольное торможение за счёт ужесточения темпа мягкости).
4. Высокую точность задания давлений в тормозной магистрали и темпов их изменения (что повышает достоверность результатов диагностики).

5. Наличие встроенных измерителей расхода воздуха позволяет оценивать плотность тормозной магистрали состава без использования способа ее оценки по времени снижения давления сжатого воздуха в главных резервуарах локомотива.

Понятно, что, за исключением п.1, остальные указанные функции по п. 2...5 будет необходимо реализовать в ходе модернизации МПСУ локомотива и крана № 130. В результате произведенной модернизации МПСУ локомотива с краном № 130 должны обеспечивать выполнение следующих параметров (дополнительно к установленным требованиям [3]):

- завышение давления в тормозной магистрали состава от установленного зарядного при ускоренной зарядке, кгс/кв. см - 1,0;

- завышение давления в тормозной магистрали состава от установленного зарядного, при котором выключается ускоренная зарядка и производится ликвидация сверхзарядного давления, кгс/кв. см - 0,3;

- снижение давления в тормозной магистрали состава от установленного зарядного, при котором включается ускоренная зарядка, кгс/кв. см - 0,3;

- величина снижения давления в главных резервуарах локомотива перед контролем плотности тормозной сети состава, кгс/кв. см – 0,4...0,5;

- время понижения давления в задающем пневмоблоке с 5,0 до 4,0 кгс/кв. см (темп служебного торможения), с – 4...6;

- время повышения давления в задающем пневмоблоке с 0,35 до 0,5 МПа (темп отпуска), не более, с – 5.

В общем виде технологический процесс опробования тормозов и их диагностики, осуществляемый с использованием модернизированных МПСУ/крана № 130 современного локомотива, сводится к выполнению следующих операций в определённой последовательности и с соответствующими параметрами:

- зарядка тормозной магистрали до заданного давления указанным темпом;

- снижение давление в тормозной магистрали до заданной величины указанным темпом;

- измерение давления в головной и хвостовой частях состава;

- измерение темпа изменения давления в головной и хвостовой частях состава;

- регистрация времён изменения давления;

- регистрация времени начала и окончания режимов;

- синхронизация локомотивного и мобильного измерительных устройств;
- диагностика технического состояния тормозов (поиск воздухораспределителя, чувствительного к самопроизвольному торможению, обнаружение замедленного отпуска воздухораспределителей, обнаружение заужения и пробки в тормозной магистрали, перекрытие чётного и нечетного концевых кранов);
- расчет справки формы ВУ-45 в электронном виде;
- формирование отчета по обработке тормозов поезда в электронном виде.

Обеспечение указанных операций возлагается на модернизированные узлы МПСУ и крана № 130. Необходимо отметить, что в ходе проведения данных операций машинисту локомотива будет необходимо выполнять, дополнительно к своим должностным обязанностям, еще и некоторые обязанности оператора ПТО вагонов по обслуживанию и опробованию тормозов в поездах (что требует внесения соответствующих изменений и дополнений в нормативные документы).

Выводы:

1. Внедрение вышеуказанной модернизации крана № 130 и микропроцессорной системы управления локомотивом с доработкой их до полного набора функций автоматизированной системы диагностики тормозов «АСДТ» позволит выполнять полное опробование тормозов в грузовых поездах как на участковых, так и на промежуточных станциях с диагностикой технического состояния автотормозов и выявлением их неисправностей.

2. Наличие на локомотивах крана дистанционного управления тормозами № 130 и системы микропроцессорного управления, доработанных до полного набора функций автоматизированной системы диагностики тормозов «АСДТ», дает машинисту возможность непрерывного мониторинга технического состояния автоматических тормозов поезда в пути следования, что позволяет обеспечить безопасность движения и значительно повысить эффективность перевозок.

Список литературы:

1. ООО «АГРОЭЛ». АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТОРМОЗОВ ГРУЗОВЫХ СОСТАВОВ «АСДТ». Руководство по эксплуатации АЭК78.00.000 РЭ. 2008.
2. ОАО «УЗЖМ». ЭЛЕКТРОВОЗ ПОСТОЯННОГО ТОКА 2ЭС6 С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ. Руководство по эксплуатации 2ЭС6.00.000.000 РЭ. 2008.

3. Правила технического обслуживания и управления тормозами железнодорожного подвижного состава, утв. Советом по железнодорожному транспорту государств - участников Содружества (протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.

Доцент, зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», кандидат

технических наук, доцент

тел.: 8-913-628-78-87.

E-Mail: vklyuka@mail.ru

Мосол Сергей Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.

Инженер, старший преподаватель кафедры
«Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС

Тел.: 8-913-613-08-01.

E-Mail: bam1979-2005@yandex.ru

Курманов Аслан Мухамеджанович

Эксплуатационное локомотивное депо Омск
Западно – Сибирской дирекции тяги -

филиала Дирекции тяги ОАО «РЖД»
Леконта 28, г.Омск, 644121,

Российская Федерация.

И.о. заместителя начальника депо по
эксплуатации.

Тел.: 8-923-047-07-27.

E-Mail: aslan-kurmanov777@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klyuka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian

Federation.

Associate Professor, Head of the Department
«Cars and wagon farm», candidate technical
sciences.

Phone: 8-913-628-78-87.

E-Mail: vklyuka@mail.ru

Mosol Sergey Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian

Federation.

Engineer, Senior Lecturer of the Department
«Wagons and wagon economy» OSTU.

Phone: 8-913-613-08-01.

E-Mail: bam1979-2005@yandex.ru

Kurmanov Aslan Muhamedzhanovich

Operational locomotive depot Omsk of the
West Siberian Traction Directorate of the branch
of the Traction Directorate of JSC «Russian
Railways».

st. Leconte 28, Omsk, 644121,
Russian Federation.

Acting deputy head of the depot for operation.

Phone: 8-923-047-07-27.

E-Mail: aslan-kurmanov777@yandex.ru

Научное издание

«ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ И ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ»

Материалы четвертой всероссийской
научно-технической конференции
(22 октября 2021 г.)

Ответственный за выпуск К. И. Доманов

* * *

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 25.10.2021. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Плоская печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,33 Уч.-изд. л. 7,84.
Тираж 300 экз. Заказ

* *

Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35