

ВНТВ

Воронежский научно-технический вестник
3 (45) сентябрь 2023



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Сухочев Г.А., Грымзин А.Ю.

Повышение технологичности обработки цельнолитых турбин с учетом конструктивно-технологических признаков 3

Сухочев Г.А., Подгорнов С.Н.

Подготовка поверхностей из различных материалов комбинированными методами для обеспечения качества сборок нежестких оболочек 19

Плахотин А. А., Кадырметов А. М., Попов Д.А.

Упрочнение изнашиваемых поверхностей деталей лесных машин плазменным нанесением и упрочнением покрытий переменного состава 34

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Лебедев В.А., Штынь С.Ю., Кукаркин И.Д.

Исследования адгезионной прочности вибрационных механохимических покрытий и их влияние на коррозионную стойкость деталей 48

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Печатнова Е.В., Новиков И.А., Кирюшин И.И., Шаталов Е.В.

Влияние периода суток на риск возникновения наезда на пешехода 60

Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С, Тимакина А.А., Комаров Я.В.

Основные аспекты и проблематика при построении транспортной модели 67

Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С, Тимакина А.А., Ключникова И.Д.

Обоснование методики проведения исследования интенсивности транспортных потоков 77

Лелиовский К.Я., Молев Ю.И.

Определение на стенде вибрационных характеристик функционирования подшипников коробок передач и влияния на них эксплуатационных дефектов 87

Попиков П.И., Четверикова И.В., Усков А.И., Мироненко Д.А., Пономарев П.И.

Совершенствование механизма подъема стрелы манипулятора автосортиментовоза 98

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-3-18



УДК 621

UDC 621

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОЛИТЫХ ТУРБИН С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

INCREASING THE TECHNOLOGICAL PROCESSING OF WHOLE-LIT TURBINES, TAKING INTO ACCOUNT CONSTRUCTIVE TECHNOLOGICAL FEATURES

✉¹ Сухочев Геннадий Алексеевич, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

✉¹ Sukhochev Gennady Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Грымзин Андрей Юрьевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: sask222@mail.ru

Grymzin Andrey Yurievich, Postgraduate student of the Department "Technology of Machine Building", Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: sask222@mail.ru

Аннотация. Объектами исследования в данной работе являются комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей межлопаточного канала цельных литых турбин с кривизной второго порядка и закруткой по радиусу, для повышения их технологичности и достижения заданных конструктивных параметров.

Annotation. The objects of study in this work are complex technological processes of combined finishing and hardening treatment of the surfaces of the interblade channel of solid cast turbines with a second-order curvature and a twist along the radius, to improve their manufacturability and achieve the specified design parameters.

Ключевые слова: МЕЖЛОПАТОЧНЫЙ КАНАЛ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ, ТУРБИНА, НАКЛЕП, ШЕРОХОВАТОСТЬ.

Keywords: INTERBLADE CHANNEL, MANUFACTURABILITY, TURBINE, HARDENING, ROUGHNESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Лопаточные детали, типовыми представителями которых являются цельные колеса турбин, входят в конструкцию основных видов энергетических машин, двигательных установок авиационно-космической техники и других базовых отраслей машиностроения. Высокая степень сложности пространственной конструкции лопаток, жесткие режимы эксплуатации и постоянно обновляющаяся номенклатура изделий накладывают ограничения на стандартизацию и унификацию конструктивных элементов турбин. Поэтому отработка на технологичность таких деталей смещается в сторону улучшения производственно-технологических показателей по материалоемкости и трудоемкости изготовления. Наиболее нетехнологичны турбины закрытого типа с неразъ-

емным бандажом, имеющие криволинейные участки сужающихся или расходящихся стенок межлопаточного пространства [1]. В этом случае каналы не имеют сквозного просвета и получение заготовок турбин технологически большей частью ограничено методами литья в оболочковые формы с последующей высокотемпературной газостатической обработкой. Межлопаточные пространства в заготовках формируются литейными формами в условиях трудно прогнозируемой кристаллизации жаропрочных сплавов и усадочных явлений, способствующих образованию корок с трещинами и пористостью. Такие заготовки передают на последующие операции технологии изготовления наследованный поверхностный слой на лопатках с недопустимыми для эксплуатации дефектами. Широко известные отечественные научные школы (ИМАШ РАН, НИАТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГАУ им. С.П. Королёва, г. Самара, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, ВГТУ г. Воронеж и др.) для обработки литых поверхностей отдают предпочтение традиционным эффективным, но непроизводительным вибротехнологиям [2]. Попытки применения традиционной дробеструйной обработки приводили к повреждению тонких кромок лопаток. В технологически «закрытых» зонах межлопаточного пространства, где все известные технологии неэффективны, практикуется ручная неравномерная и трудоемкая зачистка. Большой частью технологически наследованные дефекты литья полностью не устраняют и после дополнительной трудоемкой доводки и нескольких длительных параметрических испытаний с переборками агрегатов изделия допускают до эксплуатации [3]. Это снижает уровень прогнозируемой разработчиком технологичности в разы. Применительно к новым изделиям ситуация с механизированными технологиями отделки и упрочнения межлопаточных поверхностей изделий по степени научного обоснования и оснащённости не обеспечивает требуемых параметров качества и не способствует повышению их производственной технологичности. Остаются актуальными задачи теоретического описания оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности межлопаточного пространства при минимизации затрат. Решение этого научно-технического вопроса предлагается на основе обоснованной методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств и режимов формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам. Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и научным направлением ВГТУ в рамках ГБ НИР № 2018.15 «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения». Целью работы является разработка теоретических основ и методики оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей выбором средств формообразования поверхностей межлопаточных каналов по конструктивно-технологическим признакам.

Задачи исследования:

1. Разработать теоретические основы процесса выбора оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки цельных литых турбин для формирования требуемого физико-механического состояния поверхности межлопаточного пространства при минимизации затрат и заданном уровне качества.

2. Исследовать физическую модель технологической системы последовательного применения различных методов упрочняющих и отделочных воздействий на одной и той же лопатке, исходя из отличия конструкционного строения отдельных участков межлопаточного канала, сформированного литьем.

3. Установить область влияния технологических параметров и режимов процесса комплексного последовательного воздействия различных методов обработки на стабильность показателей качества согласно технической документации.

4. По результатам экспериментальных сравнительных исследований процессов снижения шероховатости и упрочнения установить максимально производительные технологические операции обработки для участков межлопаточных каналов, значительно различающихся по конструктивно-технологическим признакам.

5. Сформулировать регламент выбора наиболее технологичных отделочно-упрочняющих операций комбинированного технологического процесса обработки лопаток в соответствии с особенностями геометрии криволинейных каналов и требований к качеству их обработки в цельных литых турбинах.

6. Научно обосновать и предложить комплексный производительный технологический процесс комбинированной обработки узких межлопаточных криволинейных каналов цельных турбин с патентованием основных технических решений.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности лопаточных деталей путем выбора по конструктивно-технологическим признакам средств формообразования каналов цельных турбин [4, 5]. Результаты исследований дополняют достигнутый задел в области научно обоснованных методов и средств повышения производственной технологичности при изготовлении лопаточных деталей высокой конструктивно-технологической сложности.

2 Материалы и методы

Объектами исследования являлись комплексные технологические процессы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей межлопаточного канала цельных литых турбин с кривизной второго порядка и закруткой по радиусу.

Методы исследования. Исследования теоретической направленности основаны на научной базе технологии машиностроения, технологии физико-технической обработки, технической механики, математико-физического моделирования на современных программных продуктах. Экспериментальные исследования проводились на специализированном оборудовании и приборах с высокой точностью измерений, с планированием экспериментальных работ по методикам оценки эффективности технологического процесса упрочнения, разработанной автором.

Предметом исследования явился механизм взаимного влияния параметров технологической схемы обработки с направленными комбинированными воздействиями в условиях разной степени доступности обрабатываемых криволинейных поверхностей межлопаточного пространства, а также проблемно-ориентированное повышение технологичности производства с учетом конструкции цельных турбин.

Достоверность результатов определяется конкретностью в выборе задач, проведением расчетов по научно обоснованным зависимостям, корректностью в применении математического моделирования, тщательным анализом результатов эксперимента, подтверждением сходности и достаточным соответствием теоретических разработок с данными эксперимента.

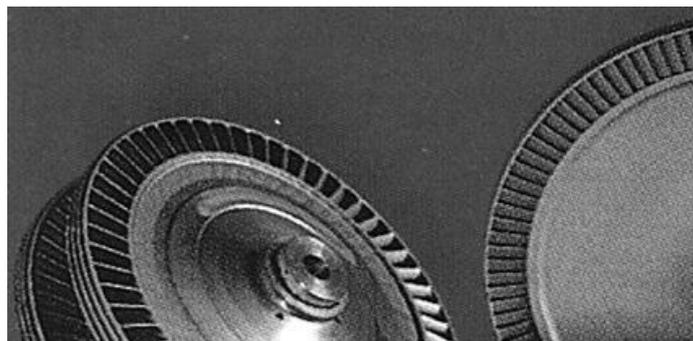
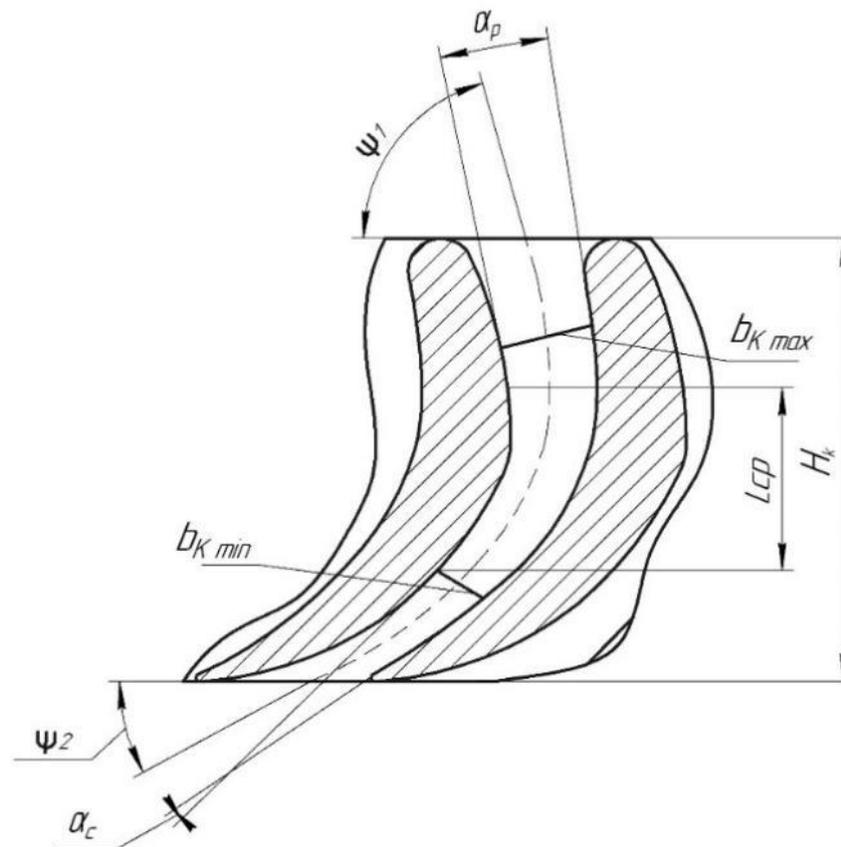


Рисунок 1 – Фрагменты турбины с цельным бандажом и ее заготовки

3 Результаты исследований

Исходные положения, гипотезы:

1. Межлопаточный канал цельной литой турбины, исходя из возможности подвода обрабатывающего инструмента, по уровню снижения технологичности можно условно разделить на три части в следующей последовательности: входной (1), выходной (2) и срединный (3), где в наиболее труднодоступных сечениях значения угла между касательными к стенкам канала и радиальной плоскости детали на входе и выходе канала, обозначенный как угол раскрытия Ψ_i , составляет от 20° до 70° (рис. 2).



$b_{k\ min}$ и $b_{k\ max}$ – минимальная и максимальная ширина; α_c , α_p – углы сужения и расширения относительно центральной зоны канала; Ψ_1 и Ψ_2 – углы наклона продольной оси межлопаточной полости к радиальной плоскости детали на входе и выходе канала;
 $\Delta\Psi_{max}$ – наибольший угол искривления продольной оси; H_k – глубина канала

Рисунок 2 – Схема межлопаточного пространства цельной турбины в продольном сечении

2. Упрочненное состояние по всей поверхности межлопаточного пространства, выраженное через степень наклепа, возможно обеспечивать равномерно, регулируя энергетические составляющие деформационных процессов при различных технологических схемах подачи обрабатывающей среды (потока сферических инденторов) в канал цельной турбины.

3. Механическое ударное воздействие на лопатки придает во время деформации материалу эффект уплотнения по глубине. Основными технологическими факторами, влияющими на пока-

затели упрочнения являются скорость соударения и угол встречи потока инструмента с поверхностью; формирование шероховатости в большей степени зависит от размеров отпечатков при ударе и их плотности на единицу площади обработки [6].

4. Ожидается, что после реализации основных операций комплексной технологии обработки трех условных частей канала (входного, выходного и срединного) по различным технологическим схемам (гранулами, дробью, шариками разной формы и, из различных материалов, фазовых составов и фракций) возможно появление на узких полосках переходных участков мест избыточного наклепа и шелушения.

5. Привлечение смеси сжатого воздуха со слабопроводящей жидкостью и потока гранул (шариков), диспергирующей газожидкостную среду в состояние капельной фракции, обеспечивает минимально необходимой энергией процессы микросоударения микрошариков с вершинами микровыступов на значениях, способствующих выравниванию микрогеометрии на переходных участках.

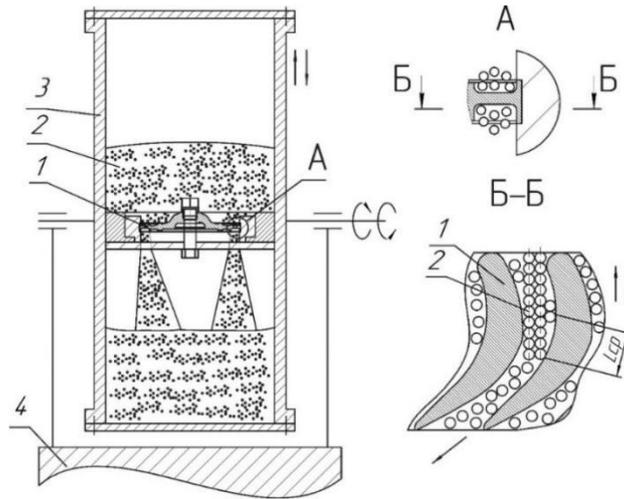
6. Малая энергия потока гранул с токопроводящей жидкостью, разбиваемой сжатым воздухом до фракции в 0,5-0,8 мм за счет параллельного отскока от стенок позволяет им проникать, с несколько убывающей степенью воздействия, вглубь канала и распространять эффект комбинированного выравнивания вершин выступов микрорельефа в местах перехода деформационных ударных воздействий на границах участков с различным исходным и текущим состоянием по обрабатываемости [7]. На решение поставленных задач направлен проект комплексного технологического процесса, основанного на проблемно-ориентированных конструктивно-технологических решениях. Сквозной маршрут обработки каналов включает взаимно влияющие технологические операции, которые схематично показаны на рисунках 3 и 4.

Экспериментальные исследования:

Проведение предварительного эксперимента для апробации выбранного технологического решения реализовано на типовой цельнолитой турбине с $b_{к\ min}$ в 5,3 мм [8]. На первой операции проводилась виброударная обработка (рис. 3) под действием вибрации частотой 20-24 Гц при амплитуде колебаний около 4 мм. Инструментом служил насыпной объем двухмиллиметровых закаленных стальных шариков (рис. 4). В процессе обработки обеспечивалось циклическое перемещение шариков вдоль оси межлопаточного пространства путем экструдирования их насыпного объема под действием вибрации и силы тяжести сквозь каналы турбины в обоих направлениях. Направление перемещения менялось за счет периодического вертикального переворота корпуса экспериментального устройства. Обработка в направлении схождения (расхождения) стенок канала, выполнялась по 30 мин., штучное время обработки одной турбины составляло 80 мин. На второй операции поток дроби подавался на входные и выходные части канала (рис. 5) одновременно в устройстве с двумя сопловыми аппаратами (рис. 6). Операция дробеструйной обработки проводилась по штатной технологии подачей потоком сжатого воздуха давлением до 0,6 МПа дробью диаметром 1,6-2,2 мм со скоростью 60 м/с. Угол наклона потока к обрабатываемой поверхности 60-90°, общее машинное время обработки лопаток турбины составило 9 мин. Предварительный эксперимент показал следующее (рис. 7):

- глубина наклепа на срединных участках межлопаточного канала, ограниченного примерно сечениями в точках b_{\min} и b_{\max} , составила 0,04-0,06 мм, шероховатость 0,8-1,2 мкм;
- глубина наклепа на входных и выходных участках канала до сечений b_{\min} и b_{\max} , составила 0,2-0,3 мм с явлениями сдвига и перенаклепа, шероховатость 1,4-1,7 мкм;
- глубина наклепа на переходных участках межлопаточного канала, за сечениями b_{\min} и b_{\max} до середины канала, составила 0,05-0,16 мм, шероховатость 0,9-1,6 мкм.

Анализ результатов эксперимента определил характер исследований в направлении поиска оптимальных энергетических составляющих процесса обработки всего профиля канала с сокращением трудоемкости за счет выбора средств технологического оснащения и режимов в соответствии с конструктивно-технологическими особенностями цельнолитой турбины [9].



1 – турбина, 2 – насыпной объем шариков, 3 – контейнер, 4 – вибростенд

Рисунок 3 – Схема обработки каналов турбины виброударным методом

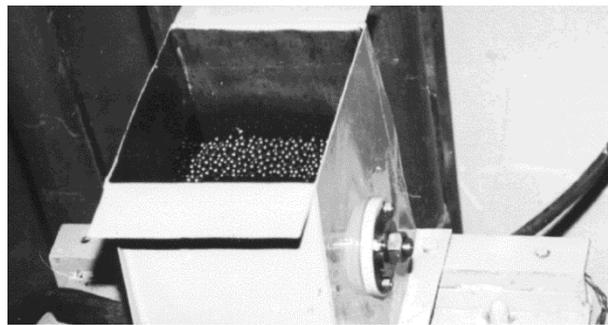
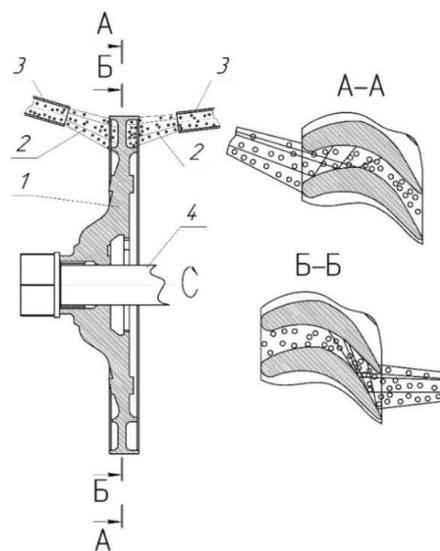


Рисунок 4 – Вибростенд с насыпным объемом шариков



1 – турбина, 2 – поток шариков, 3 – сопло, 4 – вал дробеструйного устройства

Рисунок 5 – Схема обработки каналов турбины дробеударным методом

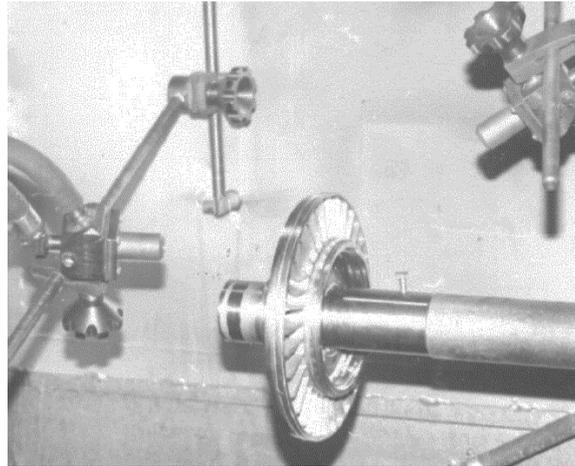
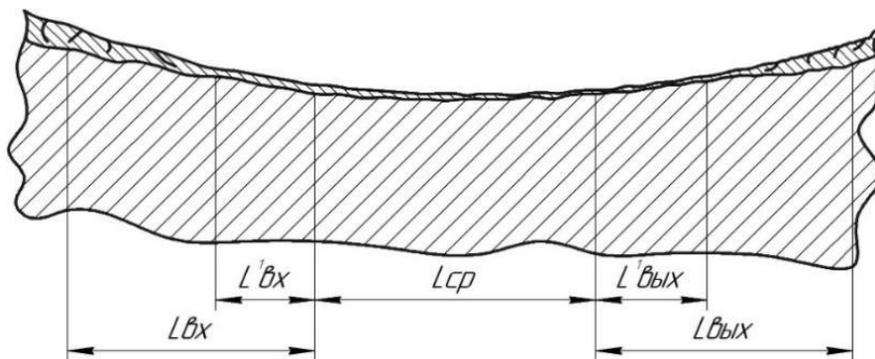


Рисунок 6 – Технологическая наладка обработки двумя сопловыми аппаратами



$L_{ср}$ – поверхность, упрочненная преимущественно виброударным методом; $L_{вх}$ и $L_{вых}$ – участки поверхности, упрочненные преимущественно дробью, с технологическими дефектами; $L'_{вх}$ и $L'_{вых}$ – зоны нестабильного наклепа после совместного упрочнения указанными способами; верхний слой – наклепанный слой материала

Рисунок 7 – Характер распределения наклепанного слоя материала по сечению канала после обработки шариками различными методами

Далее исследования проводились на основе выдвинутых гипотез, механизма равномерной обработки всей поверхности межлопаточного пространства с кривизной второго порядка, в котором воздействия различных методов и инструментов рассматриваются как обобщенный комплексный процесс формирования требуемых стабильных показателей технологической системы применительно к цельнолитой турбине. В целом проблема повышения технологичности при обеспечении равномерной обработки каналов в цельной турбине заключается в том, что перенаклеп, неравномерная шероховатость и несплошность обработки появляются на поверхности в местах взаимного перекрытия участков воздействия различных методов поверхностного пластического деформирования (рис. 8) из-за несовпадения энергий струйных и вибрационных ударов сфероидных инденторов (шариков). Это показало, что требуется дополнительное трудоемкое устранение дефектов и при этом неравномерность физико-механического состояния материала на поверхности не гарантируется [10]. Для производительного выравнивания физико-механического состояния поверхностного слоя на лопатках цельнолитой турбины необходимо учитывать:

- одинаковые по размерам шарики воздействуют на поверхность с различной по значению энергией вследствие различной скорости контактирования и угла соударения, исходя из конструктивно-технологических особенностей турбины;

- обеспечить равномерный наклеп по всему профилю канала возможно при поддержании одинаковых значений усилия контактирования шаров с поверхностью лопатки за счет выбора режимов обработки по различным технологическим схемам, но с соизмеримыми энергетическими возможностями;

- при наложении низковольтного напряжения вода в газожидкостной среде со стальными шарами, обладая устойчивой слабой проводимостью, будет способствовать выравниванию микрорельефа, ускоренно растворяя вершины микровыступов, образовавшихся при пластическом деформировании поверхности.

Результаты предварительного эксперимента показали результаты формального технологического использования предполагаемых средств обработки. Так на рис. 8 показаны контрольные пластины после виброобработки и обработки дробью. Обработка дробью показала резкое увеличение пластических отпечатков со сдвигом материала по углу подачи потока дроби.

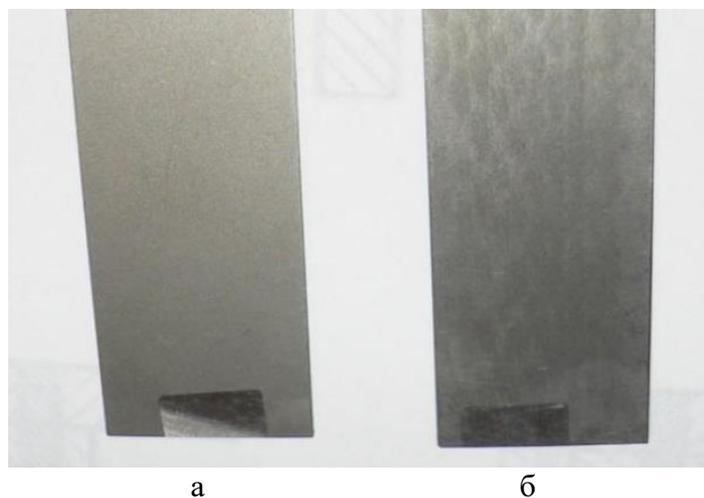


Рисунок 8 – Пластины после виброобработки (а) и обработки интенсивным потоком дроби (б)

Налицо энергетическое несоответствие этих видов воздействий, которое необходимо упорядочивать. Учитывая, что характер виброударной обработки в узком канале технологически отличается от классической вибротехнологии, кинетическая энергия $E_{квш}$ шарика в срединной части для s соударений со стенками в ограниченном пространстве [11] составляет:

$$E_{квш} = m_{ш}(V_{вш}^2/2 + N_y B_p g) \cos \Psi, \quad (1)$$

где $V_{вш}$ – виброскорость шарика при единичном соударении, $V_{вш} = A_{вк} \cdot \pi \cdot f_{вк} / 5$; $A_{вк}$ – амплитуда колебаний (перемещений под действием вибрации); $f_{вк}$ – частота виброколебаний в технологической системе; $m_{ш}$ – масса одного шарика, $m_{ш} = \rho_{ш} \cdot D_{ш}^3 / 6$; $\rho_{ш}$ – плотность металла используемых шариков (дроби); N_y – среднее количество шариков, образующих вертикальный ряд по ширине бандажа турбины без учета вышерасположенного насыпного объема; B_p – число вертикальных рядов шариков по сечению срединного участка, $B_p = (b_{кmin} + b_{кmax}) / 2D_{ш}$; g – ускорение свободного падения; $D_{ш}$ – диаметр шарика; Ψ – усредненный угол искривления оси канала (для входного участка $\Psi_{вх}$, для выходного – $\Psi_{вых}$).

Уравнение кинетической энергии для потокового шарика $E_{кпш}$ на входном (выходном) участке канала для случая соударений под действием потока дроби определится выражением:

$$E_{KIII} = 0,5m_D(V_D \cdot \cos \alpha_{II} + K_{\sin \psi} \cdot V_o \cdot \cos \alpha_o), \quad (2)$$

где V_D – скорость единичного шарика (дробин) при соударении; V_o – скорость отскока от противоположной стенки канала (около 28-30 % от V_D); m_D – масса одного шарика (дробины); $K_{\sin \psi}$ – коэффициент, учитывающий ослабление удара от отскока по глубине канала из-за кривизны (на периферии ≈ 1 , на срединном участке равен 0,95-0,8); β_{II} – угол падения дробин на поверхность (90-60°); β_o – угол отскока дробин от стенки (60-90°), т. е. соизмерим с β_{II} .

Уравнение баланса кинетической энергии при обработке всего канала составлено исходя из уравнивания виброударного и струйно-ударного воздействий, основным ограничением которого является примерное равенство размеров пластических отпечатков на поверхности лопатки, что формирует соизмеримые величины шероховатости и глубины наклепа [12]. Поэтому, после приведения фракций шариков и дробин к одному типоразмеру D_{III} с одинаковой массой m_{III} получаем:

$$E_{K_{III}} = E_{K_{III}};$$

$$m_{III}(V_{BIII}^2 / 2 + N_y B_p g) \cos \psi = 0,5m_D(V_D^2 \cos \alpha_{II} + K_{\sin \psi} 0,3V_D \cos \alpha_o). \quad (3)$$

После преобразований получаем выражение расчетной скорости дробин, соотнесенной с установленными режимами виброобработки и геометрией канала:

$$V_D = \frac{A_{вк} \pi f_{вк}}{5} \sqrt{\frac{\cos \psi}{(1 + 0,3K_{\sin \psi}) \cos \alpha}} \left(1 + \sqrt{\frac{N_y b_k g}{2D_{III}}} \right). \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что для обеспечения равномерности обработки на стыке воздействий различными методами поверхностно-пластической деформации (ППД) определяющее значение при выборе режимов имеет геометрия канала и технологические возможности обработки его срединной части. Первенство виброударных режимов перед дробеструйными определено тем, что технологические параметры виброобработки могут быть рассчитаны и являются управляемыми.

Скорость потока дробин для оценки интенсивности обработки можно рассчитать по формуле:

$$V_D = V_{сж} 0,8 \sqrt{K_\rho \frac{B}{D_{III}}}, \quad (5)$$

где $V_{сж}$ – скорость потока сжатого воздуха; K_ρ – коэффициент соотношения плотностей, $K_\rho = \rho_{сж} / \rho_{III}$; $\rho_{сж}$ – плотность сжатого воздуха в потоке; B – усредненное значение расстояния от сопла до лопатки. Тогда расчет скорости потока можно регулировать, с учетом (4) и (5)

$$V_{сж} = \frac{A_{вк} \pi f_{вк}}{4} \sqrt{\frac{D_{III} \cos \psi}{(1 + 0,3K_{\sin \psi}) K_\rho B \cos \alpha}} \left(1 + \sqrt{\frac{N_y b_k g}{2D_{III}}} \right). \quad (6)$$

Уточняя известные формулы, можем спрогнозировать глубину упрочнения H_y :
- для расширяющейся части канала:

$$H_{yp} = \sqrt{\frac{m_{ш} \cdot V_d \sin \beta_n \cdot \cos \beta_0}{2\sigma_T t_1}} K_{\sin\psi} K_{\alpha_p}; \quad (7)$$

- для сужающейся части канала:

$$H_{yc} = \sqrt{\frac{m_{ш} \cdot V_d \sin \beta_n \cdot \cos \beta_0}{2\sigma_T t_1}} K_{\sin\psi} K_{\alpha_c}, \quad (8)$$

где β_{II} – угол падения дроби на поверхность лопатки (90-60°); β_0 – угол отскока дроби от стенки канала (60-90°), т. е. реально соизмерим с β_{II} ; K_{α_c} (K_{α_p}) – коэффициент, учитывающий влияния на усилие деформирования угла схождения (расхождения) стенок межлопаточной полости турбины от срединной части к входным и выходным кромкам лопаток, $K_{\alpha_c}=0,7-0,85$, $K_{\alpha_p}=0,9-1,0$.

Шероховатость литой обработанной поверхности характеризуется исходной, не устраняемой технологически, волнистостью и размером пластических отпечатков. Прогнозные расчеты в данном случае слишком сложны и недостоверны. Окончательно подтвердить достижимые параметры обработки можно методом направленного контроля наклепа и шероховатости плоскостей настроечных образцов типа пластин Альмена, фиксирующих своим прогибом полученную степень наклепа. Для выравнивания шероховатости по профилю канала приходим к использованию эффекта анодного растворения материала лопатки [13]. Основным технологическим параметром производительности является удельный расход обрабатывающей среды $Q_{жс}$ при использовании жидкостно-газового проводящего потока с шариками:

$$Q_{жс} = k_{жс} F_{п} V_{сжс}, \quad (9)$$

где $k_{жс}$ – коэффициент концентрации жидкостной фазы, снижающей скорость потока (0,9-0,95); $F_{п}$ – площадь сечения газожидкостного потока.

Экспериментальная проверка теоретических результатов и выбор технологических параметров комплексной обработки поверхностей лопаток цельнолитых турбин

Эксперименты по поиску и исследованию наиболее производительной и малозатратной технологии комплексной комбинированной обработки поверхностей лопаток в условиях узких каналов проводили на специализированных установках (рис. 4 и 6). При настройке режимов и технологических схем обработки использовали плоскости контрольных образцов типа пластин Альмена из закалённой высокоуглеродистой стали толщиной 1,2 мм размером 20 на 70 мм в плане. Образцы получали из стали У8А и жаропрочных литейных сплавов ЖСЗДК и ВЖЛ14 для цельных турбин с бандажом. В качестве инструмента служили стальные закаленные шарики диаметром 2 мм. Сопло струйного аппарата имело с внутреннее отверстие диаметром 12 мм. Расстояние от среза соплового насадка до обрабатываемых поверхностей составляло в среднем 250 мм. [14]. Величина стрелы прогиба контрольных пластинок являлась объективным параметром экспериментального определения эффективности поверхностного упрочнения лопаток, так как отражала достигнутую степень наклепа и уровень остаточных напряжений отрицательного направления. Степень упрочнения (наклепа) устанавливалась по снижению микротвердости от поверхности к середине толщины пластинки замера на скошенном шлифе с помощью микротвердомера. Анализ полученных в эксперименте данных (рис. 9) с целью исключения перенаклепа (рис. 7 и 8) и повышения производственной технологичности показал возможность снижения времени виброобработки каналов турбины в обоих направлениях до 50 мин, а обдувку дробью всех лопаток турбины - до 6 мин.

Окончательная обработка по выравниванию микрошероховатости (без учета волнистости) проводилась дробеструйным методом сферическими шариками описанного диаметра в 2 мм с газообразным воздушно-жидкостным потоком и наложением напряжения 5-7 В. Режимы отличаются от предыдущей операции только углом соударения шариков с поверхностью около 60° для более глубокого проникновения дроби в межлопаточное пространство. Расход жидкостной фазы среды составил 1,1–1,5 м³/мин. [15]. Выравнивающим инструментом служили сферические гранулы из жаропрочного никелевого сплава, аналогичного по составу материалу литой турбины. Необходимость этого приема состояла в исключении внедрения в поверхность лопатки углерода и прочих элементов стального закаленного шара. После обработки поверхности в течение трех минут шероховатость поверхности в канале разных турбин в партии составила 0,8-0,9 мкм с разбросом значений до 2,4 %, что показывает сходимость с расчетами и соответствует требованиям к эксплуатации (рис. 10). На рис. 11 показаны комплексно обработанные лопатки.

Обоснование режимов:

При обработке диаметр $D_{ш}$ не должен быть кратным $b_{кmin}$. Величины задаваемых показателей по наклепу и шероховатости назначаем в соответствии с требованиями разработчика:

1. С учетом принятых размеров шариков и геометрических размеров канала, назначая амплитуду и частоту колебаний, по формуле (1) рассчитаем виброскорость для обработки срединной части межлопаточной полости. Затем с учетом выражений (4) и (5) по формуле (6) находим скорость потока для дробеударной обработки входного и выходного участков.

2. Достижимые значения по наклепу проверяем по формулам (7) и (8), при необходимости корректируем скорости соударений в предварительных расчетах. Окончательно скорость потока дроби утверждаем по стреле прогиба пластинок. Объем расходуемой жидкостно-газовой среды определяем по формуле (9).

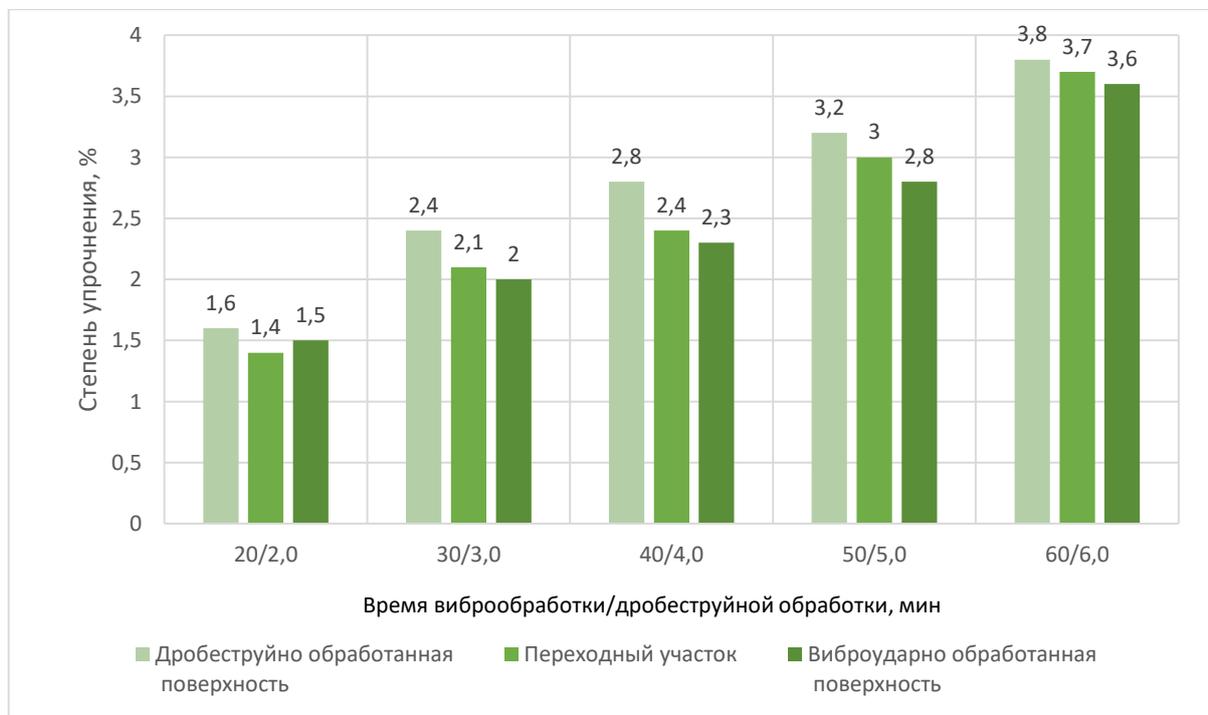


Рисунок 9 – График зависимостей степени упрочнения от времени обработки

3. Выбираем размер шариков по минимальному межлопаточному состоянию $b_{кmin}$:

$$D_{шmax} \leq 0,5b_{кmin}. \quad (10)$$

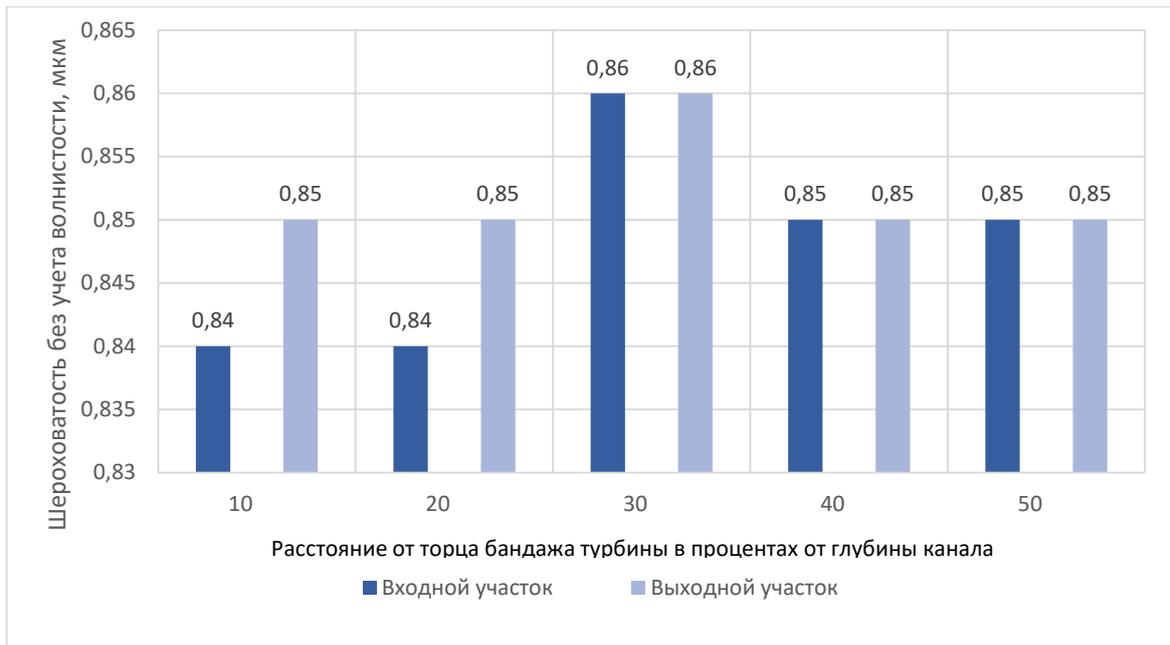


Рисунок 10 – Распределение значений шероховатости по глубине канала



Рисунок 11 – Лопатки после комплексной комбинированной обработки

4. Общее время комплексной обработки всех каналов цельнолитой турбины определяем по формуле:

$$T_{шт} = T_{пн} / n_{шт} + \frac{2100}{f_{вк}} \cdot \left[\frac{0,5\sigma_T}{(1,2 + P_K) \cdot K_{пер}} \right]^{-1} + \pi \frac{D_{лсп}}{D_p N_T} (1 + K_{эx}), \quad (11)$$

где σ_T – предел текучести металла турбины, МПа; P_K – давление в контакте, МПа; $T_{пн}$ – время настройки режимов перед обработкой партии турбин (10-20 мин); $n_{шт}$ – объем производственной партии лопаточных деталей, шт; $D_{лсп}$ – средний диаметр расположения лопатки, равен $(D_{ст} + D_{б}) / 2$, мм; $D_{ст}$ и $D_{б}$ – диаметры ступицы и бандажа литой турбины, соответственно, мм; D_p – диаметр пятна от распыливания потока по поверхности турбины, мм; N_T – число оборотов турбины при дробеструйной обработке, мин⁻¹; $K_{пер}$ – переводной коэффициент между прогибами контрольной пластинки из углеродистой стали и материала турбины (определяется экспериментально); $K_{эx}$ – уточняющий коэффициент для времени перехода обдувки дробью при электрохимическом выравнивании шероховатости по сечению канала (0,4-0,6).

Оперативный выбор оборотов турбины при обдувке дробью: $N_T = \pi D_{лср} / t_{np} D_p n_p$, где n_p – число пятен распыла укладываемых по $D_{лср}$ напротив соплового аппарата; t_{np} – время обработки одного пятна распыла (определяется экспериментально) [15].

Проектирование комплексной высокотехнологичной комбинированной обработки поверхностей межлопаточных каналов цельнолитых турбин с бандажом:

1. Проектирование технологических операций:

- обработка на технологичность конструкции каналов турбины на возможность реализации наиболее производительных методов обработки турбины с бандажом;
- для технологического оснащения операций комплексной комбинированной обработки проводят выбор из стандартного ряда или осуществляют проектирование специальной оснастки в соответствии с конструктивно-технологическими признаками межлопаточных полостей цельнолитой турбины: $b_{кmin}$, $b_{кmax}$, α_c , α_p , $\Psi_{вх}$, $\Psi_{вых}$, $V_{ВШ}$, $V_{сж}$, $\beta_{П}$, β_{O} . Если указанные углы более 45° , то для этого участка выбирается дробеударный метод, если наоборот – то виброударный;
- установление режимов для выбранных операций прибегая к базе данных конструкторско-технологических решений по обработке каналов цельнолитых турбин;
- аттестация готовности, проверка штатного функционирования оборудования;
- корректировка расчетных технологических режимов после обработки контрольных настроенных пластин на спецоснастке, имитирующей условия в канале;
- контроль полученных показателей обработки первой штатной турбины;
- окончательное оформление и передача комплекта технологической документации для обработки установочной партии межлопаточных полостей турбин.

2. Производственное внедрение:

- установочная обработка первой турбины из партии по опытной технологической документации, контроль параметров качества на плоских поверхностях контрольных пластин;
- обработка межлопаточных полостей установочной партии штатных турбин;
- корректирование опытной технологической документации в части режимов;
- введение в состав штатной документации режимов обработки, скорректированных по результатам контроля качества установочной партии литых турбин;
- выпуск акта освоения технологического процесса (операций) комбинированной обработки каналов турбин после проверки в производственных условиях;
- оформление технологических инструкций, типовых технологических процессов и операций по комплексной комбинированной обработке каналов турбин

4 Обсуждение и заключение

Был спроектирован производительный процесс комплексной малозатратной обработки поверхностей межлопаточных каналов цельнолитой турбины с повышенным уровнем технологичности за счет выбора методов и средств для его реализации по конструктивно-технологическим признакам. Разработанная методика выбора технологической схемы и режимов позволяет осуществлять комплексный комбинированный процесс для обработки лопаток литых турбин с минимизацией затрат относительно базовой технологии.

Также можно сделать следующие выводы:

1. Научно обоснованы методы и средства повышения производственной технологичности цельнолитых турбин за счет оптимальной последовательности и правил применения операций сквозного технологического процесса отделочной обработки межлопаточных каналов, что обеспечило параметры заданного физико-механического состояния поверхностей межлопаточного пространства при минимизации затрат.

2. Объяснен механизм взаимного влияния технологических и конструктивных параметров поверхностей в межлопаточном пространстве цельнолитых турбин, что позволило предложить оптимальные сочетания различных методов (виброударного и дробеструйного) для

входных, выходных, срединных участков и переходных зон межлопаточного пространства с кривизной поверхностей второго порядка.

3. Разработана методика высокопроизводительного технологического обеспечения равномерных значений по шероховатости и степени наклепа (разброс значений до 2 %), что дает возможность равномерной и производительной обработки без использования немеханизированной трудоемкой доводки лопаточных агрегатов.

4. Рассчитаны режимы обработки, позволяющие снизить трудоемкость: общее машинное время поэтапной обработки всех каналов различными методами не более 60-65 мин; угол соударения шариков с поверхностью лопатки $\beta = 60^\circ \pm 30^\circ$; виброскорость в насыпном объеме шариков 0,6 м/с; скорость потока сжатого воздуха с дробью 40-50 м/с; инструмент – закаленные шарики фракции 2 мм, на последнем этапе – в потоке газообразной жидкости под напряжением 5–7 В. Технологически обеспеченные значения: $R_a = 0,84-0,086$ мкм, разброс степени наклепа ± 2 %. Интервалы показателей обработки менее полученных ранее на 70 %.

5. Оптимизирована технология комплексного поверхностного упрочнения и отделки лопаток цельнолитых турбин, состоящая в основе из операций виброударной и дробеструйной обработки с дополнением комбинированным воздействием по выравниванию шероховатости по всему сечению межлопаточного канала с помощью анодного растворения материала. Часть технических решений запатентована.

6. Спроектированные операции и комплексный технологический процесс проходили промышленную апробацию на цельнолитых турбинах и показали высокий уровень производственной технологичности. Трудоемкость обработки каналов литых турбин снизилась на 9 % а трудозатраты и энергопотребление при доводке лопаточных машин уменьшены на 14 %, что подтверждает результаты работы автора.

Список литературы

1 Некрылов, А.М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей/А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев//Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 7 (109). С. 20-23.

2 Некрылов, А.М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицюк // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Том Т. 16. № 4 (184). С. 182-186.

3 Грымзин, А. Ю. Технологические методы для комбинированного упрочнения поверхностей при создании сложнопрофильных изделий / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 2 (39). С. 73-78.

4 Грымзин, А. Ю. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / А.Ю. Грымзин, С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. 2022. № 4 (42). С. 22-28.

5 Грымзин, А.Ю. Технологическое обеспечение показателей качества поверхностей проточных каналов / А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев, О.Н. Кириллов // Насосы. Турбины. Системы. 2022. № 1 (42). С. 31-37.

6 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTME 2020». 2021. pp. 1943-1945.

7 Некрылов, А. М. Повышение ресурса лопаточных деталей насосного оборудования применением комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. С. 233-235.

8 Некрылов, А. М. Способ виброобработки межлопаточных каналов турбин с экструдированием гранул под действием низкочастотной вибрации / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, Г.А. Сухочев, А.В. Норман // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2019. С. 402-404.

9 Некрылов, А. М. Повышение эксплуатационных показателей комбинированными физико-техническими методами / А.М. Некрылов, Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, Е.В. Паничев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, в. 13, 2020. С. 102-105.

10 Сухочев, Г.А. Технологические методы комбинированного упрочнения поверхностей сложного профиля при создании наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев // Материалы XI Междун. науч.-практ. конф. «Инновации в Машиностроении» (ИнМаш-2020), Бийск, 22-23 октября 2020 г. С. 54-60.

11 Грымзин, А. Ю. Применение упрочняющей комбинированной обработки нагруженных деталей для повышения производственной технологичности / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2020. С. 199-201.

12 Грымзин, А. Ю. Применение комбинированной обработки для увеличения показателей качества лопаточных деталей / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2021. С. 167-170.

13 Грымзин, А. Ю. Комбинированная отделочно-упрочняющая обработка проточных поверхностей деталей с каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приор. напр. развит. науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2022. С. 87-89.

14 Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. - 8с.

15 Грымзин, А. Ю. [Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы](#) / А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, А.О. Родионов, Г.А. Сухочев // Сб. докл. XII Всерос. конф. Молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» 25-28 сентября 2019 г. Москва. С. 123–131.

References

1 Nekrylov A.M. Hardening and finishing processing of technologically hard-to-reach flow channels of parts / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev//High technologies in mechanical engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

2 Nekrylov A.M. Improving the production manufacturability of working surfaces of loaded parts using hardening combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.G. Gritsyuk // Strengthening technologies and coatings. 2020. Vol. T. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

3 Grymzin A.Yu. Technological methods for combined hardening of surfaces when creating complex profile products / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

4 Grymzin A.Yu. Manufacturability and quality indicators of flow surfaces after combined processing / A.Yu. Grymzin, S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev // Voronezhsky Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

5 Grymzin A.Yu. Technological support of indicators of quality of surfaces of flow channels / A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev, O.N. Kirillov // Pumps. Turbines. Systems. 2022. No. 1 (42). pp. 31-37.

6 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, IC-MTMTE 2020". 2021.pp. 1943-1945.

7 Nekrylov A.M. Increasing the resource of blade parts of pumping equipment using combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2019. S. 233-235.

8 Nekrylov A.M. The method of vibrotreatment of the interblade channels of turbines with the extrusion of granules under the action of low-frequency vibration / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, G.A. Sukhochev, A.V. Norman // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2019. S. 402-404.

9 Nekrylov A.M. Improvement of operational indicators by combined physical and technical methods / A.M. Nekrylov, G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, E.V. Panichev // Modern production technologies in mechanical engineering: Sat. scientific tr., Voronezh: VSTU, v. 13, 2020. S. 102-105.

10 Sukhochev G.A. Technological methods of combined hardening of surfaces of a complex profile when creating science-intensive products / G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev // Proceedings of the XI Intern. scientific-practical. conf. "Innovations in Mechanical Engineering" (InMash-2020), Biysk, October 22-23, 2020, pp. 54-60.

11 Grymzin A.Yu. Application of hardening combined processing of loaded parts to improve production manufacturability / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2020. S. 199-201.

12 Grymzin A.Yu. The use of combined processing to increase the quality indicators of blade parts / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2021, pp. 167-170.

13 Grymzin A.Yu. Combined finishing and hardening treatment of flow surfaces of parts with channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the scientific research competition. works of students and graduate students of VSTU on prior. e.g. developed. science and technology. Voronezh, VSTU, 2022, pp. 87-89.

14 Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00. The method of hardening the internal surfaces of the channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D. V. Silaev; applicant and patentee Voronezh State Technical University. No. 2022100797, claim. May 25, 20219; publ. 01/19/2023, Bull. No. 2. - 8s.

15 Grymzin A.Yu. Investigation of the modes of hardening treatment of interblade channels of parts of the rotary group / A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, A.O. Rodionov, G.A. Sukhochev // Sat. report XII All-Russian. conf. Young scientists and specialists "The future of engineering Russia" September 25-28, 2019 Moscow. pp. 123-131.

© Сухочев Г.А., Грымзин А.Ю., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-19-33



УДК 621

UDC 621

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СБОРОК НЕЖЕСТКИХ ОБОЛОЧЕК

PREPARATION OF SURFACES FROM VARIOUS MATERIALS BY COMBINED METHODS TO ENSURE THE QUALITY OF ASSEMBLIES OF NON-RIGID SHELLS

✉¹ **Сухочев Геннадий Алексеевич**, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

✉¹ **Sukhochev Gennady Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Подгорнов Сергей Николаевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: S.N.Podgornov.vmz@gmail.com

Podgornov Sergey Nikolaevich, Postgraduate student of the Department "Technology of Machine Building", Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: S.N.Podgornov.vmz@gmail.com

Аннотация. Объектами исследования в данной работе являются технологии подготовки поверхностей нежестких ребренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на сопрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом.

Annotation. The objects of research in this work are technologies for preparing surfaces of non-rigid finned shells of the ogival profile for assembly for soldering with the exception of defects and elements of abrasive caricature on conjugated surfaces.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ПОД СБОРКУ, ОХЛАЖДАЕМАЯ ОРЕБРЕННАЯ ОБОЛОЧКА.

Keywords: COMBINED PROCESSING, TECHNOLOGY OF PREPARATION FOR ASSEMBLY, COOLED FINNED SHELL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Сборки из ребренных нежестких деталей типа оболочек формируют проточные каналы высоконапорных систем теплообмена для экстремально нагруженных силовых агрегатов реактивных двигателей и энергетических установок. Проточные каналы охлаждения по действующей технологии получают в исходно сформованных листовых заготовках по образующей оживальной формы на станках с числовым программным инструментом дисковыми фрезами, спаренными в один блок. Для сборки под пайку высокотемпературном припоем с пониженной текучестью наиболее актуальным и неизученным вопросом является обеспечение гарантированной требуемой формы кромок по выступам ребер и адгезионного состояния поверхностей в зоне сопряжения, что связано с технологически наследованными

параметрами поверхностного слоя при предыдущей обработке. Научно-технологический вопрос состоит в подготовке с требуемыми параметрами торцев выступов оребрения, размеры которых составляют 2-3 мм, чтобы получить наиболее эффективную площадь теплосъёма. Выступы с такими размерами формируют парными фрезами на тонкостенной оболочке оживальной формы на станке с ЧПУ. После этого из-за заусенцев вершины выступов невозможно обработать ни абразивными ни лезвийными методами до требуемого под пайку качества поверхности и провести их надежную активацию [1]. Недостаточно изученным остается вопрос по сохранению острых кромок по вершинам ребер, R не более 0,1 мм. Заусенцы на этих кромках остаются в огромных количествах. Их снимают в составе слесарного участка узловой сборки вручную или абразивом, с последующей индивидуальной ручной доработкой по перепускам систем охлаждения, что является очень трудоемкой дорогостоящей операцией. Длительность снятия заусенцев бывает сопоставима с трудоемкостью всей детали [2]. Авторитетными и известными отечественными научными школами (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГТУ, г. Самара, ВГТУ, г. Воронеж и др.) используется как абразивные, так и новые способы активации выступов оболочек с различными физическими явлениями и техническими процессами. Но по-прежнему остаются недостаточно изученными актуальные вопросы теоретического описания механизма образования заданного характера шероховатости различными методами на плоских вершинах оребрения при определенной величине исходной шероховатости и дефектов. В настоящее время решение задач по подготовке поверхностей под пайку нежестких оболочек идет по пути зачистки электродным травлением в химически активных растворах, нанесения различных покрытий с параллельной или последовательной активацией. Решать подобные вопросы предлагается обоснованным включением в комбинированную технологию активирующей электрохимической обработки микрогранулами на завершающем этапе. Работа выполнена в соответствии с научным направлением ВГТУ в соответствии с планом ГБ НИР № 2018.15 «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения». Целью работы является получение теоретических основ и научно-обоснованных технологий подготовки поверхности нежесткой оребренной оболочки оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом. Задачи:

1. Создать научно-теоретические принципы надежного технологического сопряжения нежесткой оребренной оболочки оживальной формы с поверхностью другой оболочки, полученной методом ротационной вытяжки, и тоже тонкостенной нежесткой деталью через повышенную активацию поверхностей выступов.
2. Установить влияния закономерности абразивных и гальвано-химических режимов обрабатываемости материалов оболочек на гарантированную величину шероховатости и вероятную величину шаржирования сопрягаемых поверхностей.
3. Обосновать физически и математически пределы допустимых границ короблений в нежесткой технологической системе «электрокорунд–микрорельеф-дефектный слой» и отклонений при активации в системе «токопроводящие гранулы–активированный микрорельеф» при электрохимико-механическом воздействии.
4. На основе экспериментальных исследований определить закономерности влияния параметров комбинированных воздействий в процессах предварительной обработки и активации поверхности сложного профиля на ее рабочие показатели.
5. Создать технологическое обеспечение для процессов предварительной обработки и активации поверхности сложного профиля под ее эксплуатационные характеристики, в том числе с комбинированными операциями.
6. Предложить методику выбора режимов технологии подготовки поверхности оболочки оживального профиля без использования свободного абразива в струйной или иной форме, дающей активацию поверхностей вершинам пазов вдоль оживальной формы и обеспечивающей такое повышение энергетического уровня поверхности оболочки, чтобы это дало возможность 10 % повышения эксплуатационных нагрузок на камеры сгорания энергетических установок и двигателей этого класса.

7. Спроектировать технологический процесс подготовки поверхностей нежестких орбренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и шаржирования абразивом.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности процессов сборки под пайку нежестких оболочек [3].

2 Материалы и методы

Объектами исследования являются технологии подготовки поверхностей нежестких орбренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом.

Методы исследования. Исследования теории процессов выполнялись на научных основах технологии машиностроения, технической механики, металлофизики, явлений электрохимического и электролитического травлений, вычислительной математики, математического моделирования. Эксперименты выполнены с помощью современных средств и приборов, по методикам планирования эксперимента и анализа результатов, предложенных автором.

Предметом исследования явились научно-теоретические принципы технологического обеспечения надежного технологического сопряжения нежесткой орбренной оболочки оживального профиля с активированной поверхностью выступов с другой тонкостенной оболочкой, полученной методом ротационной вытяжки.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, строгостью использованного математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, обработки экспериментальных данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными, а также практическим применением результатов исследований.

3 Результаты исследований

Из анализа накопленных данных выявлено, что при исследовании рассматриваемого технологического процесса подготовки поверхностей и соединения тонкостенных оболочек необходимо стремиться к снижению абразивного компонента в операциях зачистки орбренных оболочек, предназначенных под активацию. Рисунок 1 представляет одну такую оболочку из бронзы со следами доработки вручную.



Рисунок 1 – Сегмент орбренной рубашки камеры из бронзы

Как видно из рисунка, очевидны следы в пазах от ручной доводки, особенно много их в местах подхода к кольцам завеса, почти в каждом пазу [4]. Технологические требования по выступам заключаются в снятии заусенцев с кромок ребер (рис. 2) без притупления угла ($R_{max} = 0,1$ мм) под операцию последующей пайки с гладкой оболочкой, формирующей замкнутые каналы.

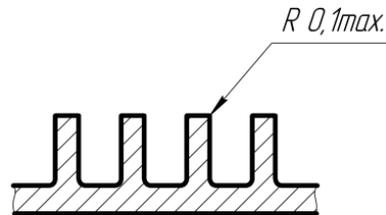


Рисунок 2 – Выступы оребрения рубашки

Главной проблемой в нашем случае является коробление оребренной оболочки с тонким дном из-за возникающего при дробеструйной обработке наклепа поверхностного слоя. В состав блока камеры в ряде случаев входит оболочка камеры, изготовленная из коррозионностойкой, стали 12Х18Н10Т, а фрезерованная рубашка камеры может быть изготовлена из жаропрочной стали (рисунок 3). Это еще более усугубляет процессы снятия заусенцев и доводки рубашек под пайку [5].

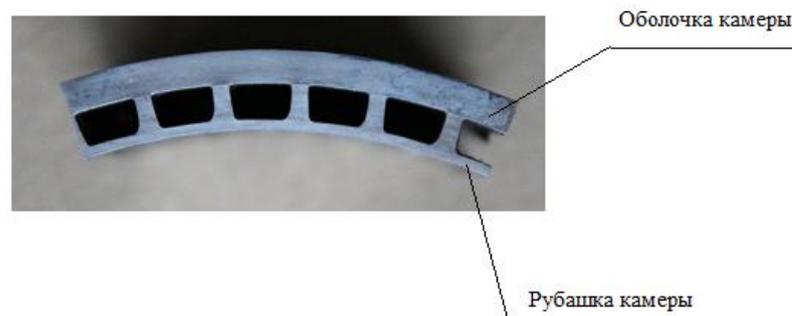


Рисунок 3 – Спаянный образец из жаростойких сталей

Недостатки при снятии заусенцев и формировании кромок приводят к необходимости резко увеличивать температуру пайки и избыточного давления. Это приводит к чрезмерному вытягиванию наружной оболочки в пазы оребренной (рисунок 4), что нарушает теплоотвод. Страдает качество пайки, бывают отслоения по ребрам.



Рисунок 4 – Узел в сборе после пайки

Для процесса формирования паяного соединения на основе химического реагирования между атомами сопрягаемых тел требуется энергии активации для прорывания энергетического барьера на поверхности [6]. То есть: средняя свободная потенциальная энергия атомов E_{II} на поверхности выше энергии на глубине h : E_h . Атомы с энергией E_{II} хаотично сближаются на поверхности с внешними атомами на расстояние физической адсорбции S_{fa} , между ними максимум свободной энергии. Далее для сближения их надо стимулировать приближаться на межатомное расстояние. Затем их надо подтолкнуть для взаимного перехода, сообщив энергию активации, которая после перераспределения электронов атомов отдает свою энергию в виде тепла. Для продолжения процесса необходим подогрев: при обычных температурах явление адгезии незначительно. В физически активных центрах с выходом на поверхность и перемещением вакансий (дислокаций), образуются и ускоряются благодаря пластической деформации химические связи. Активация поверхности идет за счет разрушения и схватывания пересыщенных связей. Так и проявляется диффузия на уровне множества атомов. Технологически с учетом этой теории адгезия припоя с поверхностью $A_{сп}$ определяется управляемыми и неуправляемыми параметрами процесса [7]:

$$A_{сп} = f(A_{fa}, E_a, t_{ai}, t_{II}, n(t), K_{pm}), \quad (1)$$

где – A_{fa} расстояние физической адсорбции; E_a – энергия активации в зоне контакта частицы припоя с поверхностью; t_{ai} – период активации при снятии пика межфазной энергии между атомами.

По Больцману

$$t_{ai} = x_0 e^{-E_a / A_k T}; \quad (2)$$

где x_0 – начальная координата для атома при входе в зону физической адсорбции; A_k – постоянный показатель; T – абсолютная температура; t_{II} – температура в зоне контакта припоя с поверхностью; $n(t)$ – количество атомов припоя из общего числа $n_{общ}$, реагировавших за время t_{ai} в зоне контакта частицы с поверхностью; K_{pm} – коэффициент, учитывающий физические свойства припоя (для меди – 1).

Взаимосвязь элементов E_a , t_{II} , $n(t)$, K_{pm} в той или иной мере технологически управляема посредством управления режимами процессов подготовки поверхности и пайки. Параметры A_{fa} , x_0 и t_{ai} относятся к понятиям атомного уровня строения вещества и технологически не нормируются. При активации поверхности перед пайкой мы посредством увеличения потенциального количества атомов $n(t)$ за счет последовательной зачистки, травления и анодной комбинированной активации повышаем уровень E_a . То есть, управляем по схеме $n(t) \uparrow \leftrightarrow E_a \uparrow$, следовательно и $A_{сп}$ растет при пайке тонкостенных оболочек. Параметр K_{pm} мы тоже можем варьировать изменяя состав припоя, нанося гальваническим методом различные слои меди, серебра и др., составляя их в них разные композиции. Все эти приемы позволят создать активированную ювенильную поверхность, необходимую для качественной пайки, но она будет носить пятнисто-локальный характер по достигнутым в той или иной точке показателям. Это эффективные параметры процесса, но нужен более технологически управляемый фактор. Известно, что пайка будет достаточно прочной при значении угла смачивания ϕ не более 20° (рис. 5). Технологически это можно обеспечить, подавая в заключительной стадии на оребрённую оболочку токопроводящие гранулы соответствующего размера, твердости и формы под нужным углом на определенное время (рис. 6) [8]. Рельеф будет сглажен под нужным углом, обеспечивая наилучшее растекание припоя и удержание его в строго отведенных местах за счет волнистости микрорельефа на выступах оребрённой оболочки [9].

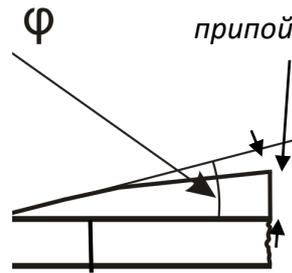


Рисунок 5 – Смоченный припоем участок поверхности

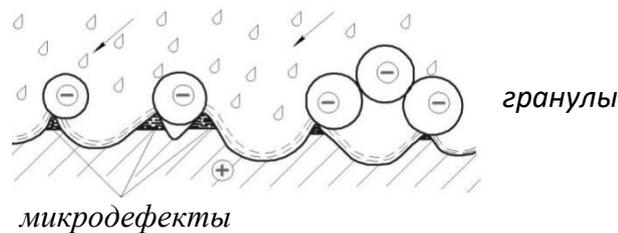


Рисунок 6 – Обдувка токопроводящими гранулами с капельной фракцией в потоке

Этим еще можно добиться и исключения шаржирования, а также устранения микровыступов, препятствующих растеканию припоя. Качественная равномерность возможна и при том, что равно распределённые импульсные ударные контакты сглаживаются воздействием гранул диаметром D_r вокруг каждой точки обрабатываемой поверхности и дают 100 % покрытие ее пластическими отпечатками с максимальным размером периметра D . Эффективность комбинированной обработки сферообразными гранулами обосновывается характеристиками пластического отпечатка гранулы описанным диаметром D_r . При планировании эффективности обработки поверхности по полноте покрытия пластическим отпечатками надо понимать, что при трехкратном перекрытии каждой точки поверхности этими отпечатками, необработанной останется более 5 % всей площади оболочки [10]. При этом учитываем, что геометрически:

$$D = 0,577 D_r . \quad (3)$$

Шероховатость при обработке поверхности изменяется по мере увеличения ее покрытия пластическими отпечатками $D_{по}$.

$$\Delta R_a = 0,5 \sqrt{D_r^2 - 0,3 D_{по}^2} - \sqrt{D_r^2 - D^2} . \quad (4)$$

Максимально достижимый отпечаток D примерно определяется так:

$$D = \frac{k_{yo} D_r}{3 \sin \beta} \sqrt{\frac{\pi P_{тк}}{2 \sigma_{\tau}}} , \quad (5)$$

где k_{yo} – коэффициент, определяющий влияние в зоне контакта на диаметр отпечатка условий обработки: изменения в процессе обработки контактных сил взаимодействия гранул и поверхностей; кривизны контактирующих поверхностей; исходной шероховатости; поверхностной упаковки гранул; β – угла подачи гранул с жидкостной средой относительно оболочки; P_{TK} – динамического давления гранулы в точке контакта с поверхностью МПа; σ_T – предела текучести, МПа.

Тогда, из (4):

$$\Delta R_a = 0,5D_r \left[\sqrt{1-0,035k_{yo} \frac{P_{TK}}{\sigma_T \sin \beta}} - \sqrt{1-0,05k_{yo} \frac{P_{TK}}{\sigma_T \sin \beta}} \right]. \quad (6)$$

Из (6) очевидно, что величина ΔR_a определяющим образом зависит от D_r , отношения P_{TK}/σ_T и коэффициента k_{yo} . Из-за анодного растворения шероховатость [11]:

$$R_a = R_{au} - \Delta R_a - k_{pp} v_{ap} t_{ex}, \quad (7)$$

где R_{au} – исходная шероховатость, мкм; v_{ap} – скорость растворения материала, мкм/мин; t_{ex} – время протекания электрохимического процесса, мин.

С учетом (7)

$$\Delta R_a = 0,5D_r - 0,5D_r \sqrt{0,015k_{yo} \frac{P_{TK}}{\sigma_T \sin \beta} + k_{pp} v_{ap} t_{ex}}, \quad (8)$$

где k_{pp} – коэффициент равномерности растворения лункообразного отпечатка (определяется формой сфероподобной гранулы и составляет 0,8-1,0).

За время t_{ex} сьем дефекта в виде окисных плен и их хлопьев гарантирован. Характерный уклон выступов шероховатости, необходимый для равномерности распределения припоя в зоне пайки определяется углом β подачи потока гранул с жидкостной средой относительно оболочки. Учитывая, что снятие дефектов по шероховатости достаточно не более, чем на 20 % от исходной высоты неровностей R_{au} имеем

$$\sin \beta = \sqrt{\frac{(0,2R_{au}^2 - R_r^2 + k_{pp}^2 v_{ap}^2 t_{ex}^2) \sigma_T}{R_r^2 0,015k_{yo} P_{TK}}}. \quad (9)$$

По формуле (9) задаваясь параметрами обработки, большинство из которых технологически управляемо, находится угол, при этом ориентированный поток гранул формирует нужные уклоны на выступах шероховатости. Время активации по [1, 2]:

$$T_{ак} = t_{ai} n(t) S_{па} = [n(t) S_{па} x_0 e^{-Ea_{Ак} T} K_{рм}] \cdot t_{oc} / t_{п}, \quad (10)$$

где $S_{па}$ – площадь поверхности активации; t_{oc} – температура окружающей среды.

Для приближенных расчетов время активации принимают длительность цикла гальвано-химической обработки, струйной очистки, ионно-плазменного полирования, ультразвуковой комбинированной обработки и т. д.

Первые эксперименты были посвящены выявлению возможности для ускорения процесса оставить в маршруте подготовки поверхности электрокорунд. После нанесения никелевого и мед-

ного покрытий из оболочки камеры были вырезаны образцы № 1, и проведено сравнительное металлографическое исследование с образцами № 2, вырезанных из другой детали, покрытой по действующему технологическому процессу. Перед покрытием выполнялась предварительная струйная обработка электрокорундом (ПСО). По результатам сравнительного металлографического исследования установлено, что толщина никелевого покрытия соответствует требованиям документации и составляет 6–10 мкм в образце №2 (с ПСО) и 10–12 мкм в образце №1 (без ПСО). При этом во всех исследованных образцах, вырезанных из детали №2 (с ПСО), под слоем покрытия наблюдается скопление пор и неметаллических включений (рис. 7).

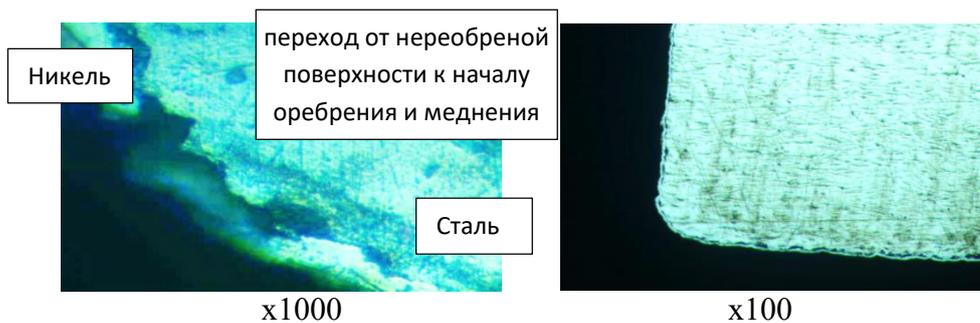


Рисунок 7 – Микроструктура образцов №2 (с ПСО)

Во всех образцах без ПСО никелевое покрытие плотное, без неметаллических включений и пор (рис. 8). Дополнительно, с целью определения качества сцепления никелевого покрытия с основным материалом ребрѐнной стенки, вырезанные образцы подверглись нагреву до 200 °С в электрической печи, а также в вакууме 10^{-4} мм рт.ст [12]. После нагрева как в открытой печи, так и в вакууме до 200°С в микроструктуре образцов с ПСО по границе никелевое покрытие-сталь выявлены скопления пор и неметаллических включений, как в исходном состоянии (рис. 9).

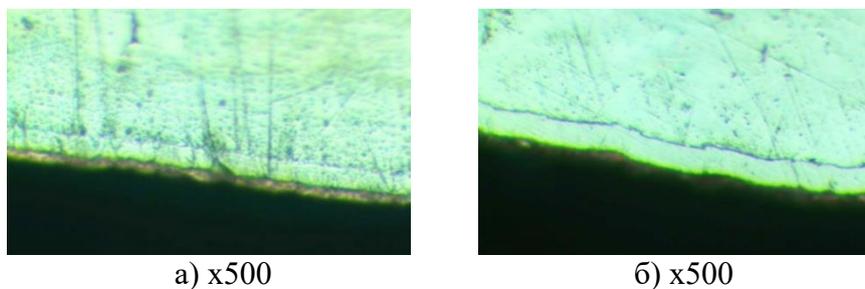


Рисунок 8 – Микроструктура неоребрѐнной зоны (а) и ребра (б) образцов без ПСО

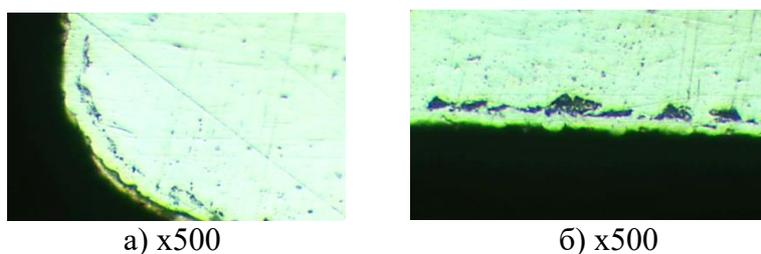


Рисунок 9 – Микроструктура никелевого покрытия образцов с ПСО после нагрева до 200 °С в открытой печи (а) и в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст.

Микроструктура образцов, вырезанных из детали без ПСО, после нагрева до 200 °С в открытой печи характеризуется наличием плотного сцепления никелевого покрытия со сталью (рис. 10, а), однако на отдельных участках наблюдается отслаивание никелевого покрытия с величиной раскрытия 2-4 мкм (рис. 10, б).

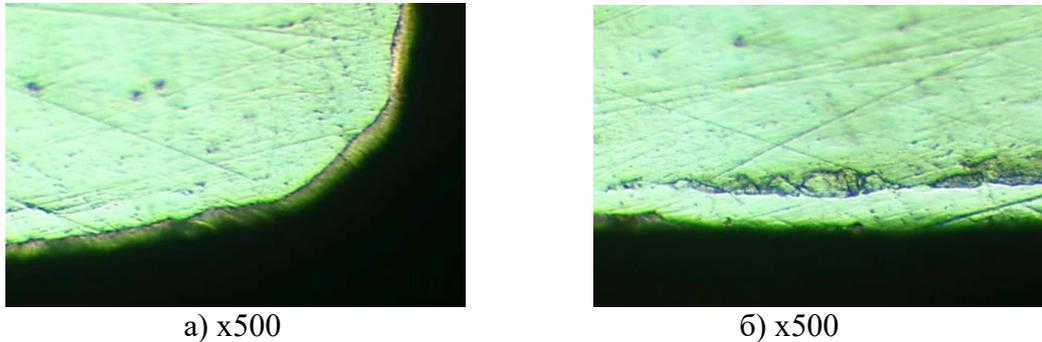


Рисунок 10 – Микроструктура никелевого покрытия образцов №1 (без ПСО)

Как мы и предполагали, обдувку электрокорундом надо исключать однозначно. Однако результаты на рис. 10 показали правильность и другого научно обоснованного предположения о недостаточности удаления шаржирования только проведением предварительного электрополирования и активации на обратном токе, чтобы в ванне предварительного никелирования достичь нужной активации поверхности и смачиваемости припоем [13]. Появившийся на пиках шероховатости дефектный слой материала снимали комбинированной обработкой токопроводящими гранулами из никелевого сплава с приведенным диаметром ≈ 150 мкм. Обработка образцов, закрепленных в оснастке с вращением для равномерности (рис.11) проводилась с наложением тока низкого напряжения 3-7 В.

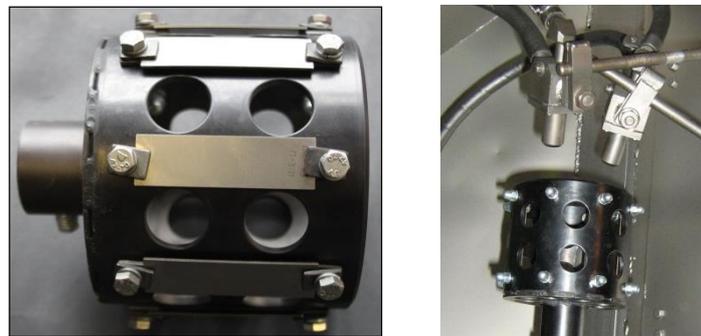


Рисунок 11 – Оснастка в сборе с образцами и камера экспериментального устройства

Время обработки каждого образца 15 с; угол подачи потока гранул к поверхности от 10 до 30 град.; скорость вращения оснастки 40 мин⁻¹; давление сжатого воздуха в потоке 0,3 МПа; Жидкостная среда состояла из разбитых потоком воздуха капель слабо проводной воды. Для исключения шаржирования поверхностного слоя оболочки брали гранулы из никелевого высокопрочного сплава, идентичного материалу обрабатываемой штатной детали. Контроль предотвращения избыточного наклепа и, следовательно, короблений нежестких оболочек, проводился по прогибу настроечных и контрольных пластинок Альмена ($Z = 0,03-0,05$ мм). Направленные под малым углом к активированной поверхности гранулы (рис. 6) за счет анодного эффекта удаляли по вершинам микровыступов дефекты, а гребешки шероховатости механически деформировали под заданным углом. Создавалась благоприятная разнонаправленная морфология микрорельефа для растекания припоя. Результаты эксперимента показаны на

диаграмме 1. Проверка прочности последующих покрытий припоем проводилась методом царапин. Результаты, показанные на рис. 12 показали эффективность нового подхода к подготовке поверхностей оребренных оболочек к пайке.

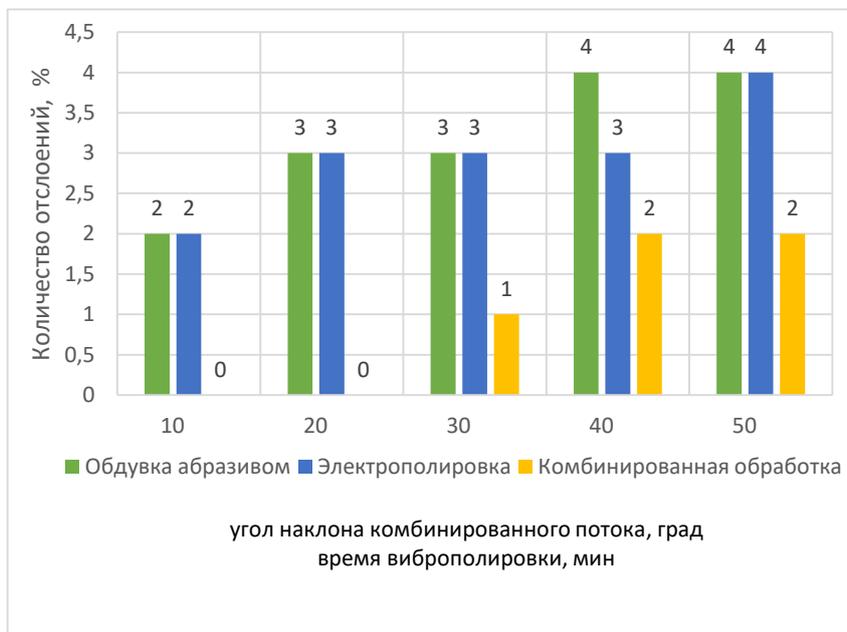


Рисунок 12 – Результаты прочности сцепления припоя после различной подготовки поверхности

На рисунках 13 и 14 показаны результаты гидроиспытаний до разрушения по штатной технологии и после внедрения новых технических решений.

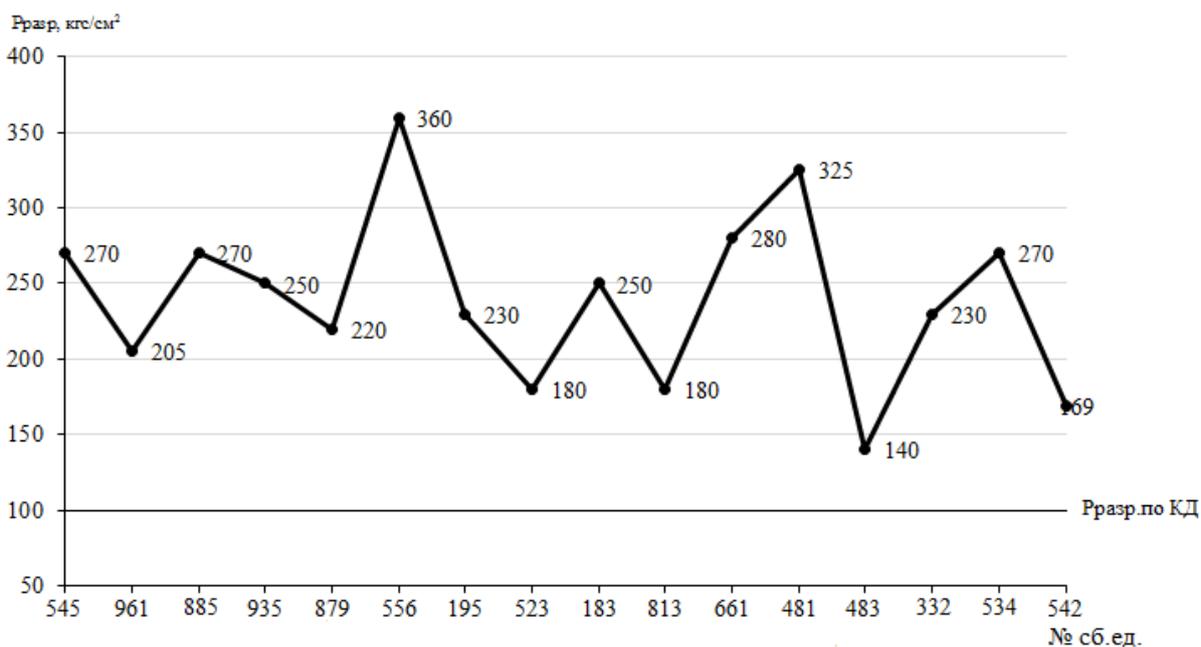


Рисунок 13 – Результаты гидроиспытаний до разрушения по штатной технологии

Как видно из графика (рис. 13) давление разрушения отличаются более чем в два раза, от 140 кгс/см² до 360 кгс/см², что говорит о нестабильности качества и прочности паяных соединений. При этом, в соответствии с графиком 14, давление разрушения изменяется от 325 кгс/см² до 390 кгс/см².

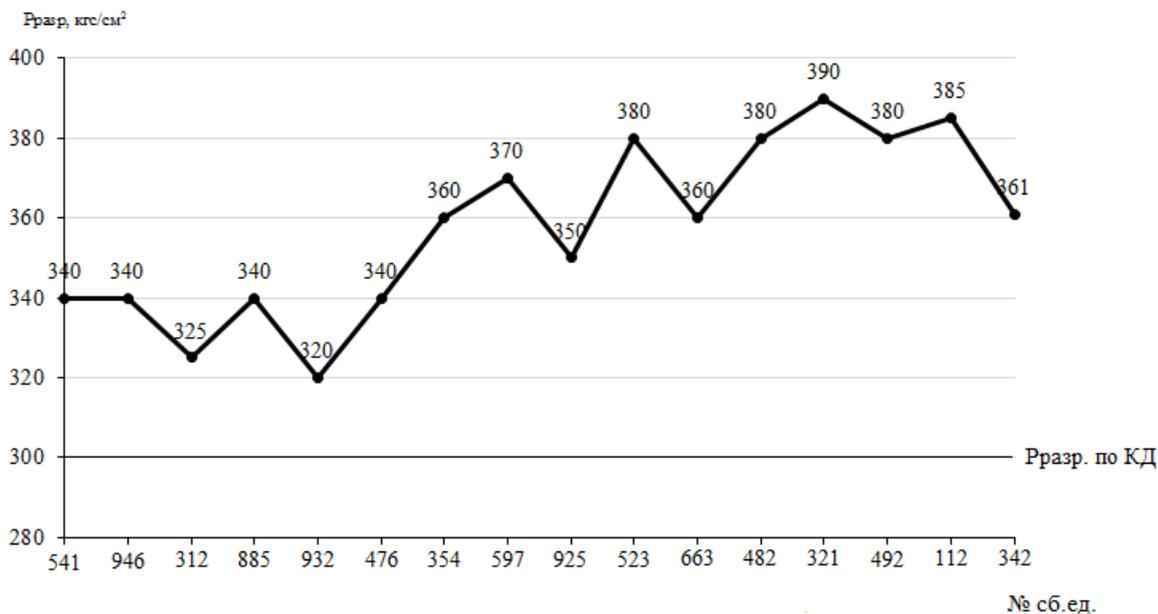


Рисунок 14 – Результаты гидроиспытаний до разрушения на модельных режимах после внедрения новых технических решений

Столь высокая нестабильность прочности паяных сборок наиболее вероятно связана с наличием пор в никелевом покрытии, что подтверждается тем, что согласно ГОСТ9.301-86 они не нормируются, а, следовательно, при покрытии деталей под пайку не могут иметь постоянных размеров и количества. Анализ рисунка 15 показывает, что после комбинированной активации паяное соединение удовлетворительное, галтели сформированы, в никелевом покрытии, преимущественно со стороны рёбер, наблюдаются редкие отдельные мелкие поры размером менее ~2 мкм. В ранее исследованных сборках, изготовленных с применением ПСО и гидроочистки, поры имеют недопустимые значения до 20 мкм и присутствуют повсюду в большом количестве.

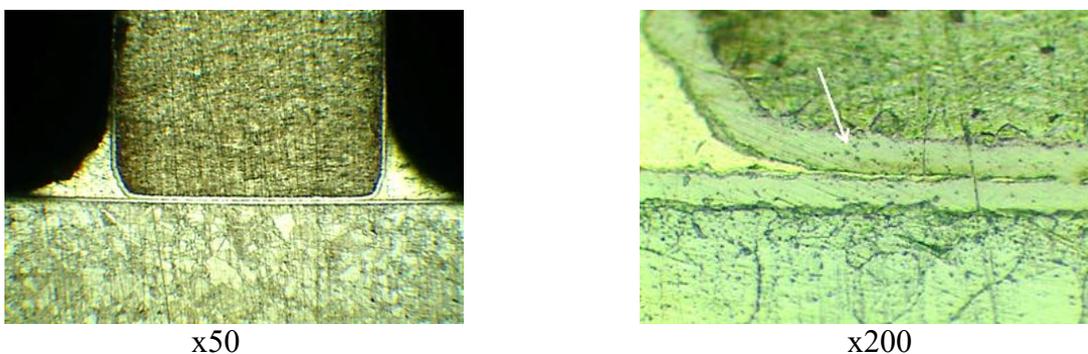


Рисунок 15 – Соединение медно-серебряным припоем

Новый технологический подход позволил снизить на 10 % трудоемкость подготовки под пайку оребренных нежестких оболочек оживальной формы. Эти мероприятия перспективны для всех деталей подобного типа, а не только в ракетостроении: авиационном двигателестроении, энергетике и др. Предложена новая методика технологического обеспечения подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией под пайку:

1. Экспертиза и планирование: оценка целесообразности комбинированной активации поверхностей под пайку в тех случаях, когда возможно применение традиционных методов и средств; выбор методов и средств обработки сопрягаемых поверхностей применительно к конструкции оребренных оболочек оживальной формы; составление технологического маршрута сборки применительно к конструкции тонкостенных оребренных оболочек.

2. Подготовка: механическая зачистка видимых дефектов закрепленным абразивом с проверкой мест шаржирования и устранения их; удаление заусенцев по выступам оребренных оболочек оживальной формы без притупления угла более $R_{0,1+0,1}$ мм по кромкам; для нержавеющей материалов проводят промывку и обезжиривание растворением загрязнений в нефрасе или тринатрийфосфате;

3. Активация и нанесение припоя: электрополирование или химическое травление растворами, соответствующими марке материалов оболочек; обдувка потоком токопроводящих гранул сферической формы в жидкостной среде из мягкого никелевого сплава с углом подачи к поверхности не более 20 град; нанесение гальванического никеля слоем до 15 мкм, если по составу металла тонкостенных оболочек процесс пайки не гарантирует растекание и смачивание припоя по поверхности и не образует надежное соединение; гальваническое нанесение припоя (см. выше).

4. Пайка сборки оболочек в вакуумной печи или контейнере по типовому технологическому процессу.

5. Контроль. Проверка по обнаружению внутренних дефектов различного вида радиационной дефектоскопией. Проверка по обнаружению сквозных дефектов испытанием на герметичность воздушно-гелиевой смесью. Металлографическое исследование шлифов образцов-свидетелей или имитирующих паяный узел технологических сборок.

4 Обсуждение и заключение

Решена проблема научно-технического формирования комплексного технологического обеспечения активационной обработки поверхностей тонкостенных оболочек под последующую пайку за счет обоснованного применения комбинированных воздействий к элементам оребрения на завершающем этапе, учитывая эксплуатационные условия работы нежестких сборочных единиц.

А также можно сделать следующие выводы:

1. Впервые установлена и научно-технически обоснована несостоятельность использования для активации под пайку нежестких оребренных тонкостенных оболочек (отношение толщины стенки к диаметру до 1 %) абразивно-струйной обработки, что позволяет выделить группу технологического риска по типоразмеру оболочек подобного типа.

2. Впервые к нежестким паяным оболочкам оживальной формы привязана схема комплексного рассмотрения механизма активации и технологического обеспечения с разделением управляемых и неуправляемых факторов, что повышает результативность мероприятий по активации отбрасыванием неуправляемых технологических параметров (температура плавления, толщина зазора и т.п.).

3. С учетом того, что пайка будет достаточно прочной при значении угла смачивания ϕ не более 20° , обосновано технологическое решение подачи в заключительной стадии на оребренную оболочку токопроводящих гранул соответствующего размера, твердости и формы под

нужным углом на определенное время. В результате рельеф будет сглажен под нужным углом, обеспечивая наилучшее растекание припоя и удержание его в строго отведенных местах за счет регулярной волнистости на выступах оребренной оболочки.

4. Разработаны принципы технологического удаления дефектного слоя материала, который снимали комбинированной обработкой токопроводящими гранулами из никелевого сплава с приведенным диаметром ≈ 150 мкм. Обработка проводилась с наложением тока низкого напряжения 3-7 В; время обработки 15 с; угол подачи потока гранул к поверхности от 10° до 20° ; скорость вращения оснастки 40 мин^{-1} ; давление сжатого воздуха в потоке 0,3 МПа. Для исключения шаржирования поверхностного слоя оболочки брали гранулы из никелевого высокопрочного сплава, идентичного материалу обрабатываемой штатной детали, чего не было ранее.

5. Разработаны средства технологического оснащения, имитирующие штатные оболочки, позволяющие совместить все элементы формы в комплексной технологической обработке режимов активации поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы под пайку.

6. Предложена новая методика технологического обеспечения качества подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией поверхностей под последующую пайку, что позволяет сформировать единый подход для всех типоразмеров аналогичных деталей и сборочных единиц.

7. Разработан и внедрен комплексный технологический процесс подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией поверхностей под последующую пайку с трудоемкостью менее на 10 % значений, достижимых ранее. Часть технических решений, используемых в технологии, запатентованы.

8. Показаны пути расширения области использования полученных решений. Эти мероприятия перспективны для всех деталей подобного типа, а не только в ракетостроении: авиационном двигателестроении, энергетике и др. техники.

Список литературы

1 Некрылов, А. М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Научно-технические решения в машиностроении. 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

2 Некрылов, А. М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицюк // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. – Том Т. 16. – № 4 (184). – С. 182-186.

3 Грымзин, А. Ю. Технологические методы для комбинированного упрочнения поверхностей при создании сложнопрофильных изделий / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2021. – № 2 (39). – С. 73-78.

4 Подгорнов, С. Н. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. 2022. – № 4 (42). – С. 22-28.

5 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, IC-MTME 2020». 2021. pp. 1943-1945.

6 Сухочев, Г. А. Технологические методы комбинированного упрочнения поверхностей сложного профиля при создании наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев // Материалы XI Междун. науч.-практ. конф. «Инновации в Машиностроении» (ИнМаш-2020), Бийск, 22-23 октября 2020 г. С. 54-60.

7 Подгорнов, С. Н. Пути повышения производственной технологичности оребренных оболочек упрочняющей комбинированной обработкой / С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, вып. 13, 2020. – С.97-101.

8 Грымзин, А. Ю. Применение упрочняющей комбинированной обработки нагруженных деталей для повышения производственной технологичности / А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2020. – С. 199-201.

9 Грымзин, А. Ю. Технологическое обеспечение расходных характеристик деталей с мелкоразмерными проточными каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, вып. 14, 2021. – С.94-98.

10 Грымзин, А. Ю. Применение комбинированной обработки для увеличения показателей качества лопаточных деталей / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2021. С. – 167-170.

11 Грымзин, А. Ю. Комбинированная отделочно-упрочняющая обработка проточных поверхностей деталей с каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приор. напр. развит. науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2022. С. 87-89.

12 Патент №2788444 Российская Федерация, В23Н 5/06, В23В 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. - 8с.

13 Патент №2680117 Российская Федерация, В23К 1/012, В23К 1/19 Способ пайки двухслойных паяных конструкций / М.А Кашапов, Н.Г. Иванов, В.В. Федоров, А.С. Грибанов, А.В. Гребенщиков, С.Н. Подгорнов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко" -№2017106620, заявл. 28.02.2017; опубл. 15.02.2019, Бюл. №5. - 8с.

References

1 Nekrylov A.M. Hardening and finishing processing of technologically hard-to-reach flow channels of parts / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev // High technologies in mechanical engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

2 Nekrylov A.M. Improving the production manufacturability of working surfaces of loaded parts using hardening combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.G. Gritsyuk // Strengthening technologies and coatings. 2020. Vol. T. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

3 Grymzin A.Yu. Technological methods for combined hardening of surfaces when creating complex profile products / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

4 Podgornov S.N. Manufacturability and quality indicators of flow surfaces after combined processing / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev // Voronezhsky Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

5 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, IC-MTMTE 2020". 2021, pp. 1943-1945.

6 Sukhochev G.A. Technological methods of combined hardening of surfaces of a complex profile when creating science-intensive products / G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev // Proceedings of the XI Intern. scientific-practical. conf. "Innovations in Mechanical Engineering" (InMash-2020), Biysk, October 22-23, 2020, pp. 54-60.

7 Podgornov S.N. Ways of increasing the production manufacturability of finned shells by strengthening combined treatment / S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.S. Yukhnevich // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific tr., Voronezh: VSTU, issue 13, 2020. pp.97-101.

8 Grymzin A.Yu. Application of hardening combined processing of loaded parts to improve production manufacturability / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2020. S. 199-201.

9 Grymzin A.Yu. Technological support of consumable characteristics of parts with small-sized flow channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.S. Yukhnevich // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific tr., Voronezh: VSTU, issue 14, 2021. pp.94-98.

10 Grymzin A.Yu. The use of combined processing to increase the quality indicators of blade parts / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2021, pp. 167-170.

11 Grymzin A.Yu. Combined finishing and hardening treatment of flow surfaces of parts with channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the scientific research competition. works of students and graduate students of VSTU on prior. e.g. developed. science and technology. Voronezh, VSTU, 2022, pp. 87-89.

12 Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00. The method of hardening the internal surfaces of the channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D. V. Silaev; applicant and patentee Voronezh State Technical University. No. 2022100797, claim. May 25, 20219; publ. 01/19/2023, Bull. No. 2. - 8s.

13 Patent No. 2680117 Russian Federation, B23K 1/012, B23K 1/19 Method of soldering double-layer soldered structures / M.A. Kashapov, N.G. Ivanov, V.V. Fedorov, A.S. Griбанov, A.V. Grebenschikov, S.N., Podgornov; applicant and patent holder Joint Stock Company "NPO Energomash named after Academician V.P. Glushko" -No.2017106620, application 28.02.2017; publ. 15.02.2019, Bul. No. 5. - 8с.

© Сухочев Г.А., Подгорнов С.Н., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-34-47



УДК 621.793

UDC 621.793

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

УПРОЧНЕНИЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН ПЛАЗМЕННЫМ НАНЕСЕНИЕМ И УПРОЧНЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

STRENGTHENING WEAR PARTS SURFACES OF FORESTRY MACHINERY PARTS BY PLASMA APPLICATION AND HARDENING OF COATINGS OF VARIABLE COMPOSITION

Плахотин Александр Александрович, младший научный сотрудник военного учебно-научного центра военно-воздушных сил, «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина».

Plakhotin Alexander Alexandrovich, Junior Researcher at the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin".

✉¹ **Кадырметов Анвар Минирович**, д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

✉¹ **Kadyrmetov Anvar Minirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Попов Дмитрий Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: qaz.7@mail.ru

Popov Dmitry Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: qaz.7@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема повышения качества при изготовлении и восстановлении рабочих поверхностей деталей пар трения на примере цилиндров автомобильных ДВС и режущих элементов рабочих органов лесных машин, обеспечивающих их самозатачиваемость в процессе эксплуатации, с помощью усовершенствованного метода плазменного нанесения и упрочнения покрытий.

Annotation. The problem of improving quality in the manufacture and restoration of working surfaces of friction pair parts is considered using the example of cylinders of automobile internal combustion engines and cutting elements of working parts of forestry machines, ensuring their self-sharpening during operation, using an improved method of plasma deposition and hardening of coatings.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ, УПРОЧНЕНИЕ, ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА, САМОЗАТАЧИВАНИЕ ЛЕЗВИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ. **Keywords:** PLASMA COATING, HARDENING, COATINGS OF VARIABLE COMPOSITION, SELF-SHARPENING OF WORKING ENGINE BLADES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Одной из основных причин потери работоспособности машин является изнашивание деталей, вследствие которого процент отказов в процессе эксплуатации достигает 80 процентов и более [1-6]. Это обуславливает актуальность задачи повышения качества и износостойкости рабочих поверхностей деталей пар трения и режущих элементов рабочих органов машин, решение которой позволяет обеспечить увеличение ресурса машин. При этом использование подхода нанесения покрытий с переменным составом как функции координат поверхности дополнительно позволяет, во-первых, обеспечить равномерность изнашивания поверхностей трения при пространственно неравномерных изнашивающих воздействиях и, во-вторых, сэкономить на дорогостоящих высокоизносостойких составляющих покрытия [7].

К одному из эффективных подходов создания поверхностных слоев относится нанесение покрытий с помощью прогрессивных плазменных методов нанесения покрытий [8]. Имеющиеся недостатки данных методов, обусловленные перегревом, рекристаллизацией материала детали и ее короблением для плазменной наплавки, и недостаточными прочностными характеристиками покрытия для плазменного напыления, устраняются путем совершенствования самого процесса плазменного нанесения и упрочнением полученного покрытия (рис. 1) [9]. Одним из эффективных способов упрочнения покрытий является использование двухдуговых плазмотронов в режиме модуляции электрической мощности косвенной и прямой дуг (рис. 2), что позволяет повысить адгезионную и когезионную прочность покрытия, твердость и износостойкость. Однако данный способ не обеспечивает равномерности износа покрытия на всех участках рабочих поверхностей деталей при неравномерных изнашивающих нагрузках, и для данного способа не известны зависимости критериев комбинированного двухдугового процесса от его факторов как для трущихся поверхностей пар трения, так и для режущих поверхностей лезвий рабочих органов лесных машин.

Типичным примером первой группы поверхностей являются рабочие поверхности цилиндров ДВС, второй группы – лемехи плугов. Анализ современной информации подтвердил актуальность решения данной проблемы и позволил выдвинуть гипотезы по устранению неравномерности изнашивания покрытия использованием покрытий переменного состава путем модуляции мощности выносной дуги плазмотрона и регулирования расхода твердой составляющей порошка в процессе нанесения покрытия (рис. 3) [7,10-13].

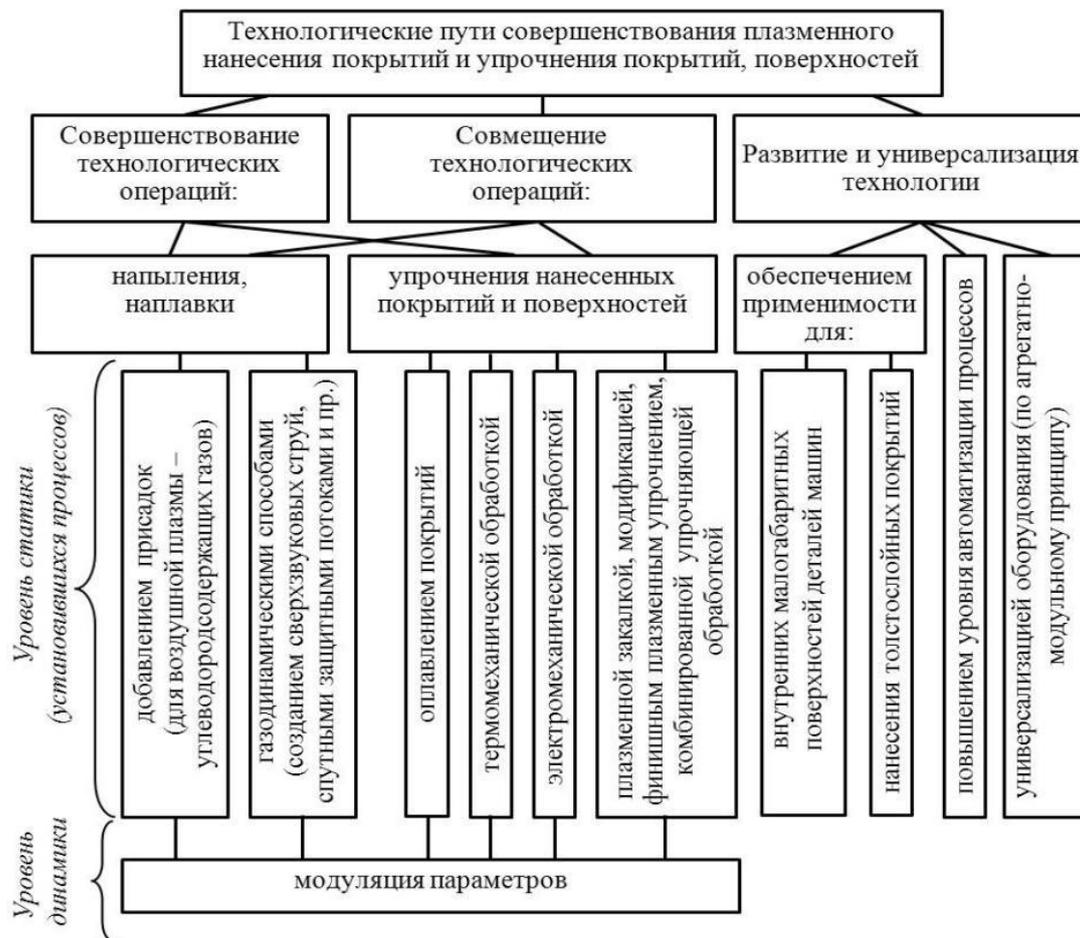
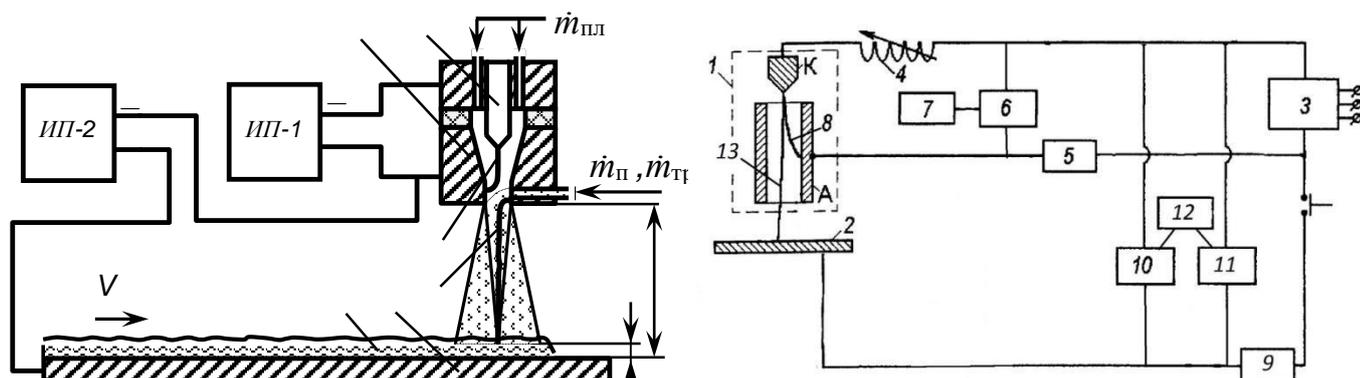


Рисунок 1 – Пути повышения эффективности плазменного нанесения и упрочнения покрытий



1 – катод; 2 – анод; 3 – косвенная (пилотная) дуга; 4 – прямая (вынесенная) дуга; 5 – подложка; 6 – покрытие; ИП-1, ИП-2 – источник питания косвенной и прямой дуги соответственно; V – скорость перемещения (подача) плазматрона; $m_{пл}$, $m_{п}$, $m_{тр}$ – расход плазмообразующего газа, материала покрытия и транспортирующего газа соответственно; h – толщина покрытия; L – дистанция нанесения и/или упрочнения покрытия

1 – плазматрон; 2 – подложка; 3 – источник питания; 4 – катушка индуктивности; 5 – балластное сопротивление; 6 – модулятор; 7 – блок управления; 8 – косвенная дуга; 9 – балластное сопротивление; 10, 11 – модуляторы; 12 – блок управления; 13 – прямая дуга

Рисунок 2 – Схема источника питания и процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытия с обработкой поверхности выносной (прямой) дугой

Типичным примером первой группы поверхностей являются рабочие поверхности цилиндров ДВС, второй группы – лемехи плугов. Анализ современной информации подтвердил актуальность решения данной проблемы и позволил выдвинуть гипотезы по устранению неравномерности изнашивания покрытия использованием покрытий переменного состава путем модуляции мощности выносной дуги плазмотрона и регулирования расхода твердой составляющей порошка в процессе нанесения покрытия (рис. 3) [7,10-13].



Рисунок 3 - Прогрессивные газотермические технологии нанесения покрытий

На основе этого была определена научная проблема плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с оптимальным распределением в них высокотвердых составляющих, обеспечивающих равномерность изнашивания всех участков поверхности трения при неравномерном изнашивающем воздействии и самозатачиваемость лезвий рабочих органов машин в условиях управления процессом с помощью модуляции мощности плазмотрона.

2 Материалы и методы

На рис. 4 представлены схемы процессов плазменного формирования равномерно-изнашиваемого покрытия на поверхности гильзы цилиндра ДВС с помощью регулирования расхода упрочняющей доли порошка по профилю цилиндра и скорости движения пятна напыления.



Рисунок 4 – Схема процессов формирования равномерноизнашиваемого покрытия на поверхности гильзы цилиндра ДВС

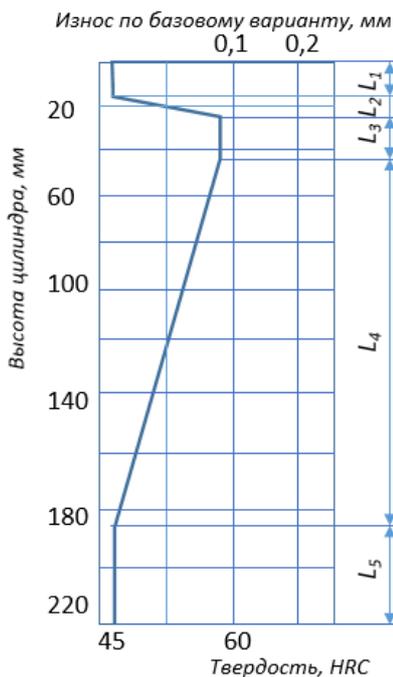


Рисунок 5 – Желаемое изменение твердости в покрытии, обеспечивающее равномерный износ рабочей поверхности цилиндра

Математическая модель распределения переменного состава покрытия по поверхности, а именно, распределения упрочняющей доли порошка $\varphi_{уп}$ по длине цилиндра x , обеспечивающее равномерный износ покрытия, представляется функцией (рис. 5):

$$\varphi_{уп} = 0 \text{ при } x \leq L1 \text{ и } x \geq i=14Li. \quad (1)$$

$$\varphi_{уп} = 50 \% \text{ при } L1+L2 < x \leq L1+L2+L3. \quad (2)$$

$$\varphi_{уп} = -\frac{50 \cdot \sum_{i=1}^4 L_i}{L_4} + \frac{50}{L_4} \cdot x \text{ при } L_1 + L_2 + L_3 < x \leq \dots \leq$$

Зависимость изменения скорости перемещения плазмотрона $v_{нап}$ по длине цилиндра x , обеспечивающая линейность профиля покрытия для случая напыления на имеющийся профиль износа (только с абразивной подготовкой поверхности под напыление без предварительного шлифования), имеет вид:

$$v_{нап} = G_{пор} \rho_{покр}(x) \cdot b \cdot \rho_{покр}, \quad (4)$$

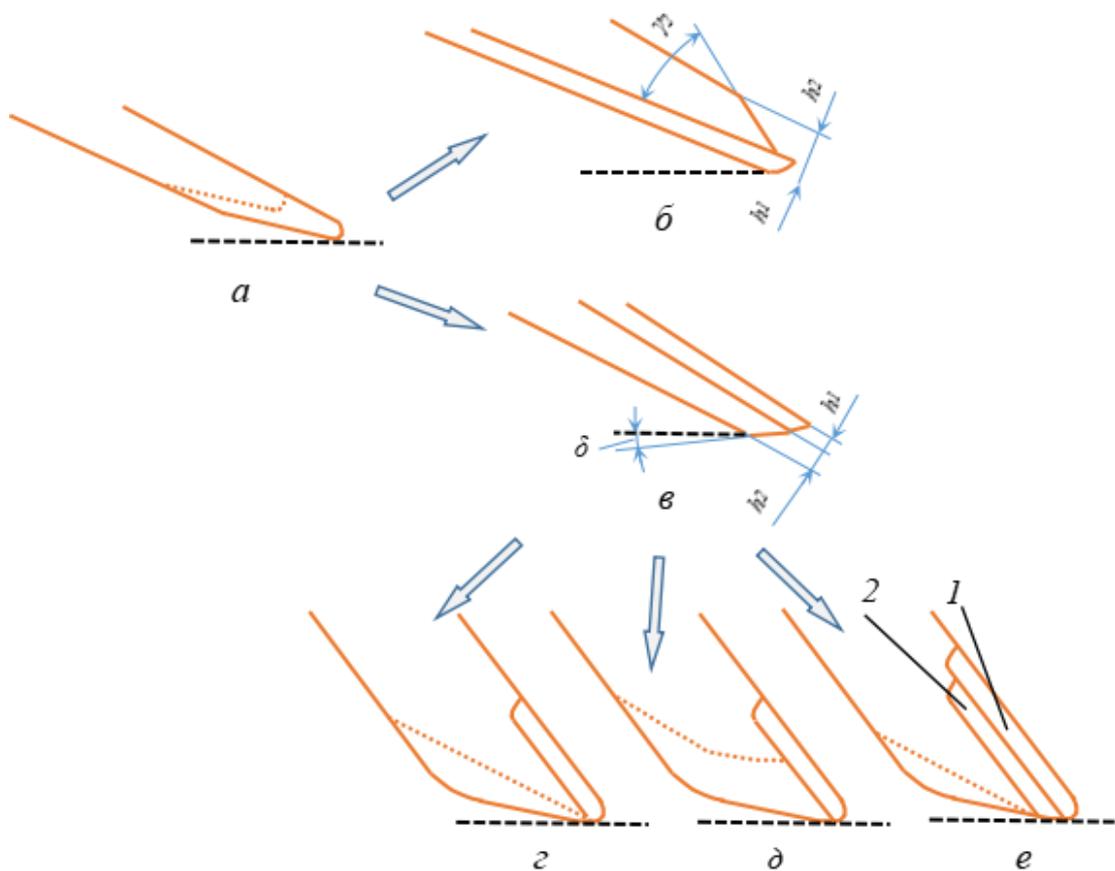
где $G_{пор}$ – расход порошка, кг/с; $\rho_{покр}$ – плотность покрытия, кг/м³;

$h_{покр}(x)$, b – толщина и ширина слоя покрытия соответственно, м.

На рис. 6 представлена схема процессов формирования структуры лезвия рабочих органов с помощью самозатачивающегося покрытия, на рис. 7 – схемы затачивания и изнашивания режущих кромок ножей рабочих органов. В частности, для схемы самозатачивания двухслойных покрытий первого рода твердый слой покрытия находится на нижней поверхности лемеха, а для повышения его прочности под ним наносят менее твердый слой (на рис. 7 не показан), а для покрытий второго рода более твердый слой наносят не переднюю поверхность лемеха под менее твердый слой.



Рисунок 6 – Схема процессов формирования многослойной структуры самозатачивающегося покрытия лезвия рабочих органов



a – базовый вариант без покрытия; *б*, *в* – лезвие с твердым покрытием 1-го и 2-го рода соответственно; *г*, *д* – наплавка передней плоскости твердым сплавом при высокой и невысокой износостойкости основного металла лезвия соответственно; *е* – наплавка в два слоя различной твердости (слой 2 более износостоек, чем слой 1); точечная линия показывает поверхность износа

Рисунок 7 – Схемы затачивания и изнашивания режущих кромок ножей рабочих органов

Для решения технологической проблемы выбора режимов была разработана физическая модель объекта исследования [14-17]. Она включает в себя процессы плазменного напыления с модулируемой косвенной дугой и обработки поверхности модулируемой прямой дугой. Новым в физ. модели является учет модуляции мощности выносной дуги плазмотрона в процессе напыления. Это создает условия, при которых покрытие дискретно (точечно) дополнительно проплавляется в локальных участках равномерно по поверхности за счет модуляции

мощности выносной дуги, что приводит к повышению прочностных свойств покрытия. На основе физической модели была разработана математическая модель комбинированного двух-дугового процесса плазменного напыления [14, 15], которая включает в себя систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих взаимодействие и движение дискретных элементов покрытия (частиц покрытия); движение дискретных элементов покрытия; кинетическую энергию дискретного элемента; теплообмен между контактирующими дискретными элементами покрытия, параметры ролика в модели; электропроводность между дискретными элементами покрытия с поверхностью основы. Данная модель была реализована одним из численных методов (модифицированным методом Эйлера-Коши [15]). Модель реализована на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7. С помощью разработанной модели были проведены серии компьютерных экспериментов и получены искомые зависимости от параметров модуляции. Последовательность проведения компьютерного эксперимента включала в себя нанесение и упрочнение двух слоев покрытия, после чего выполнялась оценка физико-механических свойств сформировавшегося покрытия.

Исходя из теоретических положений сварочных процессов академика Рыкалина Н. Н. получены выражения, определяющие условия локального проплавления покрытия в зависимости от теплового потока к нему (от параметров модуляции прямой дуги) [18].

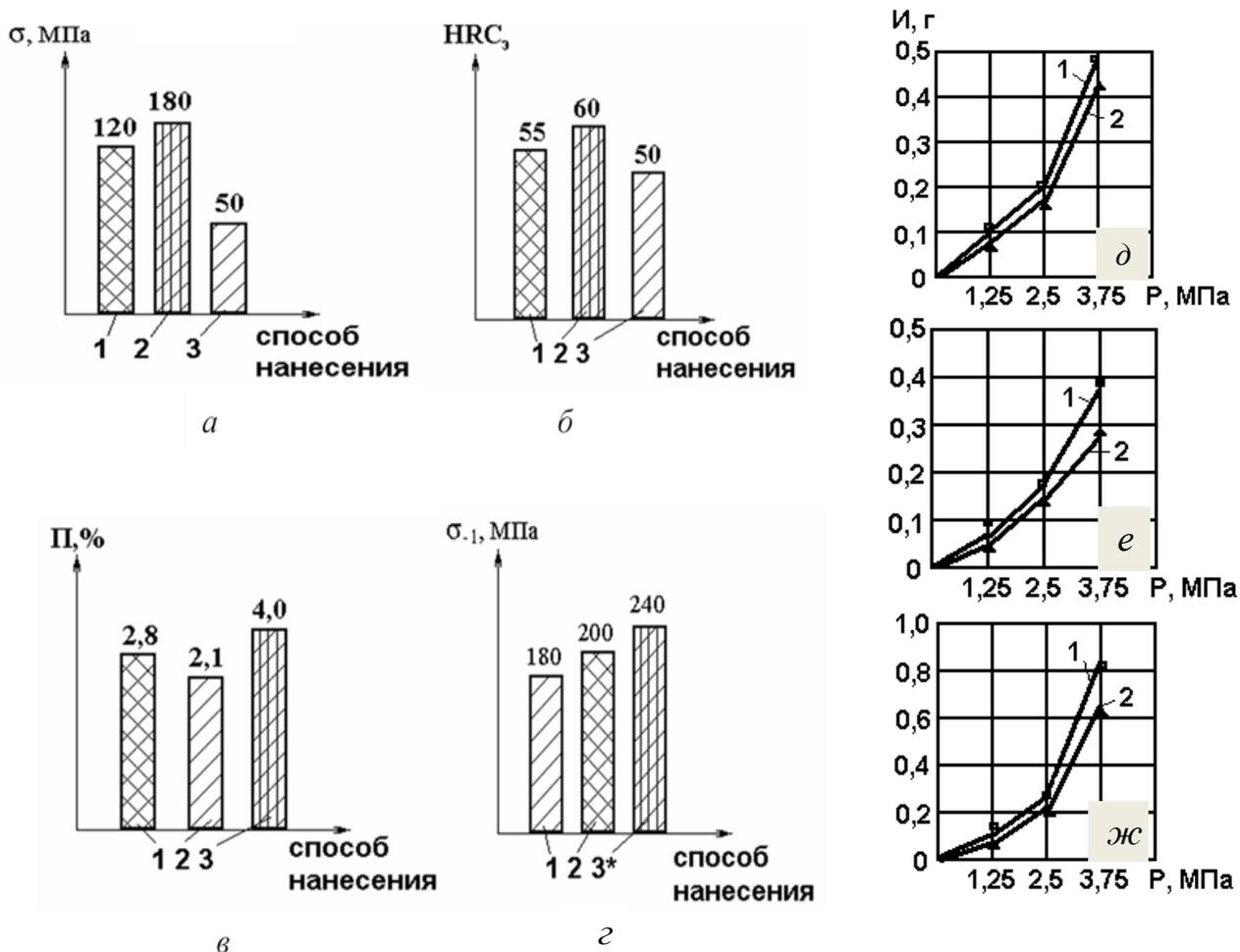
В результате теоретической проработки на основе моделирования были получены оптимальные параметры процесса плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности выносной дуги. Для исследования использовалось экспериментальное оборудование лаборатории плазменного напыления кафедры машиностроительных технологий [13]. Напыление на внутренние поверхности цилиндров реализуется по известной схеме вращения плазмотрона [19]. Схема поворотного блока, на который устанавливается плазмотрон, и схема самого плазмотрона описаны в работе [19].

3 Результаты исследований

Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и износостойкости покрытий, полученных плазменным напылением на призматические образцы, имитирующие условия работы пары «цилиндр-кольцо поршня», с модуляцией электрических параметров плазмотрона на оптимальных режимах, представлены на рис. 8. Результаты показывают, что в сравнении с базовым вариантом прочность соединения покрытия с основой, определенная методом сдвига, возрастает на 45-50 %, микротвердость, определенная на твердомере ПМТ-3, показала рост величины на 10-15 %, износостойкость, определенная на машине трения для возвратно-поступательного движения [10, 18] – на 16-26 %.

В табл. 1 и рис. 9 представлены данные порошков на основе Ni и Cr с флюсующими добавками Si и B и их полученная износостойкость для различных давлений в зоне трения. Микроструктура шлифа образца с комбинированным покрытием показала плотную структуру покрытия и наличие упрочняющих фаз в покрытии (бейнита и мартенсита) [7, 20].

На основании теоретических и экспериментальных исследований усовершенствован технологический процесс, получены рекомендации по восстановлению цилиндров с модуляцией мощности выносной дуги с использованием регулируемого переменного состава материала покрытия и разработаны технологические средства для него.

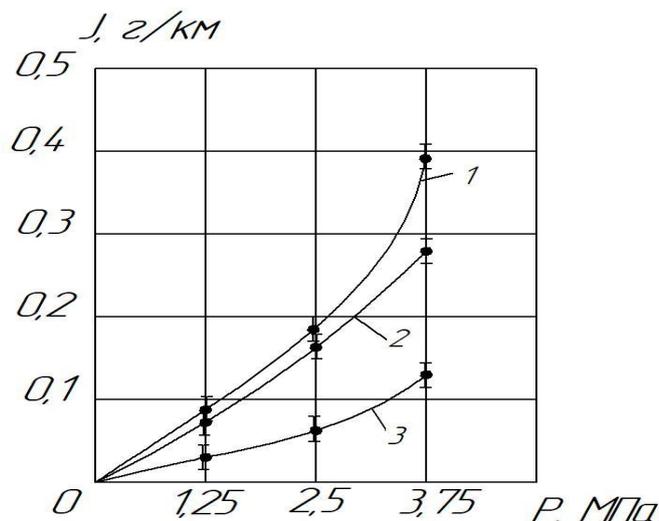


а, б, в, г – зависимости прочности соединения покрытия с основой, твердости, пористости покрытия и предела выносливости образцов с покрытием от способа нанесения покрытия соответственно; д, е, жс – износ I призматических образцов при скорости трения V , равной 0,78 м/с, 1,3 м/с и 2,6 м/с соответственно; P – давление в зоне трения; 1, 2 – покрытие, полученное напылением-наплавкой двумя дугами (косвенной и выносной) без модуляции и с модуляцией соответственно; 3 – традиционно напыленное покрытие; П – пористость; σ – прочность соединения покрытия с основой

Рисунок 8 – Результаты исследований физико-механических свойств и интенсивности изнашивания никель-хромовых покрытий ПГСР-4

Таблица 1 – Материал порошков

Марка сплава	Состав	Тпл. °С	HRC	Свойства покрытий
ПР-Н65Х25С3Р2	Ni·1.2С·25Cr·2.7Si·2.5В	1050	45-55	Высокая износостойкость, высокая коррозионная устойчивость и жаростойкость, хорошая прочность сцепления. Твёрдость и износостойкость сплавов возрастает, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния.
ПР-Н77Х15С3Р2	Ni·0.5С·15Cr·3.2Si·2В	1050	37-45	



- 1 – ПР-Н65Х25СЗР2;
 - 2 – ПР-Н65Х25СЗР2+ПР-Н77Х15СЗР2 без финишного плазменного упрочнения;
 - 3 – та же смесь порошков с финишным плазменным упрочнением;
- $v = 0,7$ м/с

Рисунок 9 – Зависимость интенсивности изнашивания J от удельного давления P [20]

На рис. 10 представлены результаты исследований интенсивности изнашивания образцов из стали Л53 для двухслойного самозатачиваемого покрытия, включающего в себя карбиды вольфрама и/или кремния. Для лабораторных испытаний использовался расточной станок 2Е78П с установленной на станине емкости радиусом 250 мм и высотой 420 мм, заполненной кварцевым песком (100-500 мкм), включающий шпиндель с вращающейся резцедер-жательной головкой, к которой с помощью кронштейнов крепились исследуемые образцы. Принципиальная схема установки для исследования износа элементов почвообрабатывающих рабочих органов в рыхлом слое абразивных частиц представлена на рис. 11 [21].

Скорость вращения составляла 30 об/мин, что соответствовало линейной скорости образцов 0,5 м/с. Путь трения составил 3000 м, время испытаний – 100 мин. Результаты испытаний (по 4 образца на одно сочетание параметров покрытий) показали повышение стойкости к изнашиванию не менее 1,5 раз. При этом профиль заточки

лезвий оставался практически неизменным (угол между кромками лезвия не менялся).

Состав материалов стали Л53 и слоев покрытий представлены в табл. 2-3.

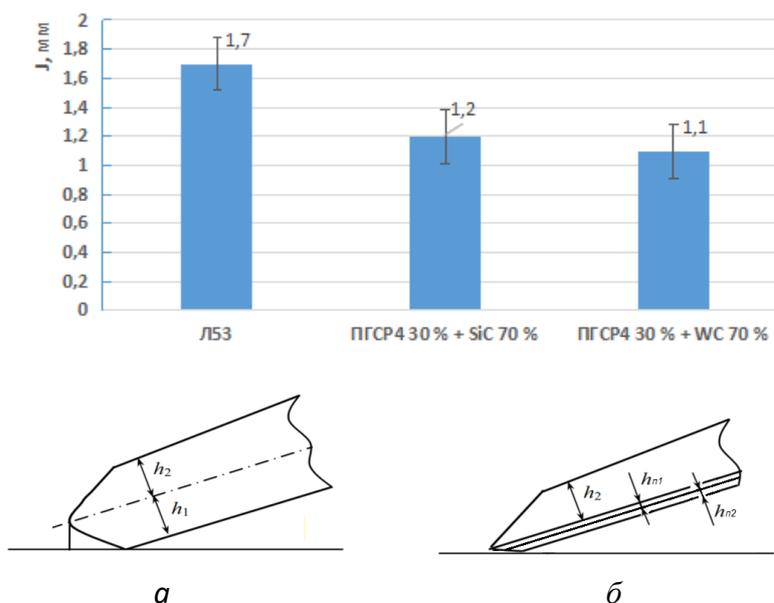
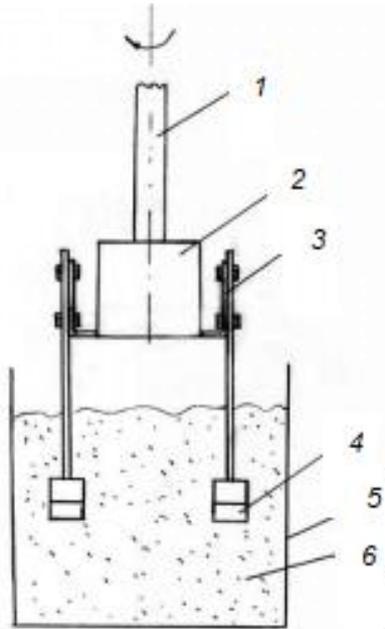


Рисунок 10 – Интенсивность изнашивания образцов и изношенные профили лезвия лемеха из материала Л53 (а) и двухслойного самозатачивающегося материала (слои h_1 и h_2 с карбидами SiC или WC, HRC $h_1 > \text{HRC } h_2$) (б)



1 – шпиндель станка; 2 – резцедержательная головка;
3 – кронштейны крепления испытываемых элементов;
4 – испытываемые элементы; 5 – емкость для абразивного материала; 6 – абразивный материал; радиус вращения образцов – 150 мм; частота вращения 30 об/мин; размеры образцов – 20х30 мм

Рисунок 11 – Схема установки для исследования износа элементов почвообрабатывающих рабочих органов в рыхлом слое абразивных частиц

Таблица 2 - Материал лемеха Л53

Материал основы	Химический состав, %					Твердость, HRC	Относительная износостойкость*, ε
	C	Si	Mn	Cr	Прочие		
Л53 (ГОСТ 12492.0-90)	0,47	0,25	0,67	0,14	—	47	1,7

* абразив - кварцевые зерна размером 0,16...0,32 мм

Таблица 3 - Материалы слоев покрытий

Вариант	Слой покрытия	Материал покрытия	Толщина слоя, мм
1	1 - высокотвердый	ПГСП4 30% + WC 70 %	2
	2 - твердый (нижний наружный)	ПГСП4	3
2	1 - высокотвердый	ПГСП4 30% + SiC 70 %	2
	2 - твердый (нижний наружный)	ПГСП4	3

Таблица 4 – Состав материалов покрытий образцов

Материал покрытия	Химический состав, %					Твердость слитка, HRC	Относительная износостойкость*, ε
	C	Si	Mn	Cr	Прочие		
ПГСП4	0,47	0,25	0,67	0,14	—	47	1,7
WC	0,65	0,25	1,0	0,14	Ni-0,20 Cu-0,18	~90	1,9
SiC	< 0,4	-	-	-	Fe < 0,7	~90	1,9

* абразив - кварцевые зерна размером 0,16...0,32 мм

Восстановление рабочих поверхностей цилиндров двигателей КАМАЗ-740 с помощью плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности плазмотрона и использования регулирования переменного состава покрытия позволило получить технико-экономически

108000 р. при годовой программе 1000 ед. в сравнении с технологией традиционного плазменного напыления. Оценка срока экономической окупаемости затрат на нанесение износостойких материалов покрытия на режущие кромки составила 1 год с учетом повышения ресурса лемехов при снижении тяговых усилий (и соответствующей мощности и работы) движителя.

4 Обсуждение и заключение

Управление составляющими комбинированного процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с использованием модуляции параметров позволяет обеспечивать заданную долговечность изнашиваемых поверхностей трения и сопряжений:

– для деталей пар трения с помощью комбинированного процесса плазменного напыления-наплавки самофлюсующегося порошка переменного состава на основе Ni, Cr с вариациями В и Si и последующей термо- или электромеханической обработки;

– для режущих кромок рабочих органов с помощью плазменной наплавки порошковой смеси переменного состава, включающего самофлюсующийся порошок на основе Ni+Cr и WC или CrC.

Анализ информации по технологиям восстановления цилиндров ДВС автомобилей нанесением покрытий показал ограниченность традиционных технологий по их производительности и качеству получаемых покрытий. К числу основных причин указанных недостатков являются то, ранее не учитывалась возможность обеспечения равномерности изнашивания рабочей поверхности цилиндра на всех его участках, что не позволяло увеличить ресурс цилиндра. Данную задачу предложено решать регулированием добавления высокоизносостойкого порошка к основному менее износостойкому порошку в зависимости от продольной координаты цилиндра. Использование при этом регулирования скорости подачи плазмотрона позволяет обойтись без операции предварительного шлифования перед напылением покрытия и уменьшить трудоемкость получения покрытия, а также снизить расход порошковой смеси.

Предложено совершенствование плазменного нанесения покрытий с помощью использования модуляции мощности плазмотрона при восстановлении цилиндров, что позволяет повышать прочность соединения покрытия с основой до заданных значений.

Результаты исследований показали заметное преимущество нового метода плазменного нанесения покрытий с модуляцией мощности плазмотрона в сравнении с традиционным плазменным напылением, заключающееся в снижении удельных производственных расходов на их восстановление, в том числе за счет использования переменного состава порошковой смеси при напылении, на 19 % по сравнению с традиционной технологией с заметным экономическим эффектом.

Двух- и многослойные режущие элементы рабочих органов машин позволяют обеспечивать повышение их износостойкости и стабильности качества выполняемых работ за счет эффекта самозатачиваемости, вследствие чего обеспечивается стабильность тягового сопротивления и потребляемой мощности движителя. Лабораторные исследования изнашивания образцов из стали Л53 без покрытий и с карбидными покрытиями в условиях песчаной среды показали повышение износостойкости последних в 1,5 и более раз. При этом профиль сечения лезвия не менялся (угол между кромками лезвия не менялся). Оценка срока экономической окупаемости затрат на нанесение износостойких материалов покрытия составила 1 год с учетом повышения ресурса лемехов при снижении тяговых усилий (и соответствующей мощности и работы) движителя.

Список литературы

1 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с. – ISBN 5-02-006040-2.

2 Сулов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Сулов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др. М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

3 Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». - 2-е изд., перераб. и доп. -

М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 360 с.

4 Балдаев, Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. Москва, Изд-во «КХТ», 2004. – 134 с.

5 Кравченко, И. Н. Разработка технологии нанесения плазменных покрытий многофункционального назначения / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, Ю. А. Шамарин, Т. А. Чеха // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2017. №6(82). – С. 63-71.

6 Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

7 Kadyrmetov, A.M. Peculiarities of processes of gas-flame application and strengthening of variable composition coatings on friction assemblies / Anvar Kadyrmetov, Julia Simonova, Mikhail Neifitz, Svetlana Yakenko // Materials Today: Proceedings doi: 10.1016 / j. matpr.2020.08.208. – pp. 1-10, – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320360740?via%3Dihub> .

8 Кадырметов, А. М. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, А. А. Плахотин, Д. В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 9-й Международной научно-практической конференции (28 декабря 2019 года) / Юго-Зап. гос. ун-т.; в 2-х томах. Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос.ун-т, 2019. – С. 226-238.

9 Кадырметов, А. М. Управление эффективностью газодинамических процессов газопламенного напыления / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, Е. В. Снятков, А. А. Плахотин // В сборнике: Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении. Материалы XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей. 2020. – С. 45-56.

10 Кадырметов, А. М. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах [Текст] / А. М. Кадырметов, Станчев Д. И., Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №7(67). – С. 29-36.

11 Сухочев, Г. А. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой [Текст] / Г. А. Сухочев, О. Н. Кириллов, А. М. Кадырметов, Д. М. Небольсин, Е. Г. Смольяникова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. - №8(68) . – С. 39-44.

12 Кадырметов, А. М. Методы плазменного, с модуляцией электрических параметров, нанесения и упрочнения покрытий [Текст] / А. М. Кадырметов // Автомобильная промышленность. – 2010. – №8 С. 37-39.

13 Кадырметов, А. М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Станчев Д. И., Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №11(71) . – С. 41-48.

14 Кадырметов, А. М. Физическая модель механизмов динамизации процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий с помощью модуляции электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев, Д. А. Попов // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – №10. – С. 19-26.

15 Кадырметов, А. М. Моделирование процесса плазменного напыления покрытий на детали транспортных машин в режиме модуляции мощности дуги плазматрона / А. М. Кадырметов, М. В. Драпалюк, В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №10(84). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/19.pdf>, 0,625 у.п.л.

16 Кадырметов А. М. Математическая модель тепловых процессов плазменного напыления с электромеханической обработкой покрытий / А. М. Кадырметов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета

(Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №04(88). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/24.pdf> , 1,438 у.п.л.

17 Кадырметов, А. М. Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №8. – С. 39-43.

18 Кадырметов, А. М. Упрочнение напыляемых плазменных покрытий импульсной модуляцией мощности выносной дуги плазматрона [Текст] / А. М. Кадырметов, Е. В. Смоленцев, А. Ф. Мальцев, Г. А. Сухочев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 336-341.

19 Кадырметов, А. М. Технологическое обеспечение восстановления типовых деталей ДВС плазменным нанесением и упрочнением покрытий / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Н. Бухтояров, К. А. Радыгин, А. К. Андрющенко, И. А. Кичатов // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – №2 (32). – С. 177-190. Режим доступа : <http://vestnikvgtu.ru/gallery/177-190.pdf>

20 Симонова, Ю.Э. Технология нанесения на рабочие поверхности узлов трения покрытий переменного состава / Ю. Э. Симонова // Автореф. дис.на соискание уч. степени канд. техн. наук. - Воронеж, 2020. - 19 с.

21 Фаюршин, А.Ф. От полевых испытаний к лабораторным / А.Ф. Фаюршин, Р. Ф. Масыгутов, А. Д. Мусин // Достижения науки и инновации для аграрного производства : материалы национальной научной конференции, 8-9 февраля 2016 г. - Уфа : Башкирский ГАУ, 2016. - С. 148-155.

References

1 Kudinov, V.V. Plasma coating / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V.E. Belashchenko, etc. - M.: Nauka, 1990. - 408 p. – ISBN 5-02-006040-2.

2 Suslov, A. G. Surface engineering of parts / A. G. Suslov, V. F. Bezyazychny, Yu. V. Panfilov, etc. M.: Mechanical Engineering, 2008. – 320 p.

3 Puzryakov, A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology: Textbook. manual for the course “Technology of structures made of metal composites.” - 2nd ed., revised. and additional - M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2008. - 360 p.

4 Baldaev, L.Kh. Renovation and strengthening of machine parts using thermal spraying methods. Moscow, KHT Publishing House, 2004. – 134 p.

5 Kravchenko, I. N. Development of technology for applying multifunctional plasma coatings / I. N. Kravchenko, M. A. Glinsky, Yu. A. Shamarin, T. A. Chekha // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agricultural Engineering University named after V.P. Goryachkin." 2017. No. 6(82). – P. 63-71.

6 Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying. M.: Mechanical Engineering, 1985. 240 p.

7 Kadyrmetov, A.M. Peculiarities of processes of gas-flame application and strengthening of variable composition coatings on friction assemblies / Anvar Kadyrmetov, Julia Simonova, Mikhail Heifitz, Svetlana Yakenko // Materials Today: Proceedings doi: 10.1016 / j. matpr.2020.08.208. – pp. 1-10, - Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320360740?via%3Dihub>.

8 Kadyrmetov, A. M. Modern technologies of plasma and gas-thermal coating processes in an open atmosphere / A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, A. A. Plakhotin, D. V. Kolmakov // Modern materials, equipment and technology : collection of scientific articles of the 9th International Scientific and Practical Conference (December 28, 2019) / South-West. state University; in 2 volumes. Volume 1. – Course: South-West. State University, 2019. – pp. 226-238.

9 Kadyrmetov, A. M. Control of the efficiency of gas-dynamic processes of gas-flame spraying / A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, E. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin // In the collection: Innovative technologies in transport and chemical engineering. Materials of the XII International Scientific and Technical Conference of the Association of Mechanical Technologists. 2020. – pp. 45-56.

10 Kadyrmetov, A. M. Technology of plasma application and hardening of coatings in resource-saving production processes [Text] / A. M. Kadyrmetov, Stanchev D. I., G. A. Sukhochev // Hardening technologies and coatings. – 2010. – No. 7(67). – pp. 29-36.

11 Sukhochev, G. A. Technological assurance of the quality of application of protective coatings by combined processing [Text] / G. A. Sukhochev, O. N. Kirillov, A. M. Kadyrmetov, D. M. Nebolsin, E. G. Smolyannikova // Strengthening technologies and coatings. – 2010. – No. 8(68). – pp. 39-44.

12 Kadyrmetov, A. M. Methods of plasma, with modulation of electrical parameters, application and hardening of coatings [Text] / A. M. Kadyrmetov // Automotive industry. – 2010. – No. 8 P. 37-39.

13 Kadyrmetov, A. M. Equipment for plasma application and hardening of coatings with modulation of electrical parameters [Text] / A. M. Kadyrmetov, Stanchev D. I., G. A. Sukhochev // Hardening technologies and coatings. – 2010. – No. 11(71). – pp. 41-48.

14 Kadyrmetov, A. M. Physical model of the mechanisms of dynamization of processes of plasma deposition and hardening of coatings using modulation of electrical parameters [Text] / A. M. Kadyrmetov, G. A. Sukhochev, A. F. Maltsev, D. A. Popov // High technologies in mechanical engineering. – 2013. – No. 10. – pp. 19-26.

15 Kadyrmetov, A. M. Modeling the process of plasma spraying of coatings on parts of transport vehicles in the mode of modulating the power of the plasmatron arc / A. M. Kadyrmetov, M. V. Drapalyuk, V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov // Polythematic Network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubSAU) [Electronic resource]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – No. 10 (84). – Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/19.pdf>, 0.625 u.p.l.

16 Kadyrmetov A. M. Mathematical model of thermal processes of plasma spraying with electromechanical processing of coatings / A. M. Kadyrmetov // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific journal of KubSAU) [Electronic resource]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – No. 04 (88). – Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/24.pdf>, 1,438 u.p.l.

17 Kadyrmetov, A. M. Modeling the quality of coatings obtained by plasma spraying with simultaneous electromechanical processing [Text] / A. M. Kadyrmetov, G. A. Sukhochev, A. F. Maltsev // Hardening technologies and coatings. – 2013. – No. 8. – P. 39 43.

18 Kadyrmetov, A. M. Strengthening of sprayed plasma coatings by pulse modulation of the power of the external arc of a plasmatron [Text] / A. M. Kadyrmetov, E. V. Smolentsev, A. F. Maltsev, G. A. Sukhochev // Bulletin of the Voronezh State Technical University university. – 2014. – T. 10. – No. 1. – P. 336-341.

19 Kadyrmetov, A. M. Technological support for the restoration of standard internal combustion engine parts by plasma application and hardening of coatings / A. M. Kadyrmetov, E. V. Snyatkov, V. N. Bukhtoyarov, K. A. Radygin, A. K. Andryushchenko, I. A. Kichatov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – No. 2 (32). – pp. 177-190. Access mode: <http://vestnik-vglta.ru/gallery/177-190.pdf>.

20 Simonova, Yu.E. Technology of applying coatings of variable composition to the working surfaces of friction units / Yu. E. Simonova // Author's abstract. diss. for academic qualifications Ph.D. degrees tech. Sci. - Voronezh, 2020. - 19 p.

21 Fayurshin, A.F. From field tests to laboratory tests / A.F. Fayurshin, R.F. Masyagutov, A.D. Musin // Achievements of science and innovation for agricultural production: materials of the national scientific conference, February 8-9, 2016 - Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2016. - pp. 148-155.

© Плахотин А. А., Кадырметов А. М., Попов Д.А., 2023 г.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-48-59



УДК 621.793

UDC 621.793

2.5.6 – технология машиностроения

ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ

STUDIES OF THE ADHESIVE STRENGTH OF VIBRATIONAL MECHANOCHEMICAL COATINGS AND THEIR EFFECT ON THE CORROSION RESISTANCE OF PARTS

✉¹ **Лебедев Валерий Александрович**, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: va,ledidev@yandex.ru

✉¹ **Lebedev Valery Alexandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Metal-cutting Machines and Tools", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: va,ledidev@yandex.ru

Штын Сергей Юрьевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: sshtyn@bk.ru

Shtyn Sergey Yurievich, postgraduate students of the Department of "Mechanical Engineering Technologies", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: sshtyn@bk.ru

Кукаркин Илья Дмитриевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: ilya.kukarkin@yandex.ru

Kukarkin Ilya Dmitrievich, postgraduate students of the Department of "Mechanical Engineering Technologies", Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: ilya.kukarkin@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований адгезионной прочности вибрационных механохимических покрытий и их влияние на коррозионную стойкость деталей. Установлена связь коррозионной стойкости, оцениваемой показателем проницаемости, с адгезионной прочностью покрытия и предложена эмпирическая зависимость, позволяющая на этапе технологической подготовки производства оценить эксплуатационные характеристики изделия.

Annotation. The results of experimental studies of the adhesive strength of vibrational mechanochemical coatings and their effect on the corrosion resistance of parts are presented. The relationship between the corrosion resistance of the estimated permeability index and the adhesive strength of the coating is established and an empirical dependence is proposed that allows evaluating the operational characteristics of the product at the stage of technological preparation of production.

Ключевые слова: ВИБРАЦИОННОЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ, АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ.

Keywords: VIBRATION MECHANOCHEMICAL COATING, ADHESIVE STRENGTH, CORROSION RESISTANCE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Отличительной особенностью вибрационных механохимических покрытий (ВиМХП) от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударноимпульсного воздействия инденторов. В результате динамического воздействия обеспечивается активация химических процессов, протекающих в поверхностном слое, происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик. Основными факторами, определяющими механизм формирования покрытия на поверхности металлов, являются: природа контактирующих материалов и их физико-химические свойства; степень участия металлической основы в образовании покрытия; условия формирования покрытий, обусловленные амплитудно-частотными параметрами виброволнового воздействия, видом и гранулометрическими характеристиками инденторов, уровнем создаваемых в зоне контакта динамических нагрузок [1-8].

Процесс формирования вибрационных механохимических покрытий является термодинамическим, представляющим собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла явлений под воздействием механических внешних сил, а также химических и физико-химических явлений [1,9-13]. Результатом химических и физико-химических превращений в зоне взаимодействия компонентов соединения под влиянием механических воздействий является адгезия, основными характеристиками которой являются: энергия адгезии, прочность сцепления и сила адгезии [9,12,13,15,16,19]. Учитывая, что прочность соединения покрытия с подложкой является следствием адгезии, в качестве фундаментальной энергетической характеристики U_0 , определяющей прочность формируемого на поверхности металла покрытия, предложена средняя энергия единицы связи E_A , которая обеспечивает адгезию локального микрообъёма покрытия, модифицированного путём механохимического синтеза, на границе раздела контактирующих сред. Установление связи эксплуатационных свойств с прочностью покрытий, сформированных в вибрационных механохимических воздействиях, является одним из целевых предназначений настоящего исследования

2 Материалы и методы

Для экспериментальных исследований был выбран процесс нанесения цинкового покрытия, которое решает одну из важнейших эксплуатационных задач повышения коррозионной стойкости поверхностей деталей. Для оценки коррозионной стойкости поверхностных слоёв, модифицированных в процессе нанесения ВиМХП, предложен параметр проницаемости $П_E$ в виде:

$$П_E = 8,76 (\Delta m) / (K_E \cdot \rho_d), \text{ мм}$$

где Δm – потери массы детали, отнесенные к площади поверхности, г/м²; K_E – коэффициент влияния адгезии на изменение плотности модифицированной поверхности; ρ_d – плотность материала детали, кг/м³.

Покрытие наносилось на цилиндрические образцы, изготовленные из материала Ст25, Ст35 и Ст45 диаметром 10 мм, толщиной 5 мм и с шероховатостью поверхности Ra 1,25 мкм в цилиндрической рабочей камере объёмом 0,5 л, которая устанавливалась на виброплатформе опытно-экспериментальной вибрационной установки УВГ 4х10. В качестве технологической среды покрытия использована цинковая суспензия, состоящая из воды, порошка Zn марки ПЦ-2 (ГОСТ – 3640-79), содержащего в %: Zn- 99,95; Pb-0,036; Cd-0,01; Sn-0,004 и порошка хлористого цинка ZnCl₂. Приготовление цинковой суспензии предусматривало растворение в 1 литре воды 50-150 гр. порошка хлористого цинка ZnCl₂ и 50-250 гр. порошка Zn марки ПЦ-2, при этом вязкость получаемого раствора должна быть в пределах $\geq 8,94 \cdot 10^{-4}$ Па·с. Для активации процесса формирования покрытия поверхности

металлических образцов использовались инденторы в виде металлических шариков диаметром 2-6 мм и фарфоровых шариков диаметром 6-9 мм. Время обработки варьировалось от 20 до 40 мин.

Исследование адгезионной прочности вибрационного механохимического покрытия проводилось на оборудовании наноцентра ДГТУ: установка Nanotest 600, сканирующий зондовый микроскоп «Nanoeducator». Прочность адгезии при использовании метода наноиндентирования [14] рассчитывалась по зависимости, связывающей ее с критической латеральной нагрузкой F_l^c начала отрыва пленки от подложки следующим образом:

$$G = \frac{(F_l^c)^2 \delta}{\pi r_c^4 E_f}, \text{ Дж/моль} \quad (19)$$

где r_c – радиус пятна контакта в момент начала отслаивания покрытия, мм; δ – толщина покрытия, мм; E_f – модуль Юнга покрытия, Па.

Для определения толщины нанесенного покрытия использовался толщиномер ТМ-3 с диапазоном измеряемых толщин от 0 до 100 мкм, точность измерений прибора равна 3 % от фактических показаний. Оценка размера радиуса пятна контакта индентора с образцом в момент начала отслаивания покрытия осуществлялись на металлографическом микроскопе, оснащенный тринокулярной визуальной насадкой с видимым увеличением от 40 до 400 раз.

Испытания на коррозионную стойкость проводились на стенде СИС-46. Для определения массы образцов при исследовании коррозионной стойкости использовались аналитические весы SHINKO AF с разрешением до 0,01 мг.

3 Результаты исследований

Первоочередной задачей экспериментальных исследований по оценке влияния механической активации на процесс формирования покрытия и его адгезионную прочность являлось обоснование условий, обеспечивающих её эффективное проявление. В ранее проведенных экспериментах в НИИ «Вибротехнологии» ДГТУ, установлено, что технологический эффект вибрационной отделочно-упрочняющей обработки наблюдается при величине пороговой амплитуды колебаний рабочей камеры $A_0 = 1$ мм и частоте колебаний рабочей камеры $f_0 = 10-15$ Гц [10,11]. С целью обоснования приемлемости этих пороговых значений амплитуды и частоты колебаний рабочей камеры для оценки эффективности влияния механической активации на процесс формирования вибрационных механохимических покрытия была проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты исследований по установлению пороговой частоты колебаний рабочей камеры, обеспечивающей эффективное влияние механической активации на процесс формирования ВиМХЦП

Технолог. регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – стальные шары 6 мм	Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$	60,3-66,8	61,93-68,2	64,8-70,0	65,8-71,0
	$G_{\text{эксп. ср}}$	63,4	64,8	67,0	67,8
	$G_{\text{расч.}}$	69,0	70,7	72,8	73,7
	Погрешность, %	8,6	8,9	8,5	8,6

Таблица 2 – Результаты исследований по установлению пороговой амплитуды колебаний рабочей камеры, обеспечивающей эффективное влияние механической активации на процесс формирования ВиМХЦП

Технолог. регламенты	Показатели	Амплитуда колебаний рабочей камеры, мм			
		1	1,5	2	2,5
Образец из стали 35, частота – 33 Гц; индентор – стальные шары 6 мм	Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$	65,8-65,9	66,0-66,3	66,5-67,2	67- 68,2
	$G_{\text{эксп. ср}}$	65,85	66,15	66,85	67,7
	$G_{\text{расч.}}$	69,76	70,2	71,75	72,5
	Погрешность, %	5,9	6,1	7,3	7,0

Результаты исследований влияния уровня механической активации процесса на адгезионную прочность покрытия приведены в табл. 3 и табл. 4, а характерная для них закономерность показана на рис. 1.

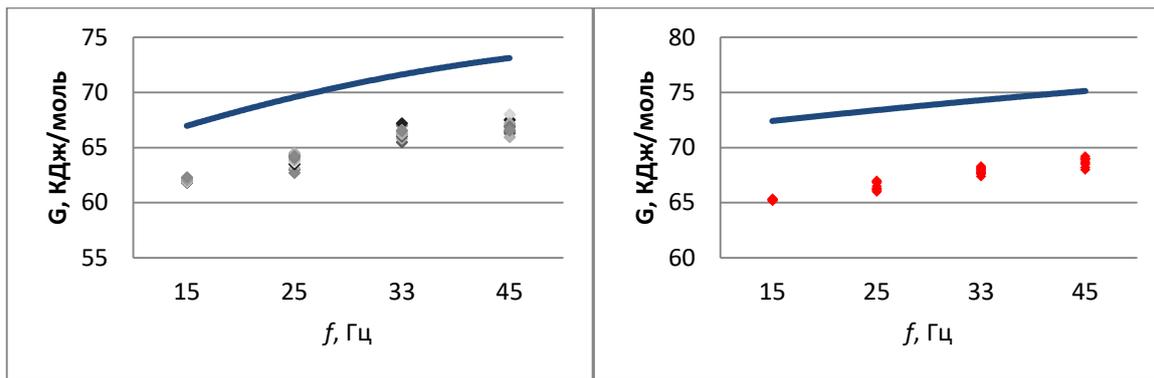
На рис. 2 построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме модифицированного в процессе механохимического синтеза поверхностного слоя покрытия при его нанесении в вибрационной технологической системе, определяющей его адгезионную прочность в зависимости от изменения энергетического состояния инденторов рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия.

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия фарфоровых инденторов диаметром 6 мм на различных частотах колебаний рабочей камеры

Технолог. регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; инденторы – фарфоровые шары диаметром 6-9 мм	Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$	61,8-62,3	62,7-64,5	65,5-67,2	65,95-68
	$G_{\text{эксп. ср}}$	62,05	63,7	66,34	66,87
	$G_{\text{расч.}}$	67,2	68,9	72,3	72,9
	Погрешность, %	8,2	8,1	8,9	9,0

Таблица 4 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия стальных инденторов диаметром 6 мм на различных частотах колебаний рабочей камеры

Технолог. регламенты	Показатели	Частота колебаний рабочей камеры, Гц			
		15	25	33	45
Образец из стали 35, амплитуда – 2 мм; инденторы – стальные шары 2-6 мм	Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$	65,2-65,4	66-67	67,4-68,3	68,2-69,2
	$G_{\text{эксп. ср}}$	65,3	66,5	67,87	68,7
	$G_{\text{расч.}}$	72,35	73,6	74,1	75,2
	Погрешность, %	10,7	10,6	9,1	9,4



а)

б)

$A = 2,5$ мм, $t = 40$ мин, концентрация технологической среды 50 г/л порошка Zn ПЦ-2 ГОСТ 360-79:
 а) фарфоровые шары диаметром Ø6-9 мм; б) стальные шары диаметром Ø2-6 мм

Рисунок 1 – Зависимость адгезионной прочности покрытия Ст35-Zn от частоты колебания рабочей камеры

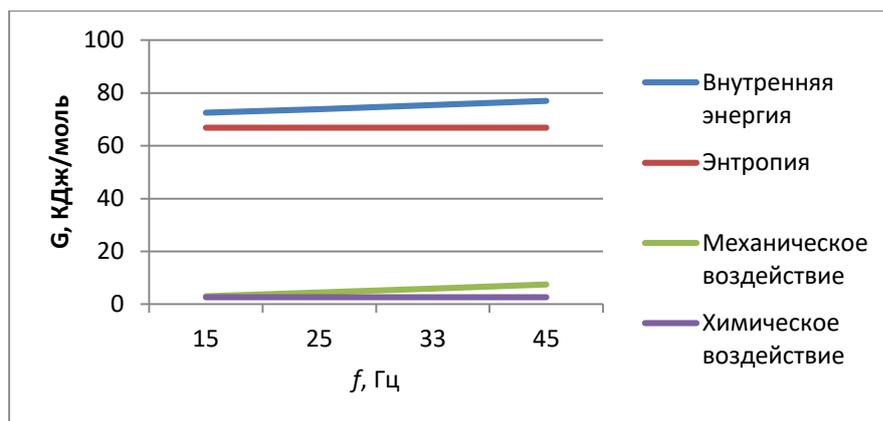


Рисунок 2 – Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъёме ВиМХЦП при изменении энергетического состояния инденторов и рабочей среды, активирующей процесс формирования покрытия

Для установления влияния химической активности технологической среды покрытия на формирование ВиМХЦП и его адгезионную прочность важно было обосновать условия проведения экспериментальных исследований, позволяющих в рамках однофакторного эксперимента оценить адекватность аналитической зависимости, пригодной для её описания. Для этого время вибрационной механохимической обработки, обуславливающее величину энергии за счёт роста энтропии, было выбрано постоянным, а значения амплитудно-частотных характеристик колебаний рабочей камеры – на уровне пороговых. Изменяя концентрацию структурных составляющих цинкового раствора и, как следствие, его химическую активность экспериментально изменялась адгезионная прочность покрытия в соответствии с расчётной оценкой согласно [15]. Результаты исследований влияния химической активности цинкового раствора на адгезионную прочность покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе представлены в табл. 5 и на рис. 3.

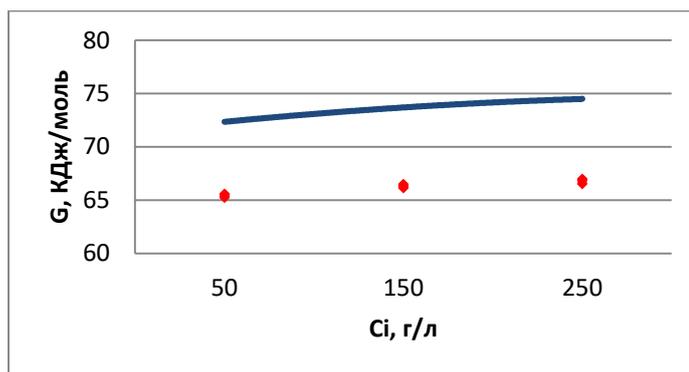


Рисунок 3 – Зависимость адгезионной прочности цинкового ВиМХЦП от концентрации цинкового раствора для образцов из стали Ст35; $A = 2,5$ мм, $f = 25$ Гц; $t = 40$ мин, инденторы – стальные шары диаметром $\varnothing 2-6$ мм

Таблица 5 – Экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, полученные на образцах из стали 35 в результате ударно-импульсного воздействия фарфоровых инденторов диаметром 6 мм при частоте колебаний рабочей камеры $f = 15$ Гц, амплитуде $A = 2,5$ мм, времени обработки $t = 40$ мин и применении различной по составу технологической среды покрытия

Технологические регламенты	Показатели	Состав технологической среды покрытия		
		Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 50 г/л	Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 150 г/л	Вода - 1л; порошок Zn марки ПЦ2 - 100 г/л; порошок ZnCl ₂ - 250 г/л
Образец из стали 35, инденторы - фарфоровые шары диаметром 6-9 мм	Диапазон изменения, $G_{\text{эксп}}$	65,2-65,6	66,1-66,5	66,5-67
	$G_{\text{эксп. ср}}$	65,45	66,34	66,81
	$G_{\text{расч.}}$	72,35	73,7	74,5
	Погрешность, %	10,5	11,0	11,5

На рис. 4 по результатам проведенных исследований построена диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъеме поверхностного слоя, модифицированного в процессе механохимического синтеза нанесения покрытия в вибрационной технологической системе, определяющей его адгезионную прочность в зависимости от изменения химической активности технологической среды покрытия.

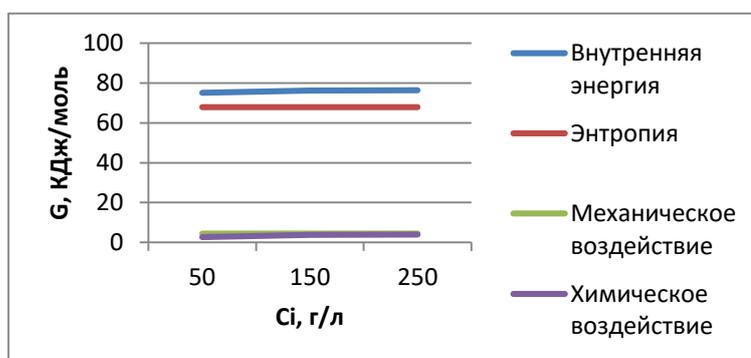


Рисунок 4 – Диаграмма накопления внутренней энергии в локальном микрообъеме ВиМХЦП при изменения химической активности технологической среды покрытия

В работах [12,13,15,20,21] показано, что одну и ту же адгезионную прочность покрытия можно обеспечить в результате варьирования энергетического вклада в процесс формирования покрытия химического взаимодействия технологической среды покрытия с металлом и механического воздействия инденторов на поверхность, подвергаемую нанесению покрытия.

С целью обоснования возможности управления механохимическим синтезом в процессе нанесения покрытий путем регулирования механических и химических параметров, проведено сравнение технологических регламентов нанесения ВиМХЦП, обеспечивающих достижение одинаковых по величине значений адгезии, приведённых в табл. 6.

Таблица 6 – Примеры технологических регламентов, обеспечивающих достижение одинаковых по величине значений адгезионной прочности G для ВиМХЦП, Дж/моль, на образцах из стали 35

Технологический регламент	Вклад технологических факторов в энергетическое состояние ВиМХЦП, Дж/моль			Адгезионная прочность ВиМХЦП, Дж/моль		Погрешность, %
	Тепловой эффект	Химическая реакция	Механическая активация	$G_{\text{эксп. ср}}$	$G_{\text{расч.}}$	
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; инденторы – фарфоровые шары диаметром 9 мм, управление изменением частоты f	60,48	2,69	9,13	66,34	72,3	8,9
Образец из стали 35, амплитуда – 2,5 мм; индентор – стальные шары диаметром 2-6 мм, управление изменением амплитуды A	65,12	2,89	4,34	65,3	72,35	10,7
Образец из стали 35, инденторы – фарфоровые шары диаметром 9 мм, управление концентрацией $ZnCl_2$	65,84	2,17	4,34	65,45	72,35	10,5

С целью установления зависимости коррозионной стойкости опытных образцов от адгезионной прочности получаемого покрытия, для ряда покрытий полученных при проведении вышеизложенных исследований экспериментальных исследований по установленным регламентам (табл. 7) были определены расчетные значения параметра проницаемости покрытия $P_{\text{ЕЛОК}}$ и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности модифицированного поверхностного слоя K_E , которые представлены в табл. 8.

Таблица 7 – Технологические регламенты получения ВиМХЦП

№ технологического регламента	Материал образцов	Материал инденторов	Технологическая среда		частота f , Гц	Амплитуда A , мм	Время t , мин
			порошок Zn ПЦ-2 ГОСТ 360-79, г/л	водный раствор $ZnCl_2$, г/л			
1	Ст45	фарфор	100	150	15	2,5	40
2	Ст35	фарфор	50	100	33	2,5	40
3	Ст45	фарфор	100	250	15	2,5	40
4	Ст25	фарфор	100	250	15	2,5	40
5	Ст35	сталь	50	100	45	2,5	40
6	Ст45	сталь	50	100	45	2,5	40

Таблица 8 – Экспериментальные значения параметра проницаемости и коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя образцов модифицированной в процессе нанесения ВиМХЦП

Технологический регламент	$G_{\text{эксп. ср.}}$ Дж/моль	Параметр проницаемости, мм/год		K_E
		$P_{\text{Еисх}}$	$P_{\text{Епок}}$	
1	63,8	0,00419	0,00032	13,09
2	66		0,00018	23,28
3	66,5		0,00014	29,93
4	67,1		0,00012	34,92
5	67,9		0,00011	38,09
6	68,7		0,0001	41,90

4 Обсуждение и заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

– изменение частоты колебаний рабочей камеры в диапазоне от 15 Гц до 45 Гц, приводит к увеличению вклада механической активации в энергетическое состояние формируемого цинкового покрытия на поверхности образцов из стали 25, 35 и 45 и, как следствие, к росту его адгезионной прочности. Это подтверждает экспериментально установленный в многочисленных работах факт, что при увеличении уровня механического воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность повышается плотность дефектов структуры материала в поверхностном слое, его внутренняя энергия и энергия взаимодействия частиц материала детали и наносимого покрытия;

– применяемые для проведения экспериментальных исследований материалы, существенного влияния на повышение механической активации процесса формирования цинкового покрытия и его адгезионную прочность не оказали, в связи с незначительными отличиями по физико-механическим свойствам. Вместе с тем, результаты теоретических исследований, получившие отражение в аналитической модели технологической системы вибрационной механохимической обработки [12,13,20] предполагают, что с ростом твёрдости материала, подвергаемого покрытию, механическая активация процесса будет снижаться;

– применение в качестве гранулированной среды инденторов из стали ШХ15 позволяет повысить механическую активацию процесса формирования и обеспечить в среднем прирост адгезионной прочности от 0,5% до 3% по отношению к обработке с фарфоровыми шарами. Это объясняется тем, что при воздействии стальными шарами уровень механической активации поверхности детали выше за счет большей массы стальных инденторов;

– расхождение экспериментальных и расчётных значений адгезионной прочности находится в пределах экспериментальной ошибки (4,8-16 %), что свидетельствует о том, что разработанные для определения адгезионной прочности энергетические модели учитывают входящие в них параметры процесса с постоянной величиной, без учета их возможной нестабильности в реальном процессе, такие как твердость, модуль упругости и другие.

Из представленной на рис. 2 диаграммы следует, что вклад механической активации в изменение энергетического состояния локального объёма цинкового покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе, в пределах продолжительности обработки, установленной планом экспериментальных исследований, составляет 9,78 % от общей величины адгезионной прочности ВиМХЦП.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что при увеличении концентрации раствора $ZnCl_2$ в составе технологической среды покрытия приводит к росту числа химически активных частиц и, как следствие, к числу химических связей с обрабатываемой поверхностью образцов, обуславливающих повышение адгезионной прочности покрытия.

Сравнительный анализ результатов исследований показал, что экспериментальные значения адгезионной прочности превышают расчетные значения. Это свидетельствует о том, что используемая модель [12,13,20] для расчета энергии, обусловленной химическим взаимодействием контактирующих сред, не учитывает дополнительные факторы, оказывающие влияние на химическое взаимодействие компонентов технологической среды с поверхностью детали. Вместе с тем, близость величин в пределах 4,8-11,5 % подтверждает целесообразность её использования для оценки адгезионной прочности наносимого покрытия.

Из представленной на рис. 4 диаграммы следует, что вклад химического взаимодействия контактирующих сред в изменение энергетического состояния локального объёма цинкового покрытия, сформированного в вибрационной технологической системе в пределах продолжительности обработки, установленной планом экспериментальных исследований, составляет 5 % от общей величины адгезионной прочности ВиМХЦП.

При анализе изменения адгезионной прочности между образцами из разных марок стали выявлено незначительная их разница при увеличении концентрации технологической среды, что говорит примерно об одинаковом химическом составе используемых марок стали. Также установлено, что при увеличении концентрации раствора $ZnCl_2$ на 200 % адгезионная прочность увеличивается не более, чем в 1,01 раза.

Проведённые исследования позволяют с достаточной для практики точностью проектировать технологические регламенты путем регулирования механическими и химическими параметрами процесса, обеспечивая при этом требуемую по условиям эксплуатации величину адгезионной прочности и наиболее предпочтительные с экологической точки зрения условия формирования покрытия. Кроме того, установлено, что технологическая эффективность процесса нанесения покрытия при управлении механическими параметрами на 2-3 % выше по сравнению с регулированием процесса химическими параметрами.

Коррозионная стойкость, оцениваемая параметром проницаемости, покрытых образцов растет вместе с увеличением их адгезионной прочности. Данный факт объясняется тем, что при увеличении энергетической связи покрытия с материалом подложки, корродирующим веществам необходимо произвести большую работу по разрушению этой связи. На основе полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя K_E модифицированного в процессе нанесения ВиМХЦП (рис. 5).

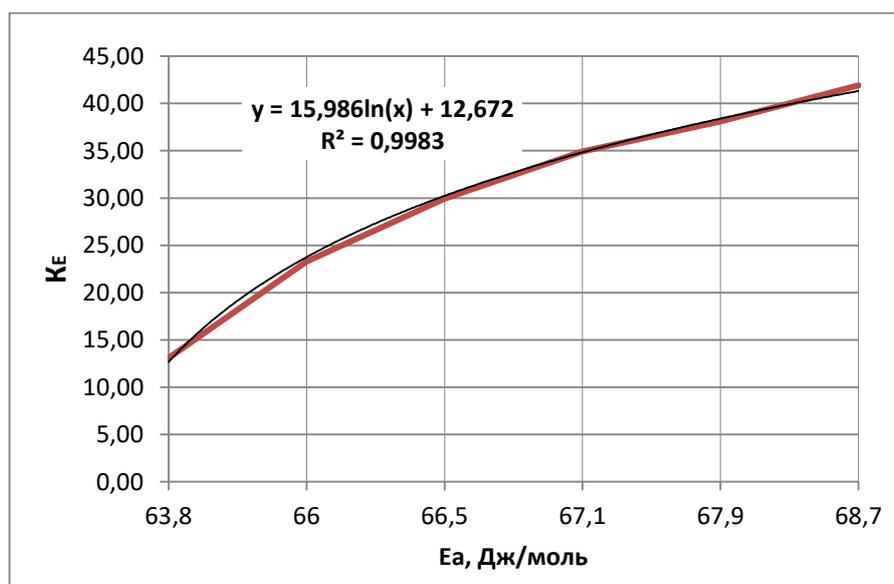


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента K_E от адгезионной прочности ВиМХЦП, нанесенных на поверхность образцов

Аппроксимация кривой, представленной на рис. 5, позволила описать ее логарифмической функцией, имеющей наиболее высокий коэффициент детерминации R^2 . Так, для образцов из марки стали Ст35 коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9983$ (рис. 5).

В общем виде эмпирическая формула для оценки коэффициента влияния адгезии на изменение плотности поверхностного слоя K_E модифицированного в процессе нанесения ВиМХЦП на образцы из конструкционных марок стали, задействованных в опытах, имеет вид

$$K_E = 15,434 \cdot \ln(E_a) + 12,206,$$

где E_a – адгезионная прочность покрытия, Дж/моль.

Проведенные исследования показали, что для образцов из конструкционной стали при выбранных условиях нанесения покрытия, коррозионная стойкость увеличивается на величину от 9,8 до 46,6 раз по отношению к непокрытым образцам. Данный факт подтверждает высокие защитные антикоррозионные свойства вибрационных механохимических цинковых покрытий.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, грант № 16-38-00276.

Список литературы

1 Бабичев А.П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Шудалей и др. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. – С.204.

2 Болдырев В.В. Исследования по механохимии твердых веществ / В.В. Болдырев // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 2009. – С. 34-40.

3 Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учеб. пособие / А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев и др.; под ред. А.П.Бабичева. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 430 с.

4 Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий. (цинкование). Издательский центр ДГТУ. Ростов н/Д, 2010.

5 Журавлева Л.А. Технология формирования цинкового покрытия на деталях из углеродистых сталей в условиях вибрационной обработки / Л.А. Журавлева, П.В. Колодяжный // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2009. №3– С.24-28.

6 Штынь С.Ю. Особенности протекания в поверхностном слое механохимических процессов нанесения покрытий в условиях виброволновых воздействий / Штынь С.Ю., В.В. Иванов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. – №8, Ч. 2.

7 Лысенко Л.А. Особенности нанесения цинкового покрытия механохимическим методом / Л.А. Лысенко, Л.Г. Колодяжная, Л.М. Лубенская // Вибрации в технике и технологиях. Винница, 2008, №3 (52). – С.3639.

8 Анкудимов Ю.П. Повышение антикоррозионных свойств деталей из спеченных материалов нанесением покрытий из металлических порошков методом вибрационной обработки / Ю.П. Анкудимов, П.Ю. Анкудимов, М.М. Чаава // Упрочняющие технологии и покрытия. М., 2009.

9 Лебедев, В.А. Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, В.В. Иванов, И.В. Давыдова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №8

10 Лебедев, В.А. Исследования энергетического состояния поверхностного слоя, упрочненного методами ППД / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, В.Д. Соколов, М.А. Ягмуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №9

11 Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. Таганрог: ТРТУ, 2006. – 126 с.

- 12 Лебедев, В.А. Получение покрытий в виброволновых технологических системах на основе энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса / В.А. Лебедев, С. Ю. Штынь, В.В. Иванов, С.В. Капустянский // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – № 2, ч. 4.2.
- 13 Штынь С.Ю. Управление механохимическим синтезом процесса нанесения вибрационных механохимических покрытий на основе энергетической модели / С.Ю. Штынь, В. Д. Соколов // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб. тр. по материалам международного симпозиума технологов-машиностроителей, г. Ростов-на-Дону, 3-7 окт. 2017 г. / ДГТУ, 2017.
- 14 Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъемках, тонких приповерхностных слоях и пленках / Ю.И. Головин // Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12-с. 2113-2145-с. 2113-2145
- 15 Штынь С.Ю. Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности / С.Ю. Штынь // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. на-уч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецк. гос. техн. ун-та, Липецк, 10-11 нояб. 2016 г. / ЛГТУ
- 16 Витковский И.В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2009. Т. 79. Вып. 2.
- 17 Иванов В.В. Исследование микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей / В.В. Иванов, А.П. Бабичев, В.Э. Бурлокова и др. // Упрочняющие технологии и покрытия, 2014, №7. – С.46-49.
- 18 Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров. Воронеж: Ипц «Научная книга». 2013. -260 с.
- 19 Киселев В.А. Цинкование крепежных деталей / Киселев В.А., Н.Н. Сорокин // Защита металлов, 1987. Т. 23, № 2. – С.287-289.
- 20 Лебедев В.А. Энергетическая модель формирования вибрационных механохимических покрытий / В.А. Лебедев, В.В. Иванов, В.Д. Соколов и др. // Наноинженерия, 2013. №5 – С.11.
- 21 Лысенко Л.А. Исследование механизма формирования цинкового покрытия на деталях углеродистых сталей в условиях вибрационной обработки / Л.А. Лысенко, Л.Г. Колодяжная // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Луганск: Изд-во ВНУ им. В Даля, 2008. – С.209-215.

References

- 1 Babichev A.P. Vibration mechanochemistry in the processes of finishing and strengthening processing and coating of machine parts / A.P. Babichev, V.V. Ivanov, S.N. Shudaley and others. Rostov n/d: Publishing center of DSTU, 2012. – P.204.
- 2 Boldyrev V.V. Research on mechanochemistry of solid substances / V.V. Boldyrev // Journal of the All-Union Chemical Society named after. DI. Mendeleev. 2009. – pp. 34-40.
- 3 Babichev A.P. Physical and technological foundations of processing methods: textbook. allowance / A.P. Babichev, M.A. Tamarkin, V.A. Lebedev et al.; edited by A.P. Babicheva. Rostov n/d: Publishing center of DSTU, 2003. – 430 p.
- 4 Ivanov V.V. Vibration mechanochemical methods of coating. (galvanizing). Publishing center of DSTU. Rostov n/d, 2010.
- 5 Zhuravleva L.A. Technology of forming a zinc coating on parts made of carbon steels under vibration processing conditions / L.A. Zhuravleva, P.V. Kolodyazhny // Strengthening technologies and coatings. – M.: Mashinostroenie, 2009. No. 3– P.24-28.
- 6 Shtyn S. Yu. Features of the occurrence of mechanochemical coating processes in the surface layer under conditions of vibration wave influences / Shtyn S. Yu., V.V. Ivanov // News of Tula State University. Technical science. 2016. – No. 8, Part 2.

- 7 Lysenko L.A. Features of applying zinc coating using the mechanochemical method / L.A. Lysenko, L.G. Kolodyazhnaya, L.M. Lubenskaya // *Vibrations in engineering and technology*. Vinnytsa, 2008, No. 3 (52). – P.3639.
- 8 Ankudimov Yu.P. Increasing the anti-corrosion properties of parts made of sintered materials by applying coatings of metal powders using vibration treatment / Yu.P. Ankudimov, P.Yu. Ankudimov, M.M. Chaava // *Hardening technologies and coatings*. M., 2009.
- 9 Lebedev, V.A. Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength / V.A. Lebedev, S.Yu. Shtyn, V.V. Ivanov, I.V. Davydova // *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. – No. 8
- 10 Lebedev, V.A. Research of the energy state of the surface layer strengthened by SPD methods / V.A. Lebedev, S.Yu. Shtyn, V.D. Sokolov, M.A. Yagmurov // *Strengthening technologies and coatings*. – 2015. – No. 9
- 11 Butenko V.I. Local finishing and hardening treatment of machine parts surfaces. Taganrog: TRTU, 2006. -126 p.
- 12 Lebedev, V.A. Obtaining coatings in vibration-wave technological systems based on the energy model for controlling the mechanochemical synthesis of the process / V.A. Lebedev, S. Yu. Shtyn, V.V. Ivanov, S.V. Kapustyansky // *Bulletin of RSATU named after P.A. Solovyova*. – 2017. – No. 2, part 4.2.
- 13 Shtyn S.Yu. Control of mechanochemical synthesis of the process of applying vibration mechanochemical coatings based on the energy model / S.Yu. Shtyn, V.D. Sokolov // *Prospective directions for the development of finishing methods for processing parts; Vibrowave technologies: collection of articles. tr. based on materials from the international symposium of mechanical engineering technologists, Rostov-on-Don, October 3-7. 2017 / DSTU, 2017.*
- 14 Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin surface layers and films / Yu.I. Golovin // *Solid State Physics*, 2008, volume 50, issue. 12-s. 2113-2145-s. 2113-2145
- 15 Shtyn S.Yu. Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength / S.Yu. Shtyn // *Problems and prospects for the development of mechanical engineering: collection of articles. scientific tr. international na-uch.-techn. conf., dedicated 60th anniversary of Lipetsk. state tech. University, Lipetsk, November 10-11. 2016 / Leningrad State Technical University*
- 16 Vitkovsky I.V. Theoretical determination of the adhesion properties of materials for the liquid metal blanket of a thermonuclear reactor / I.V. Vitkovsky, A.N. Konev, V.S. Shorkin // *Journal of Technical Physics*. – 2009. T. 79. Issue. 2.
- 17 Ivanov V.V. Study of the micro/nanoprofile of zinc coating during vibration mechanochemical processing of hydrocarbon steels / V.V. Ivanov, A.P. Babichev, V.E. Burloikova and others // *Hardening technologies and coatings*, 2014, No. 7. – P.46-49.
- 18 Kadyrmetov A.M. Control of technological support for plasma coating processes in the mode of modulation of electrical parameters. Voronezh: IPC “Scientific Book”. 2013. -260 s.
- 19 Kiselev V.A. Galvanizing of fasteners / Kiselev V.A., N.N. Sorokin // *Protection of Metals*, 1987. T. 23, No. 2. – P.287-289.
- 20 Lebedev V.A. Energy model of the formation of vibration mechanochemical coatings / V.A. Lebedev, V.V. Ivanov, V.D. Sokolov et al. // *Nanoengineering*, 2013. No. 5 – P.11-
- 21 Lysenko L.A. Study of the mechanism of formation of zinc coating on carbon steel parts under vibration processing conditions / L.A. Lysenko, L.G. Kolodyazhnaya // *Resource-saving technologies for production and pressure treatment of materials in mechanical engineering*. Lugansk: Publishing house VNU im. In Dalia, 2008. – P.209-215.

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-3-3-60-66](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-60-66)



УДК 656.142

UDC 656.142

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДА СУТОК НА РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАЕЗДА НА ПЕШЕХОДА

INFLUENCE OF DAY PERIOD ON THE RISK OF PEDESTRIAN CRASHES

✉¹ **Печатнова Елена Владимировна**, к.т.н., доц. кафедры «Организация и безопасность движения», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, e-mail: phukcia@yandex.ru

✉¹ **Pechatnova Elena Vladimirovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Organization and Safety of Movement", Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, e-mail: phuk-cia@yandex.ru

Новиков Иван Алексеевич, д.т.н., проф., директор, Транспортно-технологический институт Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Novikov Ivan Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Transport and Technological Institute of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod.

Кiryushin Иван Иванович, ст. преподаватель, кафедра информатики и специальной техники, Барнаульский юридический институт МВД России, г. Барнаул.

Kiryushin Ivan Ivanovich, Senior Lecturer, Department of Computer Science and Special Technology, Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Barnaul.

Шаталов Евгений Владимирович, к.т.н., доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Shatalov Evgeniy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. Наезды на пешеходов на автомобильных дорогах федерального значения отличаются повышенной тяжестью последствий, в связи с чем их изучение является актуальной задачей. В работе рассмотрено влияние 5 периодов суток (ночь, астрономические, навигационные, гражданские сумерки, день) на риск возникновения наезда на пешехода. Моделирование выполнено на основе теории относительного риска.

Annotation. Pedestrians crashes on federal roads are characterized by increased severity of consequences, and therefore their study is an urgent task. The study is devoted to modeling the influence of 5 periods of the day (night, astronomical, navigational, civil twilight, day) on the risk of a pedestrian crashes. The modeling was performed based on the theory of relative risk.

Ключевые слова: НАЕЗДЫ НА ПЕШЕХОДОВ, ПЕРИОД СУТОК, ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ РИСК, СУМЕРЕЧНОЕ ВРЕМЯ, РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАЕЗДА НА ПЕШЕХОДА.

Keywords: PEDESTRIAN CRASHES, DAY PERIOD, RELATIVE RISK, TWILIGHT TIME, RISK OF PEDESTRIAN CRASHES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Исследование различных вопросов формирования дорожно-транспортной аварийности является актуальной задачей в связи с государственной целью, заключающейся в стремлении к нулевой смертности в ДТП к 2030 году [1,2]. Для достижения поставленной цели необходим комплекс различных мероприятий, направленных на совершенствование организации дорожного движения, приведения в нормативное транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог, повышение культуры водителей, внедрение интеллектуальных транспортных систем и пр. Для подготовки и дальнейшей корректировки планов по реализации мероприятий необходим научный подход, основанный на детальном качественном анализе показателей и факторов аварийности, определению соответствующих зависимостей и закономерностей.

Одним из направлений исследований в данной сфере является анализ аварийности, связанной с повышенной тяжестью последствий ДТП, к которой относятся наезды на пешеходов на федеральных автомобильных дорогах (ФАД). По данным Алтайского края эти ДТП занимают около 10 % от всех ДТП на ФАД, но при этом их тяжесть последствий выше в среднем 2-3 раза в сравнении с другими видами ДТП на ФАД и в 6 раз выше в сравнении с ДТП на всех дорогах региона.

Наезды на пешеходов на ФАД обычно характеризуются тяжелыми травмами пешеходов или летальным исходом, кроме того, в ряде случаев травмы получает и водитель [3]. Ранения, полученные в результате наезда, могут иметь длительные последствия для здоровья и качества жизни пострадавших [4-6]. Кроме физических травм, психологические последствия наездов на пешеходов также могут быть значительными как для участников ДТП, так и для родственников, свидетелей, что также может потребовать специальной помощи.

Среди факторов, способствующих наездам на пешеходов многие авторы выделяют темное время суток [7 – 13]. Отмечается, что травмы пешеходов при наезде в темное время суток отличаются более высокой тяжестью [14] и числом погибших [15, 16]. В [17, 18] указывается, что вероятность возникновения наезда в темное время суток в три раза выше, чем днем. В работе [19] приводится информация о том, что в первый час сумерек обычно наблюдается наибольшая частота смертельных наездов на пешеходов. Таким образом, большинство исследований, направленных на оценку взаимосвязи наездов на пешеходов и периода суток, подтверждают гипотезу о том, что темное время суток оказывает негативное влияние на частоту и тяжесть наездов на пешеходов. При этом недостаточно изученным остается вопрос о количественной оценке влияния сумеречного и ночного периодов суток на риск возникновения наезда на пешехода.

Целью работы является оценка влияния периодов суток на риск возникновения наезда на пешехода на ФАД.

2 Материалы и методы

Для проведения исследования получены и обработаны данные о наездах на пешеходов, которые произошли на ФАД Алтайского края в период с 2018 по 2022 год. В качестве исходных данных выступили сведения о времени и месте (координатах) аварий. На их основе, с использованием специализированного сервиса [20], определен период суток, в течение которого произошел наезд. Принято классическое астрономическое деление суток на 5 периодов:

ночь (Н), астрономические сумерки (АС), навигационные сумерки (НС), гражданские сумерки (ГС), день (Д). Более детальное разделение сумерек обосновано значительным снижением освещенности [21].

В качестве основного метода оценки влияния периода суток на увеличение риска возникновения наезда на пешехода принята теория относительного риска. Основная идея использования этого подхода заключается в расчете отношения частот (частостей) исходов в группе, на которые оказывал влияние изучаемый фактор (распределение ДТП по периодам суток), к частоте исходов в группе, не подвергавшихся влиянию этого фактора (среднее географическое распределение периодов суток) [22]. Другими словами, выбранный подход можно выразить следующей формулой:

$$R_t = \frac{F_{\text{ДТП}}^t}{F_{\text{геогр}}^t}, \quad (1)$$

где R_t – относительный риск возникновения ДТП (наезда на пешехода) в t -ый период суток;
 $F_{\text{ДТП}}^t$ – относительная частота (частость, %) t -ого периода суток в выборке ДТП;
 $F_{\text{геогр}}^t$ – средняя относительная частота (частость, %) t -ого периода суток согласно географическому расположению региона.

Общая выборка ДТП – наездов на пешеходов составила 144 ДТП. Для обеспечения проверки адекватности модели по определению относительного риска в зависимости от периода суток исходная выборка была разделена на 2 части: обучающую и тестовую. Обучающая выборка содержала в себе данные о наездах на пешеходов, которые произошли в 2018, 2020 и 2021 годах; тестовая – которые зафиксированы в 2019 и 2022 годах. Соотношение элементов (ДТП) обучающей выборки к тестовой: 54/46 (%).

Поскольку моделирование основано на отношении частот в двух выборках (дискретное распределение), то в качестве метода проверки адекватности выбран расчет критерия χ^2 . На первом этапе проведена проверка гипотезы о согласованности распределения в тестовой и обучающей выборках. Далее проведена проверка гипотезы о различии распределения группы ДТП к распределению согласно географическому расположению региона.

3 Результаты исследований

Согласно географическому расположению региона, более половины времени в году занимает день (51,13 %), более четверти – ночь (28,36 %) и менее четверти суммарно сумерки (табл.1). Распределение наездов на пешеходов по периодам суток показало, что большая часть этих ДТП происходит ночью (29,87 % и 32,84 % в обучающей и тестовой выборках соответственно).

Полные результаты распределений представлены в табл.1.

Таблица 1 – Распределение наездов на пешеходов по периодам суток, географическое распределение периодов суток, %

	День	Гражданские сумерки	Навигационные сумерки	Астрономические сумерки	Ночь
Географическое расположение	51,13	5,47	6,91	8,12	28,36
Обучающая выборка	25,97	7,79	20,78	15,58	29,87
Тестовая выборка	25,37	7,46	20,90	13,43	32,84

Результаты расчета относительного риска по обучающей выборке представлены формулой (2):

$$R_t = \begin{cases} 0,51, & t = Д \\ 1,42, & t = ГС \\ 3,01, & t = НС \\ 1,92, & t = АС \\ 1,05, & t = Н \end{cases} \quad (2)$$

Результаты расчета относительного риска возникновения наезда на пешехода в различные периоды суток по тестовой выборке представлен формулой (3):

$$R_t = \begin{cases} 0,50, & t = Д \\ 1,36, & t = ГС \\ 3,03, & t = НС \\ 1,65, & t = АС \\ 1,16, & t = Н \end{cases} \quad (3)$$

Проведена проверка согласованности результатов в тестовой и обучающей выборках с помощью приведения к единому масштабу частот и расчету критерия χ^2 . В качестве нулевой гипотезы выдвинута согласованность частот, в качестве альтернативной – расхождения статистически значимы. В результате расчетов установлено, что $\chi_{\text{эмп}}^2 < \chi_{\text{крит}}^2$, в связи с чем принята нулевая гипотеза. Это позволяет сделать вывод о согласованности результатов, полученных в обучающей и тестовой выборках, что дает основание рассчитать относительный риск возникновения наезда на пешехода в различные периоды суток по общей выборке. Результаты представлены формулой (4):

$$R_t = \begin{cases} 0,50, & t = Д \\ 1,40, & t = ГС \\ 3,02, & t = НС \\ 1,80, & t = АС \\ 1,10, & t = Н \end{cases} \quad (4)$$

Далее проведена оценка различия распределения наездов на пешеходов по периодам суток и распределения продолжительности периодов суток согласно географическому расположению региона путем расчета, масштабирования частот и расчета критерия χ^2 . В результате расчетов установлено, что $\chi_{\text{эмп}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2$, в связи с чем отвергнута нулевая гипотеза.

Таким образом доказано, что различия в распределениях неслучайны, что доказывает влияние периода суток на изменение риска возникновения наезда на пешехода, который можно оценить с помощью модели, представленной формулой (4).

4 Обсуждение и заключение

Проведенное исследование показало, что различные периоды суток оказывают отличающееся влияние на изменение риска возникновения наезда на пешехода. Наибольший риск отмечается в период навигационных сумерек – риск возникновения наезда на пешехода увеличивается в 3 раза. В период астрономических, гражданских сумерек и ночи риск также повышается. Такая разница с навигационными сумерками вероятно связана с освещенностью: ночью и в период астрономических сумерек на ряде участков включено искусственное освещение, что повышает видимость пешехода. Однако следует учитывать, что искусственное освещение на пешеходном переходе не является единственным условием безопасности перехода: для повышения безопасности необходимо освещение на подходах к пешеходному переходу, а также светоотражающие элементы на одежде пешеходов.

В связи с тем, что большая часть наездов на пешеходов происходит вблизи городов и населенных пунктов рекомендуется включение искусственного освещения с началом гражданских сумерек в вечернее время (заход Солнца) до восхода Солнца (окончание утренних гражданских сумерек). Кроме того, рекомендуется размещение предупреждения на информационном табло переменной информации о повышенном риске наезда на пешехода в период навигационных сумерек. В качестве дополнительных мер рекомендуется проведение профилактических мероприятий сотрудниками ГИБДД по контролю за соблюдением ПДД пешеходами, в том числе в области необходимости ношения светоотражающих элементов на одежде.

Также полученные результаты имеют теоретическую значимость, развивая теорию в области безопасности дорожного движения и применения теории относительного риска. Полученные значения могут также использоваться при комплексной оценке риска возникновения наезда на пешехода в совокупности с другими факторами.

Список литературы

- 1 Korchagin, V. A. Implementing road safety measures in conditions limited by budget / V. A. Korchagin, A. K. Pogodaev, V. E. Kliavin, V. A. Zelikov // *Transportation Research Procedia*, Saint Petersburg, 27–29 сентября 2018 года. Vol. 36. – Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018. – P. 308-314. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.090
- 2 Загородних, Н. А. Информационная система выявления очагов концентрации ДТП: итоги реализации и перспективы развития / Н. А. Загородних, А. Н. Новиков // *Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования*. – 2019. – № 1(2). – С. 183-187.
- 3 William Agyemang A latent class multinomial logit analysis of factors associated with pedestrian injury severity of inter-urban highway crashes / William Agyemang, Emmanuel Kofi Adanu, Jun Liu & Steven Jones // *Journal of Transportation Safety & Security*. – 2022. DOI:10.1080/19439962.2022.2153952.
- 4 Николаева, Р. В. Исследование наездов на пешеходов на улично-дорожной сети г. Казани / Р. В. Николаева, И. И. Попова // *Техника и технология транспорта*. – 2022. – № 1(24).
- 5 Симуль, М. Г. Влияние некоторых факторов на соблюдение водителями правил проезда пешеходных переходов / М. Г. Симуль, С. М. Порхачева // *Наука и техника в дорожной отрасли*. – 2017. – № 1(79). – С. 8-9.
- 6 Мурашев, П. М. Методические аспекты установления механизма ДТП, связанного с наездом на пешехода / П. М. Мурашев // *Вестник Московского университета МВД России*. – 2021. – № 3. – С. 30-33. – DOI 10.24412/2073-0454-2021-3-30-33.
- 7 Hossain A. Exploring association of contributing factors to pedestrian fatal and severe injury crashes under dark-no-streetlight condition // A. Hossain, X. Sun, R. Thapa, et al. // *IATSS Research*. – 2023. DOI: 10.1016/j.iatssr.2023.03.002.
- 8 Sullivan J.M. Characteristics of Nighttime Pedestrian Crashes: Implications for Headlighting, University of Michigan, Ann Arbor / J.M. Sullivan // *Transportation Research Institute*. – 2007.
- 9 Zongni Gu Investigation into the built environment impacts on pedestrian crash frequencies during morning, noon/afternoon, night, and during peak hours: a case study in Miami County, Florida / Zongni Gu & Binbin Peng // *Journal of Transportation Safety & Security*. – 2019. DOI: 10.1080/19439962.2019.1701164.
- 10 Пугачев И.Н. Освещение как причина ДТП на пешеходных переходах / И. Н. Пугачев, А. И. Ярмолинский, Т. Е. Кондратенко, И. Д. Черевко // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. – 2017. – № 1. – С. 96-101.
- 11 Ahmed Hossain Investigating pedestrian crash patterns at high-speed intersection and road segments: Findings from the unsupervised learning algorithm / Ahmed Hossain, Xiaoduan Sun, Niaz Mahmud Zafri, Julius Codjoe // *International Journal of Transportation Science and Technology*. – 2023. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043023000369?via%3Dihub>.

- 12 Sivak, Michael Moon Phases and Nighttime Road Crashes Involving Pedestrians / Sivak, Michael, Schoettle, Brandon & Tsimhoni, Omer // LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America. – 2013. – pp. 129-131. DOI: 10.1582/LEUKOS.2007.04.02.004.
- 13 Bhagavathula, Rajaram Lighting Strategies to Increase Nighttime Pedestrian Visibility at Midblock Crosswalks / Bhagavathula, Rajaram & Gibbons, Ronald // Sustainability. – 15. – 1455. – 2023. DOI: 10.3390/su15021455.
- 14 Sullivan M. The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions / M. Sullivan, M.J. Flannagan, // *Accid. Anal. Prev.* – 34 (4). – 2002. – pp. 487–498. DOI: 10.1016/S0001-4575(01)00046-X.
- 15 Лопарев, Е. А. Влияние внешних факторов на уровень дорожно-транспортных происшествий, связанных с наездами на пешеходов / Е. А. Лопарев, А. С. Сергунова // *Безопасность дорожного движения.* – 2022. – № 1. – С. 28-34.
- 16 Kemnitzer CR An investigation of driver, pedestrian, and environmental characteristics and resulting pedestrian injury / Kemnitzer CR, Pope CN, Nwosu A, Zhao S, Wei L, Zhu M. // *Traffic Inj Prev.* – 2019. – 20(5). – pp. 510-514. DOI: 10.1080/15389588.2019.1612886.
- 17 Денисов, Г. А. Идентификация действий участников наезда на пешехода в темное время суток при расследовании и экспертизе происшествия / Г. А. Денисов, В. А. Зеликов, Н. И. Злобина // *Бюллетень транспортной информации.* – 2019. – № 9(291). – С. 31-33.
- 18 Романов А. Н. Автотранспортная психология. М.: Издательский центр «Академия», 2002. – 224 с.
- 19 Griswold, J. Visual assessment of pedestrian crashes / Griswold, J., Fishbain, B., Washington, S., Ragland, D. R. // *Accident Analysis & Prevention.* – 43(1). – pp. 301–306. – 2011. DOI: 10.1016/j.aap.2010.08.028.
- 20 Восход Солнца [Электронный ресурс]. – URL: <https://voshod-solnca.ru/sun>
- 21 Печатнова, Е. В. Влияние времени суток на дорожно-транспортную аварийность / Е. В. Печатнова // *Мир транспорта.* – 2016. – Т. 14, № 2(63). – С. 194-200
- 22 Печатнова, Е. В. Оценка влияния количества осадков на аварийность на дорогах вне населенных пунктов / Е. В. Печатнова, К. Э. Сафронов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.* – 2020. – Т. 17, № 4(74). – С. 512-522. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522.

References

- 1 Kadyrmetov, A. M. Prospects of obtaining multicomponent coatings by atmospheric plasma spraying / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. V. Vikulin, V. I. Voronetsky, R. V. Stegantsev // *Voronezh scientific and technical Bulletin.* – 2018. – Vol. 4 (26). – p. 46-54.
- 2 Zagorodnih, N. A. Informacionnaya sistema vyyavleniya ochagov koncentracii DTP: itogi realizacii i perspektivy razvitiya / N. A. Zagorodnih, A. N. Novikov // *Upravlenie deyatelnost'yu po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sostoyanie, problemy, puti sovershenstvovaniya.* – 2019. – № 1(2). – S. 183-187..
- 3 William Agyemang A latent class multinomial logit analysis of factors associated with pedestrian injury severity of inter-urban highway crashes / William Agyemang, Emmanuel Kofi Adanu, Jun Liu & Steven Jones // *Journal of Transportation Safety & Security.* – 2022. DOI:10.1080/19439962.2022.2153952.
- 4 Nikolaeva, R. V. Issledovanie naezdov na peshekhodov na ulichno-dorozhnoj seti g. Kazani / R. V. Nikolaeva, I. I. Popova // *Tekhnika i tekhnologiya transporta.* – 2022. – № 1(24).
- 5 Simul', M. G. Vliyanie nekotoryh faktorov na soblyudenie voditelyami pravil proezda peshekhodnyh perekhodov / M. G. Simul', S. M. Porhacheva // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli.* – 2017. – № 1(79). – S. 8-9.
- 6 Murashev, P. M. Metodicheskie aspekty ustanovleniya mekhanizma DTP, svyazannogo s naездом на пешехода / P. M. Murashev // *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii.* – 2021.

– № 3. – S. 30-33. – DOI 10.24412/2073-0454-2021-3-30-33.

7 Hossain A. Exploring association of contributing factors to pedestrian fatal and severe injury crashes under dark-no-streetlight condition // A. Hossain, X. Sun, R. Thapa, et al. // IATSS Research. –2023. DOI: 10.1016/j.iatssr.2023.03.002.

8 Sullivan J.M. Characteristics of Nighttime Pedestrian Crashes: Implications for Headlighting, University of Michigan, Ann Arbor / J.M. Sullivan // Transportation Research Institute. – 2007.

9 Zongni Gu Investigation into the built environment impacts on pedestrian crash frequencies during morning, noon/afternoon, night, and during peak hours: a case study in Miami County, Florida / Zongni Gu & Binbin Peng // Journal of Transportation Safety & Security. – 2019. DOI: 10.1080/19439962.2019.1701164.

10 Pugachev I.N. Osveshchenie kak prichina DTP na peshekhodnyh perekhodah / I. N. Pugachev, A. I. YArmolinskij, T. E. Kondratenko, I. D. CHerevko // Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. – 2017. – № 1. – S. 96-101.

11 Ahmed Hossain Investigating pedestrian crash patterns at high-speed intersection and road segments: Findings from the unsupervised learning algorithm / Ahmed Hossain, Xiaoduan Sun, Niaz Mahmud Zafri, Julius Codjoe // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2023. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043023000369?via%3Dihub>.

12 Sivak, Michael Moon Phases and Nighttime Road Crashes Involving Pedestrians / Sivak, Michael, Schoettle, Brandon & Tsimhoni, Omer// LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America. –2013. – pp. 129-131. DOI: 10.1582/LEUKOS.2007.04.02.004.

13 Bhagavathula, Rajaram Lighting Strategies to Increase Nighttime Pedestrian Visibility at Midblock Crosswalks / Bhagavathula, Rajaram & Gibbons, Ronald// Sustainability. – 15. – 1455. – 2023. DOI: 10.3390/su15021455.

14 Sullivan M. The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions / M. Sullivan, M.J. Flannagan, // Accid. Anal. Prev. – 34 (4). –2002. – pp. 487–498. DOI: 10.1016/S0001-4575(01)00046-X.

15 Loparev, E. A. Vliyanie vneshnih faktorov na uroven' dorozhno-transportnyh proisshestvij, svyazannyh s naezdami na peshekhodov / E. A. Loparev, A. S. Sergunova // Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya. – 2022. – № 1. – S. 28-34.

16 Kemnitzer CR An investigation of driver, pedestrian, and environmental characteristics and resulting pedestrian injury / Kemnitzer CR, Pope CN, Nwosu A, Zhao S, Wei L, Zhu M. // Traffic Inj Prev. – 2019. – 20(5). – pp. 510-514. DOI: 10.1080/15389588.2019.1612886.

17 Denisov, G. A. Identifikaciya dejstvij uchastnikov naezda na peshekhoda v temnoe vremya sutok pri rassledovanii i ekspertize proisshestviya / G. A. Denisov, V. A. Zelikov, N. I. Zlobina // Byulleten' transportnoj informacii. – 2019. – № 9(291). – S. 31-33.

18 Romanov A. N. Avtotransportnaya psihologiya. M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2002. – 224 s.

19 Griswold, J. Visual assessment of pedestrian crashes / Griswold, J., Fishbain, B., Washington, S., Ragland, D. R. // Accident Analysis & Prevention. – 43(1). – pp. 301–306. – 2011. DOI: 10.1016/j.aap.2010.08.028.

20 Voskhod Solnca [Elektronnyj resurs]. – URL:<https://voshod-solnca.ru/sun>

21 Pechatnova, E. V. Vliyanie vremeni sutok na dorozhno-transportnuyu avarijnost' / E. V. Pechatnova // Mir transporta. – 2016. – T. 14, № 2(63). – S. 194-200

22 Pechatnova, E. V. Ocenka vliyaniya kolichestva osadkov na avarijnost' na dorogah vne naseleennyh punktov / E. V. Pechatnova, K. E. Safronov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. – 2020. – T. 17, № 4(74). – S. 512-522. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522.

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-67-76



УДК 656.021

UDC 656.021

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ И ПРОБЛЕМАТИКА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

THE MAIN ASPECTS AND PROBLEMS IN THE CONSTRUCTION OF A TRANSPORT MODEL

Шемякин Александр Владимирович, д.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Shemyakin Alexander Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Успенский Иван Алексеевич, д.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Uspensky Ivan Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Рябчиков Дмитрий Сергеевич, к.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: rds_62@mail.ru

Ryabchikov Dmitry Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: rds_62@mail.ru

Тимакина Алина Александровна, аспирант, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: tim-tim2412@mail.ru

Timakina Alina Alexandrovna, Postgraduate student, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: tim-tim2412@mail.ru

✉¹ **Комаров Ян Викторович**, к.т.н., младший научный сотрудник, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, e-mail: yaniks88@bk.ru

✉¹ **Komarov Yan Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, junior research assistant, VUNC Air Force "VVA", Voronezh, e-mail: yaniks88@bk.ru

Аннотация. В данной работе представлена транспортная модель, которая служит инструментом для прогнозирования эффективности предлагаемых мероприятий по организации дорожного движения и оптимизации маршрутной сети общественного транспорта. На основании проведенных расчетов проведена оценка пропускной способности и уровня загрузки наиболее значимого пересечения, расположенного на

Annotation. This paper presents a transport model that serves as a tool for predicting the effectiveness of the proposed measures both for organizing traffic and for optimizing the route network of public transport. Based on the calculations carried out, an assessment of the throughput and loading level of the most significant intersection located at the entrance to the area of repair work of Pervomaisky Prospekt was carried out. The results obtained showed an insignificant difference when calculating

въезде в зону проведения ремонтных работ Первомайского проспекта. Полученные результаты показали несущественное различие при расчете по нормативной документации и при использовании программного продукта PTV Vissim.

according to regulatory documentation and when using the PTV Vissim software product.

Ключевые слова: ТРАНСПОРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТРАНСПОРТНЫЙ ПРОЦЕСС, ИНТЕНСИВНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ, УЛИЧНО-ДОРОЖНАЯ СЕТЬ.

Keywords: TRANSPORT MODEL, TRANSPORT PROCESS, INTENSITY OF TRAFFIC FLOWS, ROAD NETWORK.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

На сегодняшний день в ходе глобальных экономических перемен в России, и в мире в целом, отечественная транспортная система включает в себя 88 тыс. км железных дорог, более 750 тыс. км дорог с твердым покрытием, более 600 тыс. км воздушных линий, 70 тыс. км магистральных нефтепроводов, более 140 тыс. км газопроводов, 115 тыс. км маршрутов речного судоходства [1].

С ростом автомобильной загруженности дорог и увеличения объема перевозок все в большей степени актуализируется проблема развития состояния улично-дорожных сетей городов РФ и форсирования их пропускной способности. Проблема проявляется возникновением заторов в городских транспортных сетях, возникновением перегруженных городских районов и обуславливается моделями городского землепользования, фактическим состоянием и структурой дорог, заметно отличающейся от оптимальной, особенно старых городских центрах и в пиковые периоды поездок на работу [2-6].

Моделирование транспортных процессов – один из способов решения вышесказанной проблемы.

2 Материалы и методы

В рамках изучения транспортных потоков, их состава и интенсивности в границах г. Рязани по каждой точке был сформирован паспорт замеров, содержащий информацию о расположении точки, полученные значения интенсивности транспортных средств по всем направлениям [7-9].

Данные о существующих потоках и загрузке автомобильных дорог, прилегающих к Первомайскому проспекту получены из макромодели г. Рязани и представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что уровень загрузки Первомайского проспекта в настоящее время достаточно высок и составляет 70-90 %, при этом в сутки здесь проезжает до 40000 автомобилей. Столь высокий уровень загрузки основной магистральной дороги вызывает необходимость грамотно организовать перераспределение транспортных потоков на период проведения ремонта.

Для анализа существующей ситуации в узлах пересечения дорог разрабатывается микромодель узла. В процессе моделирования выявляются проблемы, возникающие при проезде исследуемого участка, или делается вывод об их отсутствии [10, 11]. Подробный процесс разработки базовой микромодели рассмотрен на примере построения модели пересечения Первомайского проспекта и ул. Вокзальной.

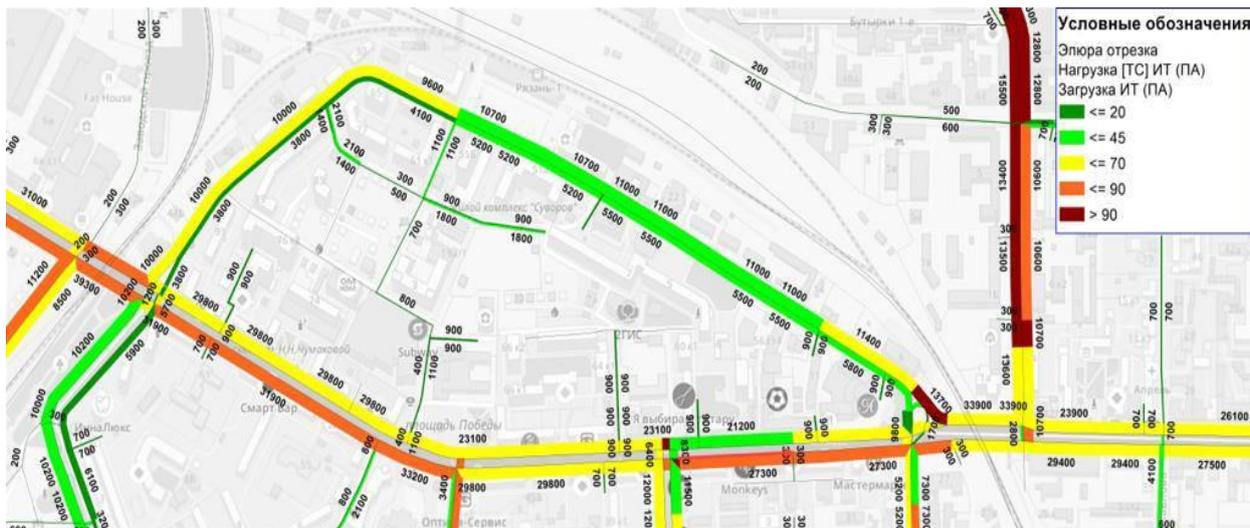


Рисунок 1 – Интенсивность и загрузка автомобильных дорог

В качестве растровой основы для построения микромодели использовалась картографическая подложка. Основа для пересечения модели приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Вид в плане микромодели узла № 1

В программе VISSIM транспортная схема с пересечением дорог была построена из элементов дорожных и соединительных отрезков, ширина которых соответствовала геометрическим характеристикам моделируемого объекта.

Отрезки в VISSIM представляют собой проезжую часть дороги с установленным количеством полос движения, которое задается как параметр соответствующих отрезков. Схемы создавались на масштабированной графической основе, что позволило построить геометрию пересечения (рис. 3) в соответствии с существующей конфигурацией узла.



Рисунок 3 – Внесение отрезков для движения транспортных средств (ТС)

При выполнении поворота на пересечении, а также при выполнении маневра, проезде искусственных неровностей и тому подобных препятствий водитель снижает скорость. Для моделирования такого поведения автомобилей были применены зоны малоскоростного движения (рис. 4).

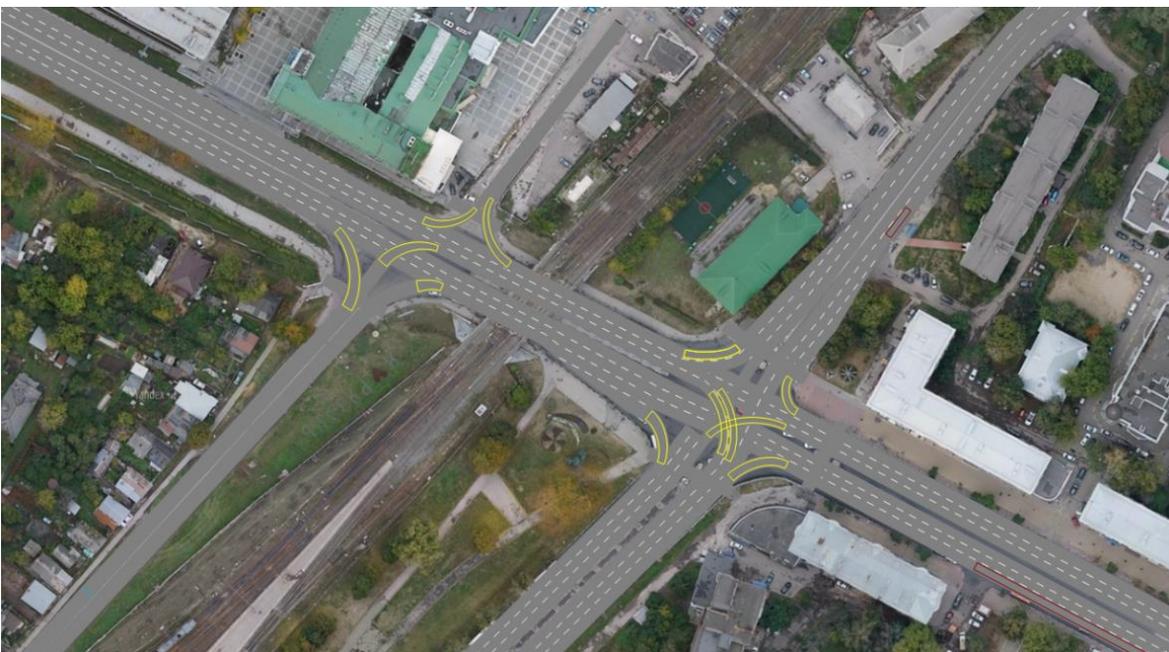


Рисунок 4 – Зоны малоскоростного движения

В модели порядок проезда конфликтных точек определен на основании существующей организации дорожного движения (рис. 5).

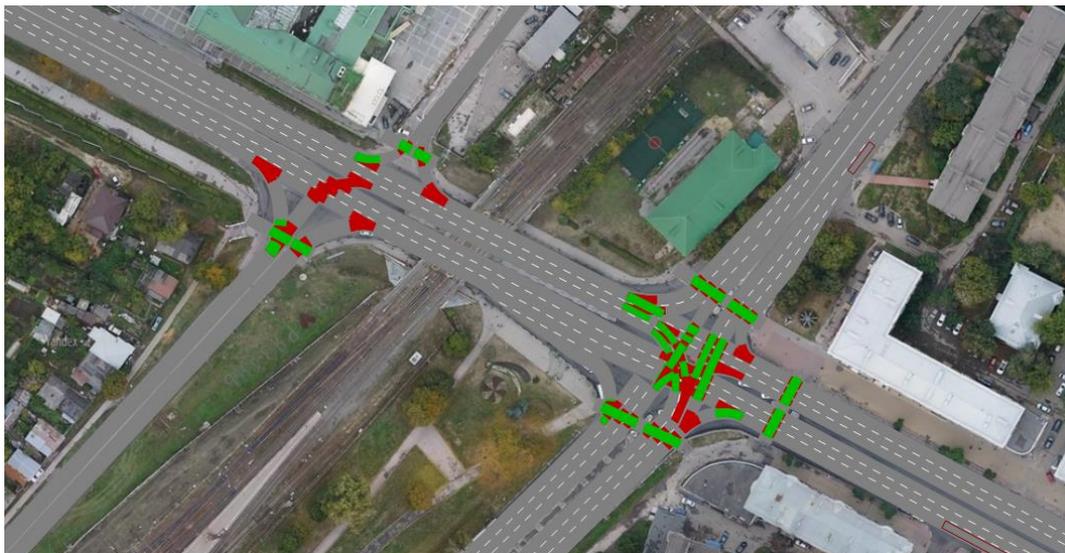


Рисунок 5 – Определение правил проезда

Зеленым цветом выделена полоса движения, находясь на которой транспортное средство обладает приоритетом проезда.

3 Результаты исследований

Пересечение Первомайского проспекта и ул. Вокзальной является регулируемым. В программу введен режим работы светофорного объекта (СО) (рис. 6).

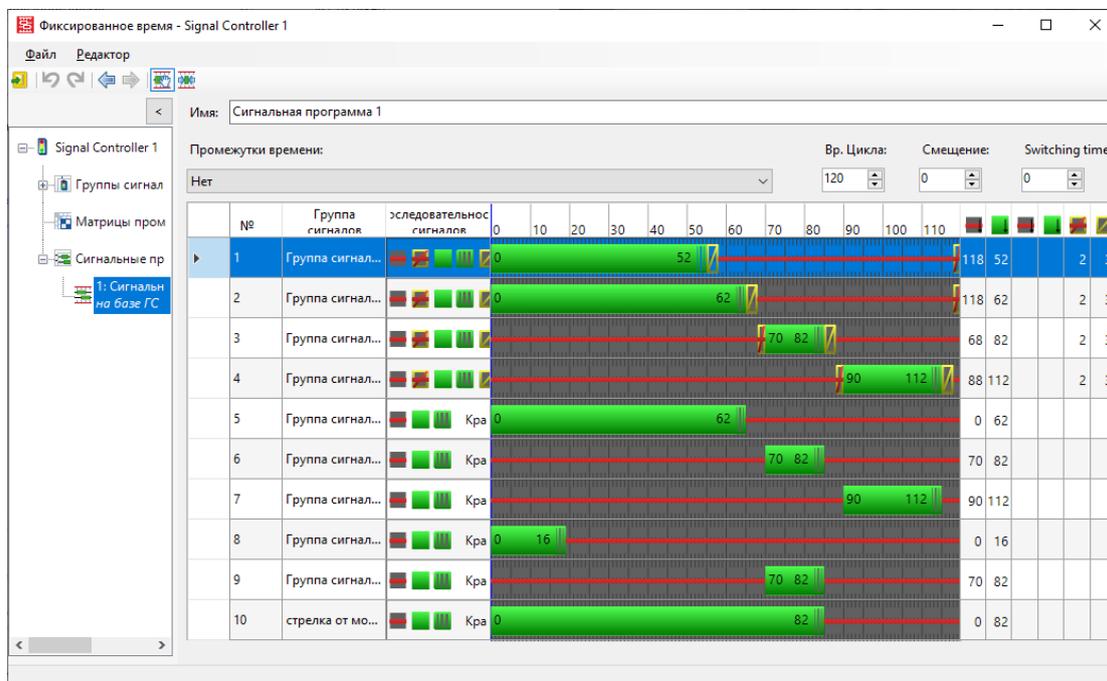


Рисунок 6 – Режим работы СО

После калибровки модели получена базовая версия, на основании которой можно оценить предлагаемые мероприятия по изменению организации дорожного движения, включая режим работы светофора, на момент проведения работ на Первомайском проспекте (рис. 7).



Рисунок 7 – Кадр 3D симуляции модели

Проведя анализ замеров результатов интенсивности транспортных потоков и построив транспортные модели в ключевых узлах, предлагается к реализации следующее решение: закрыть движение для всего транспорта, кроме общественного на участке дороги от пересечения Первомайского проспекта и ул. Вокзальная до пересечения Первомайского проспекта с ул. Типанова (рис. 8).



Рисунок 8 – Предлагаемая схема дорожного движения

На данных участках дороги из существующих шести полос остаются для функционирования только две – по одной полосе в каждом направлении (правые полосы).

Таким образом, движение личного транспорта будет организовано по объездным маршрутам по ул. Вокзальная через ж/д станцию Рязань-1 и Рязань-2 (рис. 9).

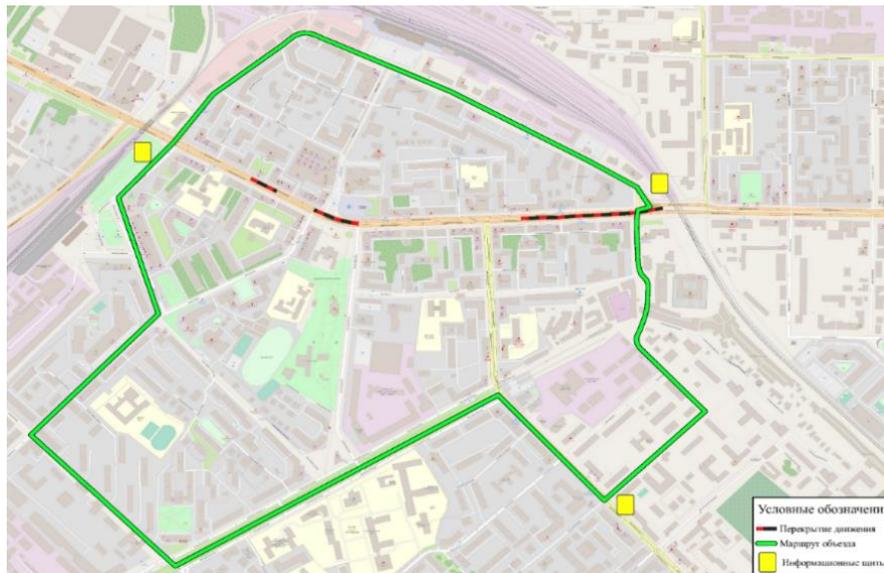


Рисунок 9 – Схема объезда для транспортных потоков, кроме общественного транспорта (ОТ)

Постоянная базовая модель позволяет оценить эффективность изменения организации дорожного движения в узле, например, провести оптимизацию светофорного регулирования, проверить эффективность локально-реконструкционных мероприятий, оценить изменение движения по полосам, оценить влияние парковки на дорожную ситуацию [12, 13].

В результате транспортная модель служит инструментом для прогнозирования эффективности предлагаемых мероприятий как по организации дорожного движения, так и по оптимизации маршрутной сети общественного транспорта [14].

На основании проведенных расчетов (как по ОДМ, так и произведенных в модели) проведена оценка пропускной способности и уровня загрузки наиболее значимого пересечения, расположенного на въезде в зону проведения ремонтных работ Первомайского проспекта. Полученные результаты показали незначительное различие при расчете по нормативной документации и при использовании программного продукта PTV Vissim. Следовательно, для оценки пропускной способности и коэффициента загрузки возможно использовать оба рассмотренных способа, однако микромодель имеет более широкое применение при организации и оценке дорожного движения [15, 16].

4 Обсуждение и заключение

Результаты исследований показали адекватность модели интенсивности транспортных потоков при использовании программного продукта PTV Vissim. Путем использования модели для случая проведения ремонтных работ Первомайского проспекта обоснована целесообразность ограничения движения для индивидуального транспорта и предоставление приоритета для общественного транспорта. Таким образом, предлагается закрыть движение по Первомайскому проспекту для всего транспорта, кроме общественного.

Микромоделирование является мощным инструментом для анализа существующей ситуации и проверки гипотез при организации дорожного движения. Благодаря полученной из модели информации специалисты могут предлагать и моделировать мероприятия по улучшению транспортной ситуации на центральной артерии города Рязани. Реализация мероприятий по ОДД должна привести к снижению времени проезда, повышению уровня безопасности дорожного движения и снижению негативного воздействия транспортных средств на окружающую среду.

Список литературы

- 1 Кильдишев, А.А., Определение эффективности общественного транспорта путем опроса населения / А.А. Кильдишев, Д.С. Рябчиков, В.В. Терентьев, К.П. Андреев // Приоритетные направления инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений в АПК. Материалы международной студенческой научно-практической конференции. 2021. С. 217-220.
- 2 Латышенок, Н.М Оптимизация дорожного движения в городах / Н.М. Латышенок, В.В. Терентьев, О.А. Тетерина, А.В. Шемякин // Сборник научных статей 14-й Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ - 2022)». Курск, 2022. С. 163-166.
- 3 Аникина, Я.А. Логистика и управление цепями поставок. Теория и практика. Основы логистики / Я. А. Аникина, Т. А. Ролкина. – М.: Проспект, 2013. 344 с.
- 4 Панюков, А. В. Математическая модель для решения оперативной проблемы региональных грузоперевозок / А. В. Панюков, Ю. В. Пивоварова, Х. Чалуб // Тр. 70-й конф. преподавателей и сотрудников ЮУрГУ. Челябинск, ЮУрГУ. Май 2018 г. Изд. центр ЮУрГУ, 2018. С. 71-76.
- 5 Курганов, В.М. Международные перевозки / В. М. Курганов, Л. Б. Миротин. – М.: Изд. центр «Академия», 2013. 304 с.
- 6 Рябчиков, Д.С. Модель оценки качества обслуживания населения / Д.С. Рябчиков, Н.В. Аникин // Наука молодых - будущее России. Сборник научных статей 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2021. С. 182-185.
- 7 Мальчиков, В.Н. Цифровизация транспортной отрасли / В.Н. Мальчиков, В.В. Терентьев, Тетерина О.А. // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные решения для АПК». Рязань, 2023. С. 291-296.
- 8 Мальчиков, В.Н. Применение интеллектуальных транспортных систем в перевозочном процессе / В.Н. Мальчиков, А.В. Шемякин, Д.С. Рябчиков // Инновационные решения в области развития транспортных систем и дорожной инфраструктуры : Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, приуроченной к профессиональному празднику – Дню работника автомобильного транспорта 27 октября 2022 года. Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета. Рязань, 2022. С. 213-219.
- 9 Dib, O. Advance modeling approach for computing multicriteria shortest paths in multimodal transportation networks / O. Dib, M. Manier, L. Moalic // 2016 IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Engineering. 2016. pp. 40–44.
- 10 Тимакина, А.А. Анализ математической модели транспортирования грузов с учетом дорожных и природно-климатических условий / А.А. Тимакина, Н.М. Куминов, Д.С. Рябчиков, В.М. Ульянов, И.А. Мурог // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15. № 1. С. 160-167.
- 11 Тимакина, А.А. Оценка и анализ параметров, характеризующих дорожное движение, и параметров эффективности организации дорожного движения / А.А. Тимакина, Н.А. Ляляева, Д.С. Рябчиков // Актуальные вопросы транспорта и механизации в сельском хозяйстве. Материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 80-летию д.т.н., профессора Бычкова Валерия Васильевича 27 января 2022 года. Министерство сельского хозяйства РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». 2022. С. 135-139.
- 12 Ульянов, И.С. Методология проведения замеров пассажиропотока в сечении участка маршрутной сети городского пассажирского транспорта / И.С. Ульянов, Д.С. Рябчиков, И.Н. Горячкина // Инновационные решения в области развития транспортных систем и дорожной инфраструктуры: Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конферен-

ции, приуроченной к профессиональному празднику – Дню работника автомобильного транспорта 27 октября 2022 года. Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета. Рязань, 2022. С. 154-159.

13 Шемякин, А.В. Комплексная цифровизация на предприятиях автомобильного транспорта: перспективы внедрения / А.В. Шемякин, А.Б. Мартынушкин, О.В. Лозовая, Н.Н. Пашканг, В.В. Терентьев // Грузовик. 2023. № 6. С. 30-34. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-6-30-34.

14 Шемякин, А.В. Современные подходы к обеспечению безопасности дорожного движения / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, А.Б. Мартынушкин // Актуальные вопросы транспорта и механизации в сельском хозяйстве. Материалы национальной научно-практической конференции, посвященные памяти д.т.н., профессора Бычкова Валерия Васильевича. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» Автодорожный Факультет. 2023. С. 347-353.

15 D. Ryabchikov, I. Marusina, A. Shemyakin, M. Alexeevsky and V. Malchikov, "The relevance of the Use of Electric Buses at Motor Transport Enterprises for Intracity Passenger Routes," 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2022, P. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934070.

16 V. N. Malchikov, A. V. Shemyakin, D. S. Ryabchikov, A. V. Marusin and A. A. Polyarush, "Implementation of Unmanned Vehicles to Improve the Quality of Passenger Transportation," 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2022, P. 1-5, DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934038.

References

1 Kildishev, A.A., Determination of public transport efficiency by population survey / A.A. Kildishev, D.S. Ryabchikov, V.V. Terentyev, K.P. Andreev // Priority directions of innovative development of transport systems and engineering structures in the agro-industrial complex. Materials of the international student scientific-practical conference. 2021. pp. 217-220.

2 Latyshenok, N.M. Optimization of road traffic in cities / N.M. Latyshenok, V.V. Terentyev, O.A. Teterina, A.V. Shemyakin // Collection of scientific articles of the 14th International Scientific and Technical Conference "Modern Automotive Materials and Technologies (SAMIT - 2022)". Kursk, 2022. pp. 163-166.

3 Anikina, Ya. A. Logistics and supply chain management. Theory and practice. Fundamentals of logistics / Ya. A. Anikina, T. A. Rodkina. – M.: Prospect, 2013. 344 p.

4 Panyukov, A.V. A mathematical model for solving the operational problem of regional cargo transportation / A.V. Panyukov, Yu. V. Pivovarova, H. Chalub // Tr. 70th conf. of teachers and staff of SUSU. Chelyabinsk, SUSU. May 2018, SUSU Publishing Center, 2018. pp. 71-76.

5 Kurganov, V. M. International transportation / V. M. Kurganov, L. B. Mirotin. – M. : Publishing center "Academy", 2013. 304 p.

6 Ryabchikov, D.S. Model for assessing the quality of public service / D.S. Ryabchikov, N.V. Anikin // Science of the young - the future of Russia. Collection of scientific articles of the 6th International Scientific Conference of Promising developments of young Scientists. Kursk, 2021. pp. 182-185.

7 Malchikov, V.N. Digitalization of the transport industry / V.N. Malchikov, V.V. Terentiev, O.A. Teterina // Collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Innovative solutions for agro-industrial complex". Ryazan, 2023. pp. 291-296.

8 Malchikov, V.N. Application of intelligent transport systems in the transportation process / V.N. Malchikov, A.V. Shemyakin, D.S. Ryabchikov // Innovative solutions in the field of development of transport systems and road infrastructure : Materials of the All-Russian student scientific and practical conference dedicated to the professional holiday – the Day of the motor transport worker on October 27, 2022. Publishing House of Ryazan State Agrotechnological University. Ryazan, 2022. pp. 213-219.

9 Dib, O. Advance modeling approach for computing multicriteria shortest paths in multi-modal transportation networks / O. Dib, M. Manier, L. Moalic // 2016 IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Engineering. 2016. pp. 40–44.

10. Timakina, A.A. Analysis of a mathematical model of cargo transportation taking into account expensive and climatic conditions / A.A. Timakina, N.M. Kuminov, D.S. Ryabchikov, V.M. Ulyanov, I.A. Murog // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023. Vol. 15. No. 1. pp. 160-167.

11 Timakina, A.A. Assessment and analysis of parameters characterizing road traffic and parameters of the effectiveness of traffic management / A.A. Timakina, N.A. Lyalyaeva, D.S. Ryabchikov // Actual issues of transport and mechanization in agriculture. Materials of the national scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Doctor of Technical Sciences, Professor Valery V. Bychkov on January 27, 2022. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostycheva". 2022. pp. 135-139.

12 Ulyanov, I.S. Methodology for measuring passenger traffic in the section of the route network of urban passenger transport / I.S. Ulyanov, D.S. Ryabchikov, I.N. Goryachkina // Innovative solutions in the field of development of transport systems and road infrastructure: Materials of the All-Russian Student Scientific and practical conference dedicated to the professional holiday – Motor Transport Worker's Day on October 27, 2022. Publishing House of Ryazan State Agrotechnological University. Ryazan, 2022. pp. 154-159.

13 Shemyakin, A.V. Complex digitalization at automobile transport enterprises: prospects for implementation / A.V. Shemyakin, A.B. Martynushkin, O.V. Lozovaya, N.N. Pashkang, V.V. Terentyev // Truck. 2023. No. 6. pp. 30-34. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-6-30-34

14 Shemyakin, A.V. Modern approaches to ensuring road safety / A.V. Shemyakin, V.V. Terentyev, A.B. Martynushkin // Topical issues of transport and mechanization in agriculture. Materials of the national scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Bychkov. Ministry of Agriculture of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev" Automobile Faculty. 2023. pp. 347-353.

15 D. Ryabchikov, I. Marusina, A. Shemyakin, M. Alexeevsky and V. Malchikov, "The relevance of the Use of Electric Buses at Motor Transport Enterprises for Intracity Passenger Routes," 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EM-CTECH), Vienna, Austria, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934070.

16 V.N. Malchikov, A. V. Shemyakin, D. S. Ryabchikov, A. V. Marusin and A. A. Polyarush, "Implementation of Unmanned Vehicles to Improve the Quality of Passenger Transportation," 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EM-CTECH), Vienna, Austria, 2022, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934038.

© Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Тимакина А.А., Комаров Я.В., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-77-86



УДК 656.021.2

UDC 656.021.2

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

SUBSTANTIATION OF THE METHODOLOGY FOR CONDUCTING A STUDY OF THE INTENSITY OF TRAFFIC FLOWS

Шемякин Александр Владимирович, д.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Shemyakin Alexander Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: shem.alex62@yandex.ru

Успенский Иван Алексеевич, д.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Uspensky Ivan Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: ivan.uspensckij@yandex.ru

Рябчиков Дмитрий Сергеевич, к.т.н., профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: rds_62@mail.ru

Ryabchikov Dmitry Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: rds_62@mail.ru

Тимакина Алина Александровна, аспирант, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, e-mail: tim-tim2412@mail.ru

Timakina Alina Alexandrovna, Postgraduate student, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, e-mail: tim-tim2412@mail.ru

✉¹ **Ключникова Ирина Дмитриевна**, младший научный сотрудник, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

✉¹ **Klyuchnikova Irina Dmitrievna**, junior research assistant, VUNC Air Force "VVA", Voronezh, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлена методика замеров интенсивности транспортных потоков, которая обеспечивает получение необходимых исходных данных для построения качественной транспортной модели. Для дальнейших расчетов было произведено натурное обследование необходимых для анализа пунктов учета. Полученный в результате обследований видеоматериал обработан согласно действующей нормативной документации по всем типам транспортных

Annotation. This paper presents a methodology for measuring the intensity of traffic flows, which provides the necessary initial data for the construction of a high-quality transport model. For further calculations, a full-scale survey of the accounting points necessary for the analysis was carried out. The video material obtained as a result of the surveys was processed in accordance with the current regulatory documentation for all types of vehicles and presented in the form of intensity pass-ports for each accounting point.

средств и представлен в виде паспортов интенсивности для каждого пункта учета.

Ключевые слова: ИНТЕНСИВНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ, РЕОРГАНИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ, ТИПЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ЗАМЕРЫ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ. **Keywords:** INTENSITY OF TRAFFIC FLOWS, REORGANIZATION OF TRAFFIC, TYPES OF VEHICLES, MEASUREMENTS OF TRAFFIC FLOWS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивность движения (ИД) определяет эксплуатационное воздействие на автомобильные дороги как вида сооружения и обладает самостоятельным значением. При этом она является случайной величиной как функцией пространственных и временных факторов [1].

В ходе контроля и регистрации движения в городской черте значение приобретает удельная интенсивность, при этом термин «приведенная интенсивность» используется при проведении более детальных расчётов пропускной способности дороги. Данные интенсивности определяются пространственной неравномерностью движения (ПНД) по различным участкам дорог в масштабах их распределения улично-дорожной сети (УДС) от малых участков сетей районов до крупных сетей регионов. Схематично ПНД изображается на картограммах с указанием суммарной ИД в обоих направлениях [2]. Планограмма изображается на плане исследуемой УДС города по всем направлениям ИД, в том числе, и по каждой полосе рассматриваемой дороги.

В ходе проводимых исследований также может быть использована цифrogramма, на которой ИД обозначается в цифровом формате.

Известные статистические данные показывают, что ИД существенно различается для городских УДС и загородного движения по таким параметрам как неравномерность ИД по времени вследствие цикличности в масштабах месяцев, недель, суток, часов, пятиминутных и пятисекундных интервалов, светофорных циклов [1-5]. Для городской ИД в недельном масштабе выделяется пятница как самый нагруженный день, а суббота и воскресенье - как наименее нагруженные дни [4]. Ежедневно ИД в городе максимальна и имеют место ее пики в утренние и вечерние часы. В загородных дорогах в выходные дни ИД наиболее высоки, а ежедневные пиковые нагрузки не так заметны, при этом вечерние пики более высоки [5].

В зависимости от цели и задач проводимых исследований, направленных на детальное изучение особенностей дорожного движения, получаемые данные находятся с использованием документальных методов исследования, математического моделирования и т.д.

В рамках планового частичного закрытия движения транспорта по ул. Первомайский проспект в связи с выполнением ремонтных работ теплотрассы планируется рассмотреть изменение организации дорожного движения на центральной артерии города Рязани.

Планирование и проведение транспортных исследований включает в себя сбор и анализ данных об интенсивности движения транспортных потоков в ключевых узлах и разработку мероприятий по реорганизации дорожного движения с учетом этапности перекрытия движения.

Целью исследования является сбор и анализ данных о параметрах дорожного движения, а также исследование интенсивности движения транспортных потоков в целях реорганизации дорожного движения и перенаправления транспортных потоков.

Задачи исследований включают в себя:

1. Сбор и анализ данных по интенсивности транспортных потоков.
2. Предложение по реорганизации дорожного движения на период проведения ремонтных работ.

2 Материалы и методы

Построение транспортной модели является инструментом для оценки эффективности мероприятий по организации дорожного движения [6, 7]. В данном отчете предлагается рассмотреть несколько ключевых узлов, определить маршруты объезда и получить прогноз эффективности предлагаемых мероприятий.

В выбранный временной интервал на обследуемом транспортном узле на стационарный штатив устанавливается видеокамера, в поле зрения которой попадают все измеряемые транспортные потоки.

При невозможности обеспечить попадание в поле зрения видеокамеры всех регистрируемых транспортных потоков, в транспортном узле одновременно устанавливается две видеокамеры. Допускается осуществление видеосъемки из автомобиля при обеспечении регистрации всех направлений движения в транспортном узле.

Установка средств видеофиксации должна быть выполнена на необходимую высоту для обеспечения повышенной видимости объектов и исключения долговременного эффекта «загораживания» обзора транспортом (рис. 1).

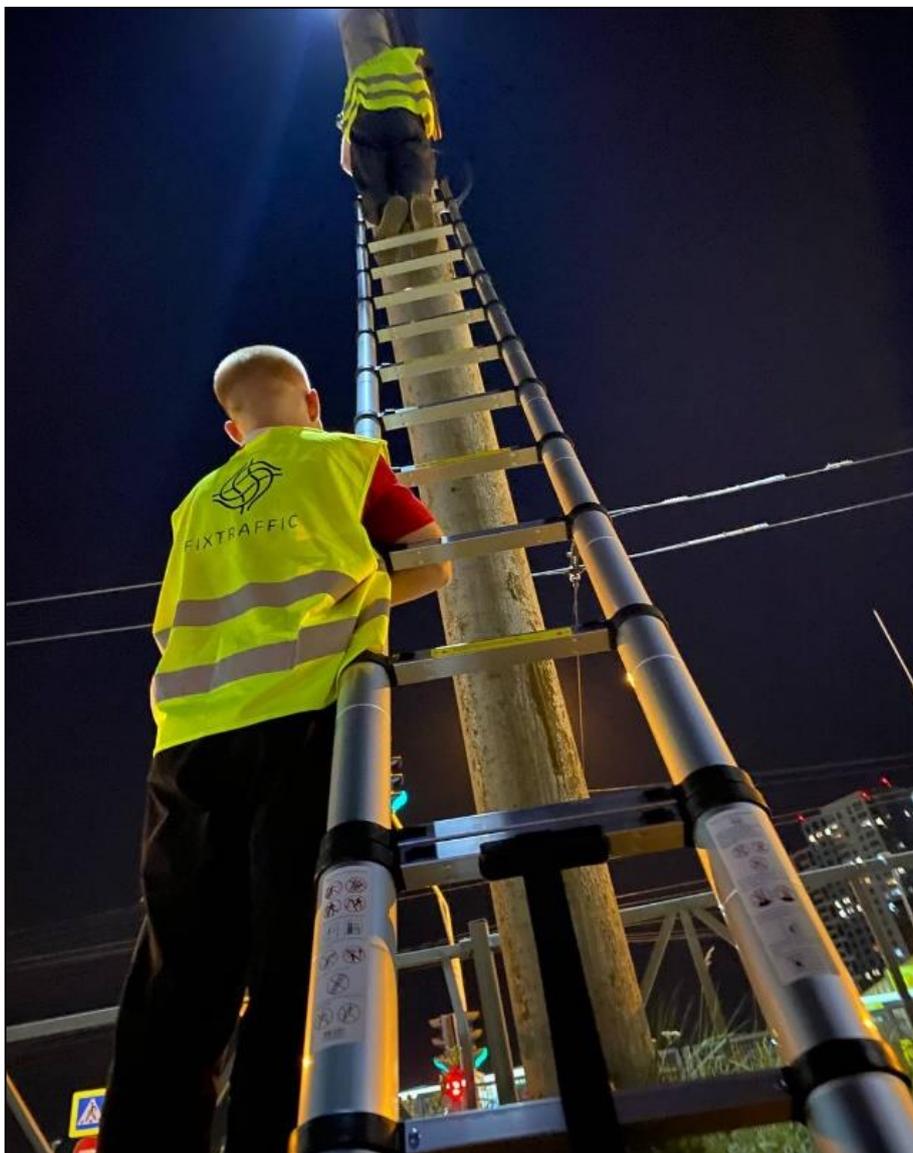


Рисунок 1 – Установка оборудования для замера интенсивности потоков

При производстве работ по учету интенсивности движения применяется следующее оборудование:

- позволяющее осуществлять видеосъемку в условиях осадков (быть пыле- и влагозащищенным);
- разрешение не менее 1280x720;
- частота кадров – не менее 20 кадров в секунду;
- транспортное средство, бортовой компьютер (ноутбук) с питанием от бортовой сети 12 В;
- жесткие диски объёмом не менее 1 Тб для регулярного копирования информации;
- GPS/Глонасс-модули (координаты места проведения работ) для обеспечения устойчивого вычисления координат местоположения.

Видеосъемка должна фиксировать распределение транспортных потоков по всем разрешенным направлениям движения, и обеспечивать возможность распознавания категорий транспортных средств. Время выгружаемых данных составляет 14 стационарных пунктов учета суточной интенсивности дорожного движения (таблица 1).

Таблица 1 – Перечень стационарных пунктов учета суточной интенсивности дорожного движения

№	Широта	Долгота	Наименование перекрестка
1	54.63089776616082	39.70472929937044	Пересечение Первомайский просп. - ул. Вокзальная
3	54.62903976406798	39.71620378953575	Пересечение Первомайский просп. - ул. Дзержинского
4	54.629357217590254	39.7242182300721	Пересечение Первомайский просп. - ул. Каширина
5	54.637106048343966	39.72309181426251	Пересечение ул. Каширина - ул. Солнечная
7	54.62927941039186	39.721798989516905	Пересечение Первомайский просп. - ул. Вокзальная
8	54.629215011454534	39.733657039760956	Пересечение Первомайский просп. - ул. Маяковского
9	54.62920567455805	39.736097849964416	Пересечение Первомайский просп. - ул. Соборная
10	54.63151492761052	39.740201629756925	Пересечение ул. Ленина - ул. Соборная
11	54.62517505858783	39.716592826007435	Пересечение ул. Дзержинского - ул. Высоковольтная
19	54.62124563613431	39.70447182215826	Пересечение ул. Высоковольтная – ул. Весенняя
23	54.63288578907059	39.724213205771015	Пересечение ул. Семинарская - ул. Каширина
31	54.624098511807894	39.6993537197832	Пересечение ул. Чкалова - ул. Весенняя
32	54.631412654410646	39.70307662589545	Пересечение Московское ш - Михайловское ш

Классификация и подсчет транспортных средств, а также представление результатов будут выполнены согласно разработанным формулярам. Данные по проведенным замерам необходимо предоставить с разбивкой по каждому часу [8].

3 Результаты исследований

Фиксация результатов наблюдений выполняется в соответствии с представленной ниже классификацией, позволяющей привести результаты к системам транспорта (рис. 2).

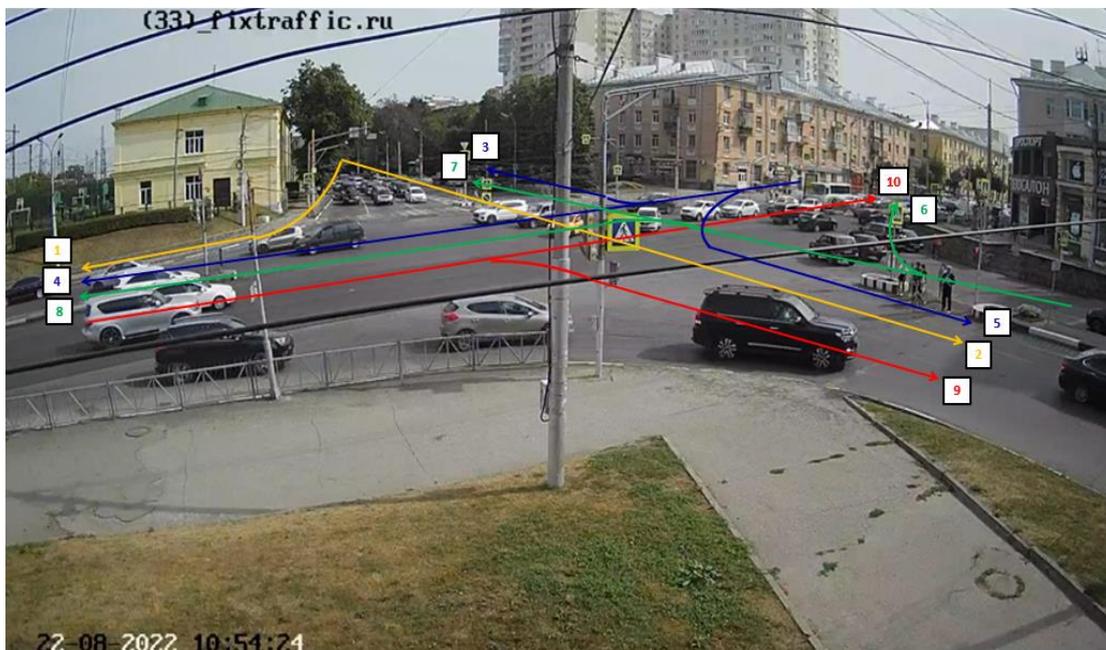


Рисунок 2 – Фото с камеры (с отмеченными направлениями движения транспортных средств)

Обработка и анализ результатов исследования интенсивности транспортных потоков проводится сотрудниками ООО «Фикстрафик» (рис. 3).

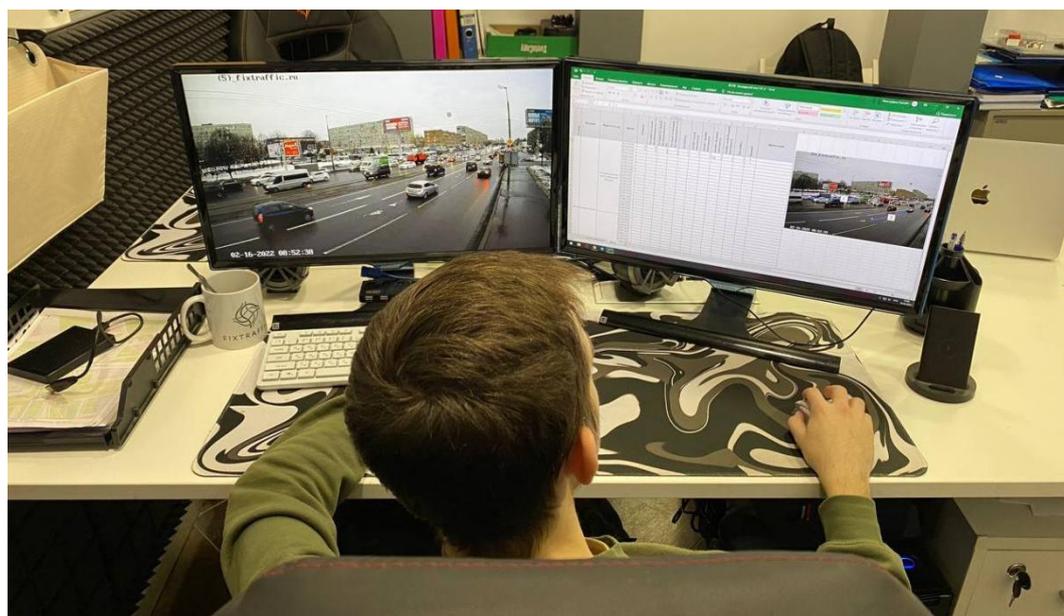


Рисунок 3 – Обработка и анализ результатов исследования интенсивности транспортных потоков

Типы транспортных средств, подлежащие к учету, приведены в таблице 2.

После того, как было отснято видео на выбранных перекрестках, было подсчитано количество транспортных средств. Полученные данные были занесены в таблицу, в которой транспортные средства проклассифицированы по виду (грузовые ТС, легковые автомобили и т.д.). На рисунке 4 представлено расположение точек замеров интенсивности ТС на карте.

Таблица 2 – Типы транспортных средств

Группа ТС	Тип транспортного средства	Коэффициент приведения к легковому автомобилю
1	Легковые автомобили, небольшие грузовики (фургоны) и другие автомобили с прицепом и без него	1,0
2	Двухосные грузовые автомобили	1,5
3	Трехосные грузовые автомобили	1,8
4	Четырехосные грузовые автомобили	2,0
5	Четырехосные автопоезда (двухосный грузовой автомобиль с прицепом)	2,2
6	Пятиосные автопоезда (трехосный грузовой автомобиль с прицепом)	2,7
7	Трехосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с полуприцепом)	2,2
8	Четырехосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с полуприцепом)	2,7
9	Пятиосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с полуприцепом)	2,7
10	Пятиосные седельные автопоезда (трехосный седельный тягач с полуприцепом)	2,7
11	Шестиосные седельные автопоезда	3,2
12	Автомобили с семью и более осями и другие	3,2
13	Автобусы	3,0

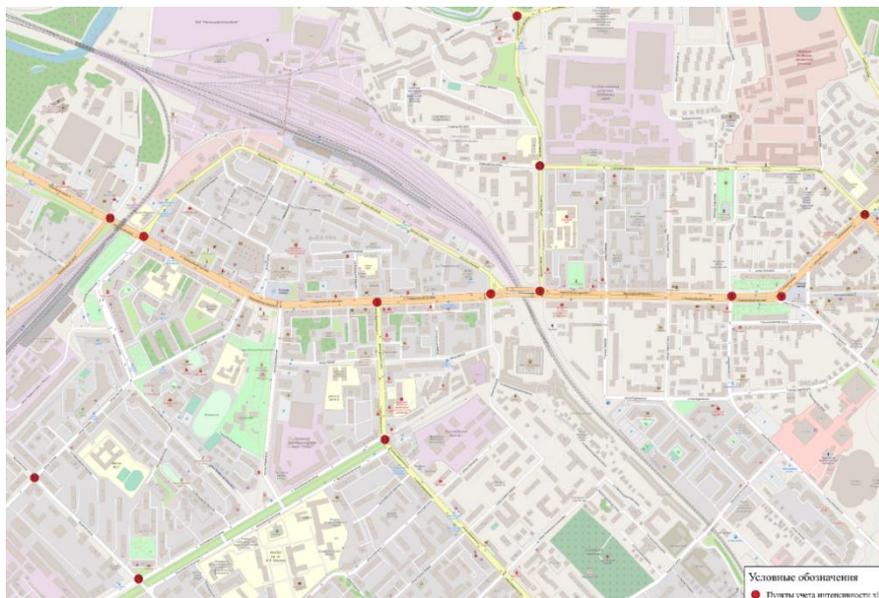


Рисунок 4 – Расположение точек проведения замеров на карте

Изученные направления движения транспортных средств на перекрестке Первомайский проспект – ул. Вокзальная представлены на рисунке 5. Каждому направлению движения присваивается свой номер для удобства дальнейшего внесения значения интенсивности транспортных потоков.

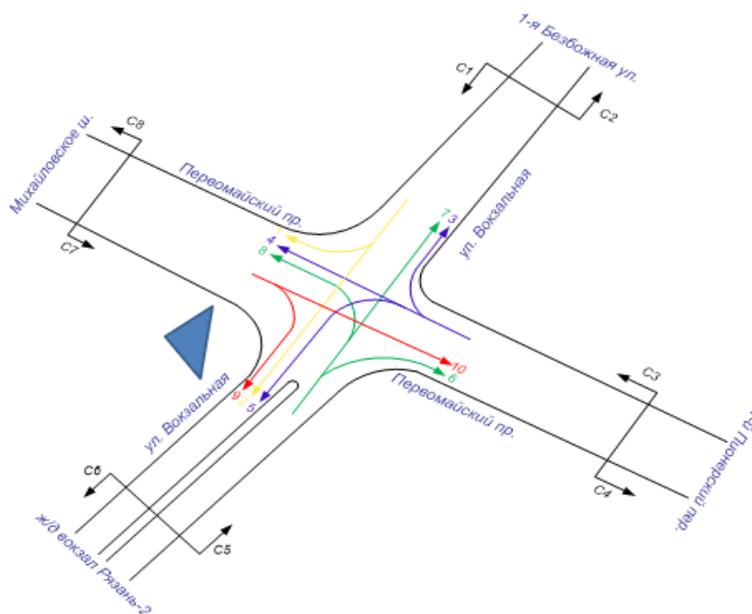


Рисунок 5 – Схема направления движения транспортных средств

Далее были подытожены все значения, полученные после обчета, и сформирована общая таблица с процентным соотношением каждого вида транспортного средства (для наглядности построена диаграмма) (рис. 6).

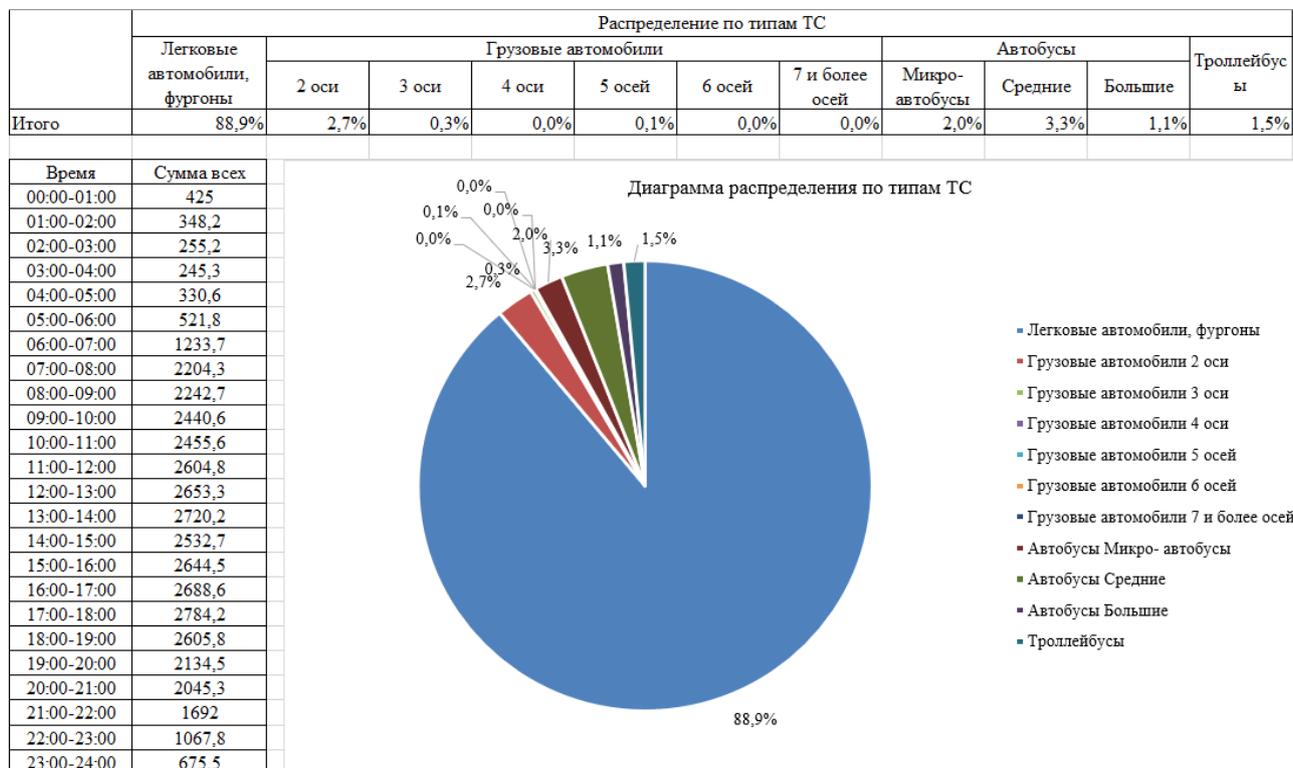


Рисунок 6 – Полученное количество транспортных средств

По данным значениям видно, что преимущественно в потоке находятся легковые автомобили, фургоны, что свойственно для центральной части города [9–11].

4 Обсуждение и заключение

Рассмотренная методика замеров интенсивности транспортных потоков обеспечивает получение необходимых исходных данных для построения качественной транспортной модели.

Для дальнейших расчетов было произведено натурное обследование необходимых для анализа пунктов учета. Полученный в результате обследований видеоматериал обработан согласно действующей нормативной документации по всем типам транспортных средств и представлен в виде паспортов интенсивности для каждого пункта учета.

Постоянная базовая модель позволит оценить эффективность изменения организации дорожного движения в узле, например, провести оптимизацию светофорного регулирования, проверить эффективность локально-реконструкционных мероприятий, оценить изменение движения по полосам, оценить влияние парковки на дорожную ситуацию.

В результате транспортная модель служит инструментом для прогнозирования эффективности предлагаемых мероприятий как по организации дорожного движения, так и по оптимизации маршрутной сети общественного транспорта.

Список литературы

1 Кильдишев А.А., Рябчиков Д.С., Терентьев В.В., Андреев К.П. Определение эффективности общественного транспорта путем опроса населения. В сборнике: Приоритетные направления инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений в АПК. Материалы международной студенческой научно-практической конференции. 2021. – С. 217-220.

2 Латышенок Н.М., Терентьев В.В., Тетерина О.А., Шемякин А.В. Оптимизация дорожного движения в городах. В сборнике: Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ - 2022). сборник научных статей 14-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2022. – С. 163-166.

3 Мальчиков В.Н., Терентьев В.В., Тетерина О.А. Цифровизация транспортной отрасли. В сборнике: Инновационные решения для АПК. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» совет молодых учёных ФГБОУ ВО РГАТУ совет молодых учёных и специалистов Рязанской области. 2023. – С. 291-296.

4 Порошин Д., Рябчиков Д.С., Андреев К.П. Совершенствование организации дорожного движения. В сборнике: Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса. Материалы Национальной научно-практической конференции. 2020. – С. 394-399.

5 Рябчиков Д.С., Аникин Н.В. Модель оценки качества обслуживания населения. В сборнике: Наука молодых - будущее России. сборник научных статей 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2021. – С. 182-185.

6 Тимакина А.А., Куминов Н.М., Рябчиков Д.С., Ульянов В.М., Мурог И.А. Анализ тематической модели транспортирования грузов с учетом дорожных и природно-климатических условий. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15. № 1. – С. 160-167.

7 Тимакина А.А., Ляляева Н.А., Рябчиков Д.С. Оценка и анализ параметров, характеризующих дорожное движение, и параметров эффективности организации дорожного движения. В сборнике: Актуальные вопросы транспорта и механизации в сельском хозяйстве. Материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 80-летию д.т.н., профессора Бычкова Валерия Васильевича 27 января 2022 года. Министерство сельского хозяйства РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». 2022. – С. 135-139.

8 Ульянов И.С., Рябчиков Д.С., Горячкина И.Н. Методология проведения замеров пассажиропотока в сечении участка маршрутной сети городского пассажирского транспорта. В сборнике: Инновационные решения в области развития транспортных систем и дорожной инфраструктуры. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». 2022. – С. 154-159.

9 Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Степашкина А.С. Научно-практические аспекты транспортного моделирования. В сборнике: Современные направления и подходы к проектированию и строительству инженерных сооружений. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». 2020. – С. 162-166.

10 Шемякин А.В., Мартынушкин А.Б., Лозовая О.В., Пашканг Н.Н., Терентьев В.В. Комплексная цифровизация на предприятиях автомобильного транспорта: перспективы внедрения. Грузовик. 2023. № 6. – С. 30-34.

11 Шемякин А.В., Терентьев В.В., Мартынушкин А.Б. Современные подходы к обеспечению безопасности дорожного движения. В сборнике: Актуальные вопросы транспорта и механизации в сельском хозяйстве. Материалы национальной научно-практической конференции, посвященные памяти д.т.н., профессора Бычкова Валерия Васильевича. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» Автодорожный Факультет. 2023. – С. 347-353.

References

1 Kildishev A.A., Ryabchikov D.S., Terentyev V.V., Andreev K.P. Determining the effectiveness of public transport by interviewing the population. In the collection: Priority directions of innovative development of transport systems and engineering structures in the agro-industrial complex. Materials of the international student scientific and practical conference. 2021. pp. 217-220.

2 Latyshenok N.M., Terentyev V.V., Teterina O.A., Shemyakin A.V. Optimization of traffic in cities. In the collection: Modern automotive materials and technologies (SAMIT - 2022). collection of scientific articles of the 14th International Scientific and Technical Conference. Kursk, 2022. pp. 163-166.

3 Boys V.N., Terentyev V.V., Teterina O.A. Digitalization of the transport industry. In the collection: Innovative solutions for the agro-industrial complex. Ministry of Agriculture of the Russian Federation Federal State budgetary educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev" Council of Young Scientists of the Federal State Budgetary Educational Institution of the Russian Federation Council of Young Scientists and Specialists of the Ryazan Region. 2023. pp. 291-296.

4 Poroshin D., Ryabchikov D.S., Andreev K.P. Improving the organization of traffic. In the collection: Technological innovations as a factor of sustainable and effective development of the modern agro-industrial complex. Materials of the National Scientific and Practical Conference. 2020. pp. 394-399.

5 Ryabchikov D.S., Anikin N.V. A model for assessing the quality of public services. In the collection: The Science of the young - the future of Russia. collection of scientific articles of the 6th International Scientific Conference of promising developments of young scientists. Kursk, 2021. pp. 182-185.

6 Timakina A.A., Kuminov N.M., Ryabchikov D.S., Ulyanov V.M., Murog I.A. Analysis of a mathematical model of cargo transportation taking into account road and climatic conditions. Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023. Vol. 15. No. 1. pp. 160-167.

7 Timakina A.A., Lyalyaeva N.A., Ryabchikov D.S. Evaluation and analysis of parameters characterizing road traffic and parameters of the effectiveness of traffic management. In the collection:

Topical issues of transport and mechanization in agriculture. Materials of the national scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Doctor of Technical Sciences, Professor Valery V. Bychkov on January 27, 2022. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev". 2022. pp. 135-139.

8 Ulyanov I.S., Ryabchikov D.S., Goryachkina I.N. Methodology for measuring passenger traffic in the section section of the route network of urban passenger transport. In the collection: Innovative solutions in the field of development of transport systems and road infrastructure. Ministry of Agriculture of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev". 2022. pp. 154-159.

9 Uspensky I.A., Ryabchikov D.S., Stepashkina A.S. Scientific and practical aspects of transport modeling. In the collection: Modern trends and approaches to the design and construction of engineering structures. Materials of the All-Russian Scientific and practical Conference. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev". 2020. pp. 162-166.

10 Shemyakin A.V., Martynushkin A.B., Lozovaya O.V., Pashkang N.N., Terentyev V.V. Integrated digitalization at automobile transport enterprises: prospects for implementation. Truck. 2023. No. 6. pp. 30-34.

11 Shemyakin A.V., Terentyev V.V., Martynushkin A.B. Modern approaches to road safety. In the collection: Topical issues of transport and mechanization in agriculture. Materials of the national scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Bychkov. Ministry of Agriculture of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev" Automobile Faculty. 2023. pp. 347-353.

© Шемякин А.В., Успенский И.А., Рябчиков Д.С., Тимакина А.А., Ключникова И.Д., 2023

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-87-97



УДК 629; 656.025.4

UDC 629; 656.025.4

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА СТЕНДЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ И ВЛИЯНИЯ НА НИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ

DETERMINATION ON THE STAND OF THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF THE FUNCTIONING OF GEARBOX BEARINGS AND THE INFLUENCE OF OPERATIONAL DEFECTS ON THEM

✉¹ **Лелиовский Константин Ярославич**, к.т.н., доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: kleliovskiy@mail.ru

✉¹ **Leliovsky Konstantin Yaroslavich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Construction and Road Machines", Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, e-mail: kleliovskiy@mail.ru

Молев Юрий Игоревич, д.т.н., доцент, кафедра «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: moleff@yandex.ru

Molev Yuri Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Construction and Road Machines", Nizhny Novgorod State Technical University named after Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: moleff@yandex.ru

Аннотация. Функционирование механических агрегатов транспортных средств, в частности, трансмиссии, связано с протеканием процессов изнашивания, приводящим к изменениям конструктивных параметров их элементов. К ним относятся уменьшение геометрических размеров и форм, вызывающих появление чрезмерных вибраций и биений. Исследование характеристик вибраций может послужить основанием для выявления различных дефектов и повреждений, возникающих при их эксплуатации, а также определения их степени. Наиболее рациональными, с этой точки зрения, представляются испытания на стенде.

Annotation. The functioning of mechanical units of vehicles, in particular, the transmission, is associated with the course of wear processes, leading to changes in the structural parameters of their elements. These include a reduction in geometric dimensions and shapes, leading to the appearance of excessive vibrations and beats. The study of vibration characteristics can serve as a basis for identifying various defects and damages that occur during their operation, as well as determining their degree. The most rational, from this point of view, are the tests on the stand.

Ключевые слова: ВИБРОДИАГНОСТИКА, МОТОРНЫЙ СТЕНД, ИЗНАШИВАНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА ОГИБАЮЩЕЙ СПЕКТРА, РЕЖИМЫ НАГРУЖЕНИЯ.

Keywords: VIBRATION DIAGNOSTICS, MOTOR STAND, WEAR, CHARACTERISTIC OF THE ENVELOPE OF THE SPECTRUM, LOADING MODES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Рассматриваемые в данной статье диагностические мероприятия предполагают запись вибрационных сигналов агрегатов трансмиссии, элементы конструкции которых пребывают, в исправном техническом состоянии, а также дефектном и предотказном [9,10]. Объектом экспериментальных исследований выбирается транспортно-технологическое средство ТТС 33071 «Кержак», эксплуатирующееся в условиях бездорожья, его трансмиссия, и в частности, пятиступенчатая коробка передач, изготавливаемая на ОАО «Русские моторы» ОАО «Группа «ГАЗ». Для сопоставимости результатов численных и натурных испытаний, были выбраны одинаковые параметры нагружения.



Рисунок 1 – Моторный стенд

Эксперименты проводились на моторном стенде с гидравлическим нагружающим устройством (рис. 1). Он даёт возможность создавать нагрузку на изучаемую коробку передач крутящим моментом посредством двигателя внутреннего сгорания и нагружающим моментом сопротивления, соответствующим возникающему при движении реального транспортного средства по дорогам. Преимуществом такого способа является то, что режимы нагружения наиболее близки к тем, которые возможно получить при пробеговых испытаниях. При этом помехи, неизбежно возникающие при движении транспортного средства по опорному основанию, в данном случае не будут влиять на регистрируемые вибрационные сигналы. Это позво-

лит преодолеть такой характерный недостаток косвенных методов, к которым относится и вибродиагностический, как невысокая помехоустойчивость [12]. В ходе описываемых в статье испытаний также проводилась проверка адекватности разработанной в ходе исследования математической модели. Проверяемыми показателями являлись: частота и амплитуда вибраций, их форма и вид. Самым распространенным и, одновременно, простым из существующих способов проверки адекватности модели является способ на основе подачи известного входного воздействия и регистрации реакции отклика на выходе. По их параметрам судят о функциональных характеристиках системы [18,20]. Одним из наиболее эффективных способов является подача импульсного воздействия. Оно, как правило, возбуждает в механической колебательной системе сложные затухающие колебания в определенном диапазоне частот. Длительность подаваемого импульса и ширина его спектра, как правило, бывают взаимосвязаны. Для приемлемого по достоверности выявления технического состояния объекта требуется, чтобы ширина спектра возмущающего воздействия была не менее ширины спектра собственных колебаний системы, в пределах которой, как правило, находятся все существенные частоты. Учитывая характеристики измерительного комплекса предельная частота составляла $f_{max} = 10$ кГц. При этом продолжительность единичной записи реализации составит 1 с. Обработка полученного первичного информационного сигнала осуществляем в соответствии со следующей методикой.

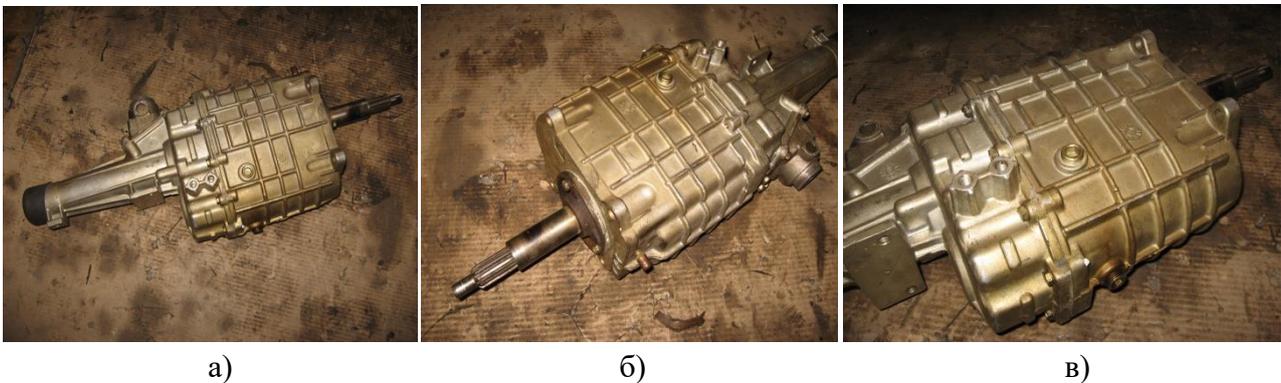
2 Материалы и методы

1. На моторный стенд монтируется коробка передач, параметры технического состояния элементов которой находятся в нормативных пределах.
2. На исследуемую коробку передач устанавливаются вибродатчики, подсоединяемые к измерительному комплексу, включающему в себя: внешний анализатор сигналов со встроенной платой аналого-цифрового преобразования, а затем - к ноутбуку, питаемому от сети 220 В.

3. Двигатель стенда запускается, в трансмиссию поступает возмущающее воздействие (крутящий момент).
4. Производится имитация нагружения от дороги при помощи гидродинамической муфты, (тормозящего устройства).
5. Посредством присоединенного к коробке передач измерительного комплекса осуществляется измерение вибрационных характеристик. Специальное программное обеспечение комплекса осуществляет необходимую обработку сигналов.
6. Изменение крутящего момента производится путем изменения оборотов коленчатого вала двигателя, т.е. подбором цикловой подачи топлива.
7. Изменением гидравлического сопротивления в тормозящем устройстве (повышение напора подаваемой в его полость жидкости) реализуют подбор нагружающего воздействия, имитирующего нагрузку от дороги. Затем повторяют действия п.5, согласно принятой программе испытаний.
8. Проводится сохранение вибрационных характеристик работы коробки передач с заведомо технически исправным состоянием в памяти ноутбука. Должны быть сохранены спектры вибросигнала на всех ступенях в диапазонах, эквивалентных штатным. Данные спектры можно принимать в качестве опорных.
9. Агрегат демонтируется со стенда. После этого на него устанавливается коробка передач, имеющая дефект, известный заранее, (повышенный износ зубьев, скол, дефекты подшипников и др.). В случае расширенных испытаний допускается монтаж коробок передач с комбинацией различных дефектов (например, излом сепаратора подшипника совместно со сколом зуба, повышенный износ зубьев совместно с износом беговых дорожек подшипника и т.п.).
10. Повторяются действия, приведенные в пунктах 3-7.
11. Проводится сохранение вибрационных характеристик работы коробки передач с заведомо технически неисправным состоянием в памяти ноутбука. Должны быть сохранены спектры вибросигнала на всех ступенях в диапазонах, эквивалентных штатным с заранее известными неисправностями. На их базе, впоследствии, проводится классификация исследуемых дефектов по вибрационным характеристикам, (определяются характерные частоты и амплитуды).
12. Происходит формирование исходных данных для последующей обработки их посредством нейросетевых алгоритмов.
13. В дополнительном программном модуле измерительного комплекса, (в ноутбуке), формируется нейронная сеть для ускоренного распознавания образа спектра. На её вход подаются спектры значений среднеквадратичных отклонений амплитуд вибросигнала. На выходе получают значение вероятностей присутствия в исследуемой коробке передач различных дефектов и повреждений.
14. Делается заключение о точности оценки нейронной сетью наличия дефекта или повреждения.
15. Устанавливается на моторный стенд коробка передач с неизвестным заранее техническим состоянием.
16. Выполняются мероприятия, приведенные в пунктах 2-7.
17. Выполняются мероприятия, приведенные в пунктах.13-14.
18. Осуществляется демонтаж со стенда исследуемой коробки передач с заранее неизвестным техническим состоянием. Проводится её разборка с обязательной метрологической проверкой и дефектовкой. В ходе этого дополнительно проверяется точность диагноза, даваемого нейронной сетью.
19. При проведении данного цикла действий проводим отработку методики вибродиагностики агрегатов трансмиссии (в частности, коробок передач).

3 Результаты исследований

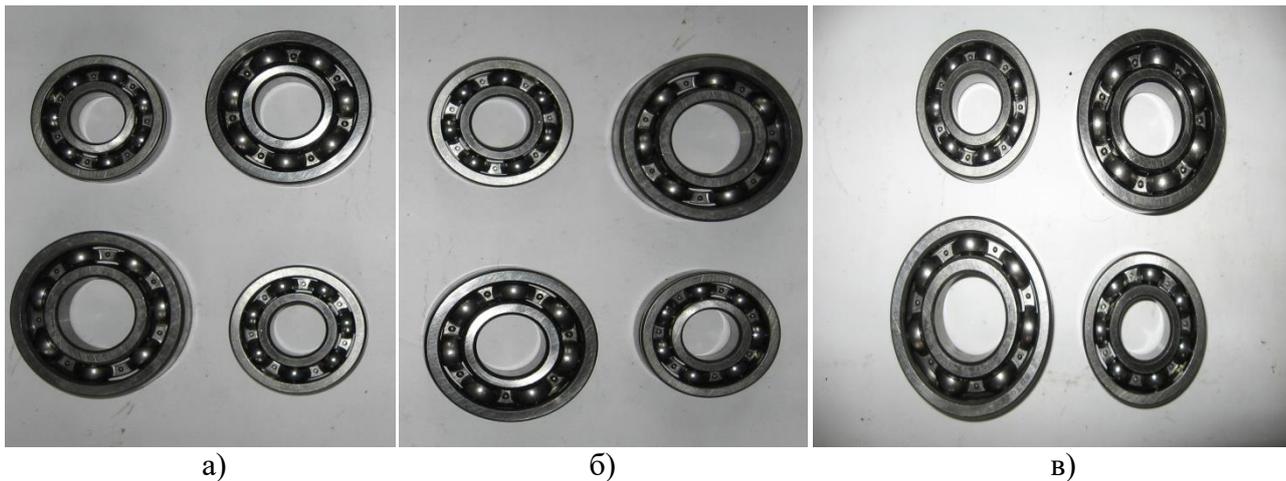
Изучение изменения вида спектральных характеристик в зависимости от присутствия того или иного дефекта было реализовано на агрегатах, приведенных на рис. 2. На них изучался характер изменения графиков огибающей энергетического спектра амплитуд мощности вибраций при наличии эксплуатационных дефектов, а также дефектов, обусловленных погрешностями сборки, вероятными при их изготовлении или сборке в ходе ремонта. Наиболее характерным для данных испытаний был выбран следующий режим: обороты коленчатого вала двигателя поддерживались вблизи уровня $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$. Это обусловлено тем, что крутящий момент двигателя ЗМЗ-406, входящего в состав моторного стенда при таких оборотах: $T_B = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что является для него максимальным. Момент нагружающего сопротивления, создаваемым гидравлическим тормозом, $T_{Hf} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$.



а - коробка передач с неизвестным техническим состоянием элементов; *б* - коробка передач, на которую устанавливались подшипники с различным техническим состоянием; *в* – подменная коробка передач, на которую при испытаниях устанавливались подшипники с различным техническим состоянием

Рисунок 2 – Исследуемые коробки передач

Предварительно делались фотографии каждой группы изношенных подшипников, что было установлено предварительно метрологическими средствами и методами. Определялся вид дефекта или повреждения и степень его развития. На рис. 3 и в табл. 1 приведены их внешний вид и основные технические данные, полученные при метрологической проверке. На рис. 3, в частности, представлены: задние подшипники промежуточного и вторичного вала исследуемой коробки передач. Согласно данным, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод о том, что исследуемые подшипники находятся в удовлетворительном работоспособном состоянии, степень изнашивания их элементов не предельная. Следует заметить, что при описываемых испытаниях, техническое состояние зубчатых колес исследуемых коробок передач было нормативным. Это необходимо для исключения их влияния.



a – 10 %; *б* – 20 %; *в* – 30 %.

Рисунок 3 – Подшипники В6-50907АКШ; В6-50706УШ1; В6-50307А1Е с величиной износа тел качения в сравнении с нормативной

Таблица 1 - Основные геометрические характеристики исследуемых подшипников

Наименование параметра	В6-50907АКШ	В6-50706УШ1	В6-50307А1Е
Диаметр наружной обоймы	62,080 мм	82,150 мм	80,000 мм
Диаметр внутренней обоймы	25,490 мм	36,980 мм	34, 570 мм
Ширина подшипника	17,000 мм	22,000 мм	21,000 мм
Диаметр тел качения:			
- нормативный	12,000 мм	16,000 мм	15,000 мм
- на рис. 3 а	11,880 мм	15,840 мм	14,850 мм
- на рис. 3.б	11,760 мм	15,680 мм	14,700 мм
- на рис. 3 в	11,640 мм	15,520 мм	14,550 мм

Подшипники коробки передач, приведённой на (рис. 2, б), установленные в опорах валов, были заменены образцами, показанными на (рис. 3). После чего была проведена окончательная сборка и произведён её монтаж на моторный стенд. Затем были проведены испытания согласно изложенной выше методике и обработка полученной диагностической информации. Её, как это было указано выше, можно признать универсальной, позволяющей с некоторыми корректировками выявлять широкий ряд дефектов и повреждений коробок передач. Ниже приведены примеры графиков среднеквадратичных значений амплитуд спектра мощности вибраций исследуемых коробок передач с имеющимися известными неисправностями подшипниковых узлов. Замеры осуществлялись на 3-й передаче, использование которой при движении транспортного средства наиболее частое. Для наглядности сравнения графики спектров мощности вибросигнала, полученные в ходе стендового эксперимента приведены в наложении на аналогичные графики, полученные расчётом, в ходе вычисления в среде *MathLAB* эквивалентной динамической модели, составленной посредством реализации уравнения аналитической механики.

Затем на стенде было исследовано влияние отклонений от соблюдения технологии сборки рассматриваемых коробок передач, как правило, имеющих место при неграмотном ремонте. Наиболее частыми из них являются: неверное центрирование вторичного вала, из-за перекоса внутренней обоймы подшипников относительно внешней вследствие ошибочного преднатяга. Это ведет к интенсификации их износа, вызванного чрезмерной нагрузкой на их контактирующие поверхности и, как следствие, снижению их механического ресурса.

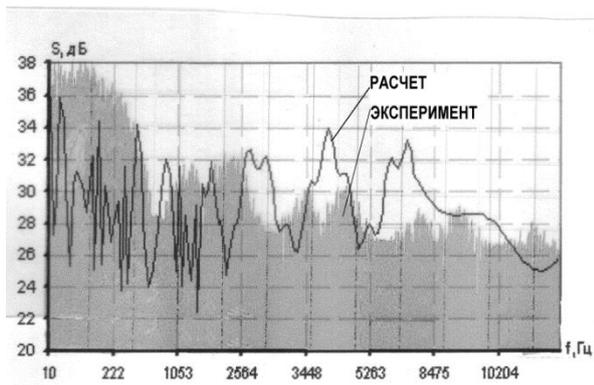


Рисунок 4 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач производства, полученные в ходе расчета и эксперимента, зарегистрированные при 10% износе поверхностей тел качения переднего подшипника вторичного вала

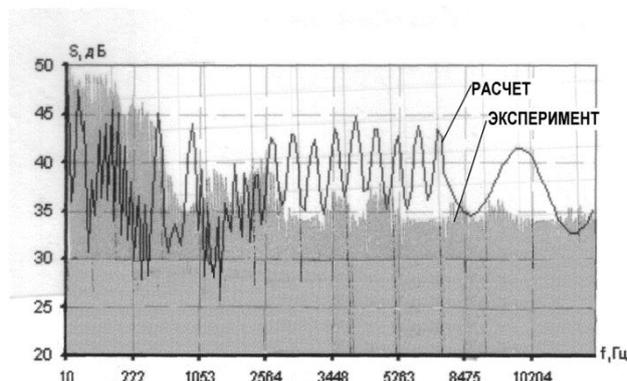


Рисунок 5 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач, полученные в ходе расчёта и эксперимента, зарегистрированные при 20% износе поверхностей тел качения переднего подшипника вторичного вала

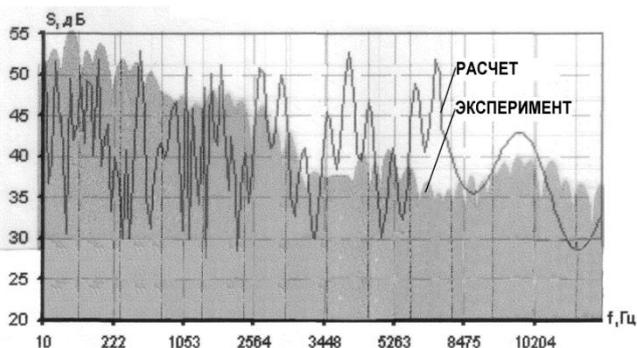


Рисунок 6 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач производства, полученные в ходе расчёта и эксперимента, зарегистрированные при 30% износе поверхностей тел качения переднего подшипника вторичного вала

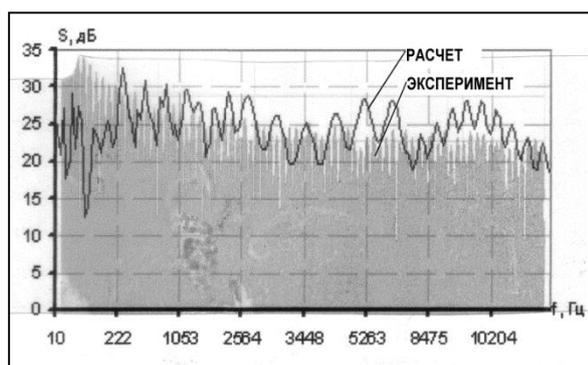


Рисунок 7 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач, полученные в ходе расчёта и эксперимента, при неправильном центрировании переднего подшипника вторичного вала при её сборке

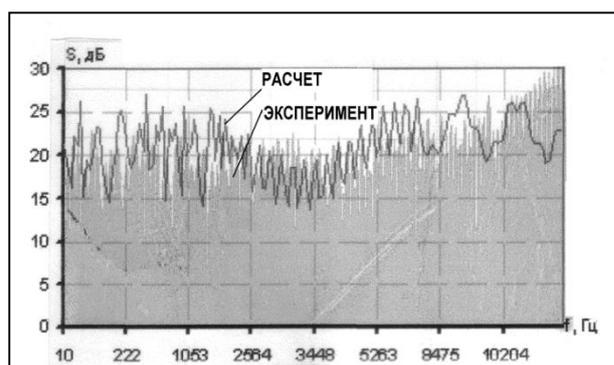


Рисунок 8 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач, полученные в ходе расчёта и эксперимента, зарегистрированные при перекосе наружного кольца переднего подшипника вторичного вала при её сборке

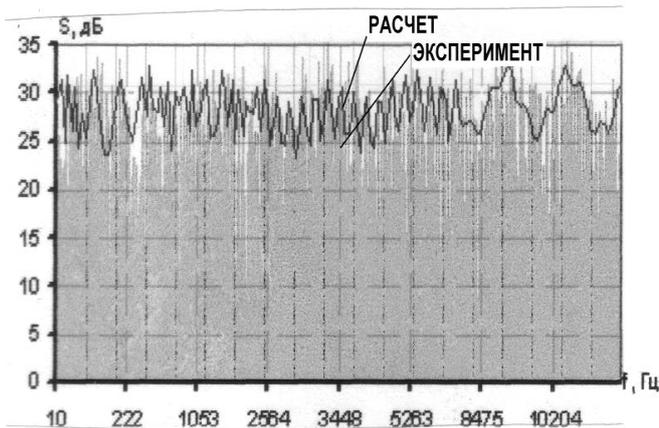


Рисунок 9 – Графики среднеквадратичных значений амплитуд мгновенного спектра мощности вибросигнала на 3-й ступени исследуемой коробки передач, полученные в ходе расчета и эксперимента, зарегистрированные при перекосе внутреннего кольца переднего подшипника вторичного вала при её сборке

Следует отметить, что их долговечность во многом зависит от класса точности. Известно, что подшипники высших классов изначально имеют меньшие люфты.

Исследуемые подшипники (рис. 3) монтировались на выходные валы коробки передач с преднамеренным внесением названных погрешностей. На рис. 7 и 8 приведены примеры графиков вибросигнала, зарегистрированных в ходе испытаний. После их проведения коробка передач демонтировалась, устанавливалась подменная, на которой были имитированы следующие из исследуемых неисправностей, связанных с техническим состоянием или монтажом подшипников. Например, перекос внутренней обоймы относительно внешней, т.е. выходной вал был смонтирован с перекосом. Пример графика сигнала, свидетельствующего о данной неисправности, приведено на рис. 9. Испытательные режимы при этом оставались неизменными, так же, как и размещение датчиков на картере коробки передач: один - на его верхней поверхности вблизи подшипниковой опоры выходного вала, другой - на его боковой поверхности в том же районе.

4 Обсуждение и заключение

Анализируя рис. 4-6, можно сделать заключение о том, что повышение величины износа тел качения отражается на графиках как увеличение дисперсии амплитуды спектра мощности вибросигнала (до 1,5-2 раз). Кроме того, наблюдается повышение интенсивности появления высших гармоник у одних и тех же составляющих вибрации. Это свидетельствует о возникновении явления локального соударения тел качения и обойм подшипников, т.е. об увеличении сил трения в пятнах контакта тел качения и беговых дорожек. Конструкция исследуемых подшипников, как показали проведённые испытания, обуславливает наибольшее проявление данного явления в области низких частот (рис. 4-6). Наибольшим образом дефекты проявляются в виде повышения амплитуд вибраций на высших гармониках низкочастотных составляющих колебаний при установке на испытуемую коробку передач подшипников с величиной износа тел качения 30 %. Следовательно, данную степень изнашивания следует признать как пороговую. При большей её степени, проявление её по спектру вибросигнала будет выражено ещё более явно. Этот вывод подтверждается в работах [11,15,16], а также в численных математических расчетах. На основе проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что подобные проявления рассматриваемого дефекта также обусловлено особенностями конструкции коробки передач с вертикальным разъемом картера, обладающим приемлемой жёсткостью при возмущающих колебаниях высокой частоты [14].

Анализируя характер экспериментальных зависимостей на (рис. 4-6), можно также сделать вывод о том, что потеря телами качения сферической формы не ведёт к выраженному приращению значений спектра амплитуд вибросигнала, как это получено расчетом в результате математического моделирования. Причем неважно, чем будет вызвано данное отклонение

от сферичности - износом, вызванным различными эксплуатационными причинами, или невысоким качеством изготовления подшипника. Тем не менее, из расчётов и проведенных экспериментов установлено, что для подшипников низкого качества изготовления (класса точности), имеется склонность к увеличению амплитудной дисперсии относительно некоторого среднего значения. Из рис. 4-6 также видно, что разноразмерность тел качения приводит к возникновению колебаний на частотах, кратных оборотным (равным числу оборотов вала), т.е. частотам вращения сепараторов и тел качения. Эти заключения подтверждаются в работах [8,15]. Наблюдаемые вибрационные явления обусловлены неравномерностью распределения динамической нагрузки в подшипниках вследствие разноразмерности тел качения. В общем случае всё это способствует ускорению износа и, как следствие, сокращению срока службы подшипника. Таким образом, вибрационные характеристики, примеры графиков зависимостей которых приведены на рис. 4-6, могут быть использованы в качестве диагностических признаков для определения степени изнашивания подшипников коробок передач.

Наиболее информативными с точки зрения диагностирования наличия перекосов наружной обоймы подшипника относительно внутренней являются диапазоны частот 0-2 кГц (рис. 7-9). Такие перекосы наиболее вероятны при некачественном монтаже вторичного вала рассматриваемой коробки передач. Например, при неиспользовании специальных центрирующих приспособлений. На графиках, приведённых на рис. 7-9, в спектрах, полученных в результате расчета математической модели для этих же дефектов в диапазоне частот 0-2 кГц также наблюдается аналогичное увеличение значений амплитуды вибраций. Это можно объяснить тем, что при неиспользовании необходимых приспособлений, при некачественном ремонте в ходе сборки исследуемой коробки передач, в силу особенностей её конструкции, обусловленных особенностями переднего и заднего картера, радиального подшипника задней опоры вторичного вала, как правило, происходит недонатяг и перенатяг подшипника. Что приводит к увеличению амплитуд колебаний на комбинированных частотах, наиболее высоких при значениях, кратных оборотным частотам коленчатого вала двигателя. Увеличение амплитуд спектра мощности вибрации в таком случае также объясняется тем, что кроме нештатного режима работы подшипников, происходит изменение положения пятен контакта тел качения относительно их нормативного положения по отношению внешней и внутренней обоймы в осевом направлении. Это, в свою очередь, как следствие, влечёт изменение пятна контакта в зацеплении шестерен [19]. Учитывая то, что испытания проводились на 3-й передаче, по характеру спектров вибраций (рис. 9) можно сделать вывод о том, что указанный «вторичный» дефект отслеживается по увеличению амплитуд спектра на оборотных частотах. В данном случае это характерные гармонические частоты 4, 6, 8 кГц [19]. Анализируя величины амплитуд спектра мощности вибросигнала на данных частотах, можно сделать вывод о том, что на исследуемой коробке передач внесение указанного дефекта монтажа подшипников привело к уменьшению на 10 % осевого перекрытия зубьев. Таким образом, можно сделать вывод о том, что погрешности монтажа и сборки при ремонте подобных коробок передач может привести не только к ускоренному изнашиванию непосредственно подшипников, но и зубчатых колес. Общим результатом этих процессов является снижение срока службы агрегата. На основании исследований численными методами и в ходе натурного стендового эксперимента некоторых дефектов подшипников, а также на основе обзора источников, изданных по аналогичным исследованиям, проведенным отечественными учеными [1-7,13,17], предлагается следующий диагностический паспорт (табл. 2).

Необходимо заметить, что приведенная таблица признаков неисправностей подшипников, которые могут быть диагностированы в ходе эксплуатации транспортных средств, не является абсолютно полной и окончательной. Она представляет один из возможных вариантов диагностического паспорта неисправностей и предусматривает возможности дополнения и уточнения.

Таблица 2 - Частоты основных амплитуд вибрации дефектных подшипников качения

Частота	Вид дефекта изготовления	Вид дефекта сборки	Вид дефекта износа
Кратная частоте вращения	Разноразмерность тел качения	—	Неравномерный износ тел качения
Кратная частоте вращения вала	Несоосность вала и внутреннего кольца	—	Неравномерный износ внутреннего кольца
Кратная частоте вращения вала с коэффициентом 2	Овальность внутреннего кольца	Перекося внутреннего кольца	Неравномерный износ внутреннего кольца
Кратная частоте вращения вала	Гранность внутреннего кольца	—	Неравномерный износ внутреннего кольца
Сумма частот, кратных частотам вращения тел качения	Отклонение формы тел качения от расчетной	—	Неравномерный износ, сколы на телах качения
Кратная частотам вращения нагруженных тел качения	Разноразмерность тел качения	Принудительная центровка валов	Раковины, трещины на наружном кольце
Кратная частотам вращения нагруженных тел качения с коэффициентом 2	—	Перекося наружного кольца	—
Кратная частоте нагруженного вала	—	Излом стыкуемых валов	—
Кратная частоте нагруженного вала с коэффициентом 2	—	Перекося внутреннего кольца	Раковины, трещины на внутреннем кольце

Список литературы

- 1 Абрамов, С.В. Прогнозирование состояния технических средств / С.В. Абрамов, А.Н. Розенбаум. – М.: Наука, 1990. – 357 с.
- 2 Асриян, Г.М. Возможности диагностирования вибрации сложных динамических систем / Г.М. Асриян // Колебания редукторных систем. – М.: Наука, 1980. – С.70 - 74.
- 3 Балицкий, Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
- 4 Балицкий, Ф.Я. Диагностика состояния планетарного редуктора для некоторых параметров / Ф.Я. Балицкий, А.Г. Соколова // Новые методы исследования шумов и вибрации и кибернетическая диагностика машин и механизмов: материалы Всесоюзн. симпозиума / Каунас. политехн. ин-т. – Каунас, 1978. С.74
- 5 Бамбалас, П. К вопросу о диагностировании подшипников / П. Бамбалас, К.М. Рагульскис, М. Рондоманскас // Физические методы исследования шумообразования и акустическая диагностика в машиностроении: Тез. докл. акуст. сем. / Куйбышев. политехн. ин-т. – Куйбышев, 1978. С. 13 –14.
- 6 Вейц, В.Л. Динамика машинных агрегатов, работающих с двигателями внутреннего сгорания // В.Л. Вейц, А.Е. Кочура. – Л.: Машиностроение, 1976. – 384 с.
- 7 Власов, С.В. Диагностика причин повышенной виброактивности газотранспортного оборудования в условиях Крайнего Севера / С.В. Власов, С.П. Зарицкий, В.А. Якубович / Контроль и диагностика. 1998. №3. С. 23 – 26.
- 8 Дорошко, С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам / С.М. Дорошко. - М.: Транспорт, 1984. – 259 с.

- 9 Зусман, Г.В. Особенности аппаратуры для вибродиагностики промышленных агрегатов / Контроль и диагностика. 1998. №1. С. 3 – 10.
- 10 Кононенко, В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением / В.О. Кононенко. – М.: Наука, 1964. – 254 с.
- 11 Костенко, В.И. Виброакустическая экспресс-диагностика силовых механических агрегатов: дисс...канд. техн. наук: 05.02.11: защищена: 05.12.02: утв. 04.03.03 / Костенко Владислав Игоревич. – СПб.: 2002. 162 с.
- 12 Сарбаев, В.И. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: 2-е изд. / В.И. Сарбаев [и др.]. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 380 с.
- 13 Решетов, Д.Н. Типовые переменные режимы нагружения деталей машин / Д.Н. Решетов, Р.М. Чатынян, В.З. Фадеев // Вестник машиностроения. 1980. №2. С. 7-10.
- 14 Семенов, В.М. Анализ собственных частот колебаний динамической системы «двигатель – трансмиссиям - движители - масса автомобиля на подвеске» В.М. Семенов [и др.] // Труды НАМИ. 1982, Вып. 185. С. 34 -51.
- 15 Сергеев, Е.И. Определение источников низко частотной модуляции зубцовой частоты в коробках скоростей фрезерных станков виброакустическим методом / Е.И. Сергеев, В.Б. Китаев, В.А. Кошечкин // Динамика станков: Тез. докл. Всесоюз. науч. – техн. конф. / Куйбышев. политехн. ин-т. – Куйбышев, 1980. С. 274 - 276.
- 16 Сергиенко, В.П. Экспериментальные методы определения вибрации и шума в тормозных системах и трансмиссиях мобильных машин // В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.Н. Савицкий / Композиционные материалы в промышленности: материалы XXVIII-й международной конференции. - Ялта – Киев, 2008, С. 54-57.
- 17 Цитович, И.С. Зубчатые колеса автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, В.А. Вавуло, Б.Н. Хваль. – Минск: Изд-во Мин-ва высшего, ср. спец. образования, 1962. – 396 с.
- 18 Шишкин, В.Н. Диагностика технического состояния трансмиссионных подшипников газотурбинных двигателей методом структурного анализа их вибросигналов / В.Н. Шишкин, Б.И. Комаров, М.С. Гайдай // Контроль. Диагностика. 2003. №4. С. 15-26.
- 19 Шупляков, В.С. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля / В.С. Шупляков. – М.: Транспорт, 1974. – 328 с.
- 20 Явленский, К.В. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем / К.В. Явленский, А.К. Явленский. – Л.: Машиностроение, 1983. – 239 с.

References

- 1 Abramov, S.V. Forecasting the state of technical means / S.V. Abramov, A.N. Rosenbaum. – М.: Nauka, 1990. – 357 p.
- 2 Asriyan, G.M. Possibilities of diagnosing vibrations of complex dynamic systems / G.M. Asriyan // Vibrations of gear systems. – М.: Nauka, 1980. – pp.70-74.
- 3 Balitsky, F.Ya. Vibroacoustic diagnostics of incipient defects / F.Ya. Balitsky, A.G. Sokolova, E.I. Khomyakov, etc. – М.: Mashinostroenie, 1984. – 120 p.
- 4 Balitsky, F.Ya. Diagnostics of the state of a planetary gearbox for some parameters / F.Ya. Balitsky, A.G. Sokolova // New methods of noise and vibration research and cybernetic diagnostics of machines and mechanisms: materials of the All-Union. Symposium / Kaunas. polytech. in-T. – Kaunas, 1978. p.74
- 5 Bambalas, P. On the issue of diagnosing bearings / P. Bambalas, K.M. Ra-gulskis, M. Rondonomanskas // Physical methods of noise generation research and acoustic diagnostics in mechanical engineering: Tez. dokl. acoustic. sem. / Kuibyshev. polytech. in-T. – Kuibyshev, 1978. pp. 13 -14.
- 6 Weitz, V.L. Dynamics of machine units working with internal combustion engines // V.L. Weitz, A.E. Kochura. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 384 p.

- 7 Vlasov, S.V. Diagnostics of the causes of increased vibration activity of gas transmission equipment in the conditions of the Far North / S.V. Vlasov, S.P. Zaritsky, V.A. Yakubovich / Control and diagnostics. 1998. No. 3. pp. 23-26.
- 8 Doroshko, S.M. Control and diagnostics of the technical condition of gas turbine engines by vibration parameters / S.M. Doroshko. - M.: Transport, 1984. - 259 p.
- 9 Zusman, G.V. Features of equipment for vibration diagnostics of industrial aggregates / Monitoring and diagnostics. 1998. No. 1. p. 3 – 10.
- 10 Kononenko, V.O. Oscillatory systems with limited excitation / V.O. Kononenko. – M.: Nauka, 1964. – 254 p.
- 11 Kostenko, V.I. Vibroacoustic express diagnostics of power mechanical units: diss...candidate of Technical Sciences: 05.02.11: protected: 05.12.02: approved 04.03.03 / Kostenko Vladislav Igorevich. – SPb.: 2002. 162 p.
- 12 Sarbaev, V.I. Maintenance and repair of cars: 2nd ed. / V.I. Sarbaev [et al.]. – Rostov-on-Don: Phoenix, 2005. – 380 p.
- 13 Reshetov, D.N. Typical variable loading modes of machine parts / D.N. Reshetov, R.M. Chatynyan, V.Z. Fadeev // Bulletin of Mechanical Engineering. 1980. No.2. pp. 7-10.
- 14 Semenov, V.M. Analysis of natural oscillation frequencies of the dynamic system "engine – transmissions - propellers - vehicle weight on suspension" V.M. Semenov [et al.] // Proceedings of NAMI. 1982, Issue 185. pp. 34-51.
- 15 Sergeev, E.I. Determination of sources of low-frequency modulation of the tooth frequency in the gearboxes of milling machines by the vibroacoustic method / E.I. Sergeev, V.B. Kitaev, V.A. Koshechkin // Dynamics of machine tools: Tez. dokl. All-Union. sci. – tech. conf. / Kuibyshev. polytech. in-T. – Kuibyshev, 1980. pp. 274 - 276.
- 16 Sergienko, V.P. Experimental methods for determining vibration and noise in braking systems and transmissions of mobile machines // V.P. Sergienko, S.N. Bukharov, V.N. Savitsky / Composite materials in industry: proceedings of the XXVIII-th International Conference. - Yalta – Kiev, 2008, pp. 54-57.
- 17 Tsitovich, I.S. Gear wheels of cars and tractors / I.S. Tsitovich, V.A. Va-vulo, B.N. Khval. – Minsk: Publishing House of the Ministry of Higher Education, MS. spec. education, 1962. – 396 p.
- 18 Shishkin, V.N. Diagnostics of the technical condition of transmission bearings of gas turbine engines by the method of structural analysis of their vibration signals / V.N. Shishkin, B.I. Komarov, M.S. Gaidai // Control. Diagnostics. 2003. No.4. pp. 15-26.
- 19 Shuplyakov, V.S. Fluctuations and loading of the transmission of the car / V.S. Shuplyakov. – M.: Transport, 1974. – 328 p.
- 20 Yavlensky, K.V. Vibrodiagnostics and prediction of the quality of mechanical systems / K.V. Yavlensky, A.K. Yavlensky. – L.: Mashinostroenie, 1983. – 239 p.

© Лелиовский К.Я., Молев Ю.И., 2023

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-3-3-98-108](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-98-108)



УДК 630; 629.1

UDC 630; 629.1

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ МАНИПУЛЯТОРА АВТОСОРТИМЕНТОВОЗА

IMPROVEMENT OF THE LIFTING MECHANISM OF THE BOOM OF THE MANIPULATOR OF THE AUTO-SORTING TRUCK

Попиков Петр Иванович,

д.т.н., профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Popikov Pyotr Ivanovich,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh.

✉¹**Четверикова Ирина Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: chivles@rambler.ru

✉¹**Chetverikova Irina Vladimirovna,**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: chivles@rambler.ru

Усков Алексей Иванович,
студент машиностроительного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Uskov Alexey Ivanovich,
student of the Faculty of Mechanical Engineering, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Мироненко Дарья Алексеевна,
студент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, e-mail: dasha.mironenko.02@bk.ru

Mironenko Darya Alekseevna,
Student of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, e-mail: dasha.mironenko.02@bk.ru

Пономарев Павел Иванович,
магистрант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Ponomarev Pavel Ivanovich,
Master's student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье рассмотрен рабочий процесс подъема стрелы манипулятора автосортиментовоза с энергосберегающим гидроприводом. С помощью математической модели обоснованы параметры энергосберегающего гидропривода и выявлено его положительное влияние на надежность машины в целом.

Annotation. The article describes the working process of lifting the boom of the manipulator of an auto-sorting truck with an energy-saving hydro-drive. Using a mathematical model, the parameters of an energy-saving hydraulic drive are substantiated and its positive effect on the reliability of the machine as a whole is revealed.

Ключевые слова: АВТОСОТИМЕНТО-ВОЗ, ГИДРООБОРУДОВАНИЕ, ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, ДЕМПФИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. **Keywords:** AUTO-SORTING TRUCK, HYDRAULIC EQUIPMENT, RELIABILITY IMPROVEMENT, DAMPING DEVICE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Опыт эксплуатации лесных гидроманипуляторов автосортиментовозов показал, что из-за высоких динамических нагрузок при низких температурах воздуха отказы рукавов высокого давления составляют 29,7–56%, а гидроцилиндров 14,0 – 24,1%. При износе уплотнений уменьшается начальная амплитуда колебаний давления рабочей жидкости, а период колебаний увеличивается.

В целях правильной эксплуатации лесовозных автомобилей, оснащенных манипуляторами и увеличения срока службы гидравлического оборудования машины исследовались такие технологические операции манипулятора, как: нагруженные движения, пустые движения и движения манипулятора при выполнении операций внутри грузового отсека.

Время движения звеньев манипулятора фиксировалось секундомером с начала движения в грузовом пространстве до момента касания челюстей грейфера бревен, лежащих на земле, и до момента раскрытия челюстей, когда сортименты выгружались внутри грузового пространства. Учитывались случаи пустых движений манипулятора на удаление веток, сортировку и перемещение отдельных сортиментов.

Установлено, что технологический цикл манипулятора включает 63% времени загруженного движения, 30% времени тратится на холостые переезды и 7% за выполненные операции внутри грузового отсека.

Помимо изучения влияния различных факторов на отдельные элементы технологического цикла проанализирован ряд работ в зарубежных журналах, в которых авторы опубликовали результаты исследований по разным аспектам автоматизации манипуляторов. Анализ литературных источников [1-11] показал, что существует возможность повышения эффективности технологического процесса в виду рекуперации энергии в гидравлической системе стрелового оборудования автосортиментовоза. Исследований динамических и кинематических характеристик энергосберегающих устройств применительно к механизмам подъема лесных манипуляторов проведено недостаточно, поэтому дополнительные исследования с целью повышения надежности и долговечности эксплуатации гидравлических систем лесовозных автомобилей, а также снижения расхода топлива являются актуальными.

2 Материалы и методы

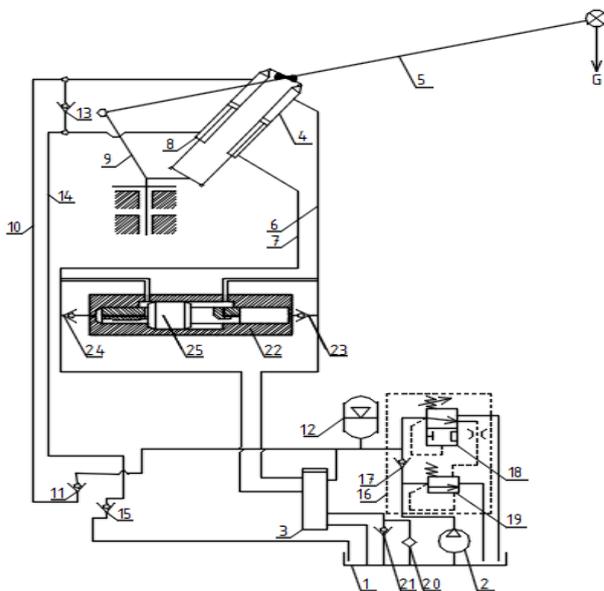
Поставленной целью является снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочих процессов механизма подъема стрелы лесного манипулятора путем обоснования параметров энергосберегающего гидропривода [12] на основе решения математической модели.

В качестве объекта исследований выбран серийный гидроманипулятор ЛВ-184А-10 (рис. 1), который монтируется на шасси автомобилей-сортиментовозов.



Рисунок 1 – Серийный гидроманипулятор ЛВ-184А-10

Предлагается новый энергосберегающий гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора, включающий дополнительный гидроцилиндр рекуперации и гидропневматический аккумулятор, который аккумулирует энергию торможения при опускании груза и возвращает ее при последующих подъемах груза (рис. 2).



1 – бак; 2 – насос; 5; 6; 7; 10; 14 – гидролинии; 4 – гидроцилиндр привода стрелы; 8 – дополнительный гидроцилиндр рекуперации; 11; 13; 15; 17; 21; 23 – обратные клапаны; 12 – гидроаккумулятор; 19 – предохранительный клапан; 18 – разгрузочное устройство; 22 – демпфер; 25 – плунжер.

Рисунок 2 – Энергосберегающий гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора

Для исследования процесса погрузочных работ с учетом подключения к гидроприводу механизма подъема стрелы гидропневматического устройства рассмотрен расчетный случай подъема груза с максимальным вылетом манипулятора на уклоне местности, например, при проседании грунта под правым аутригером в точке А (рис. 3).

Для обоснования параметров энергосберегающего гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора составлена расчетная схема, которая приведена на рис. 3.

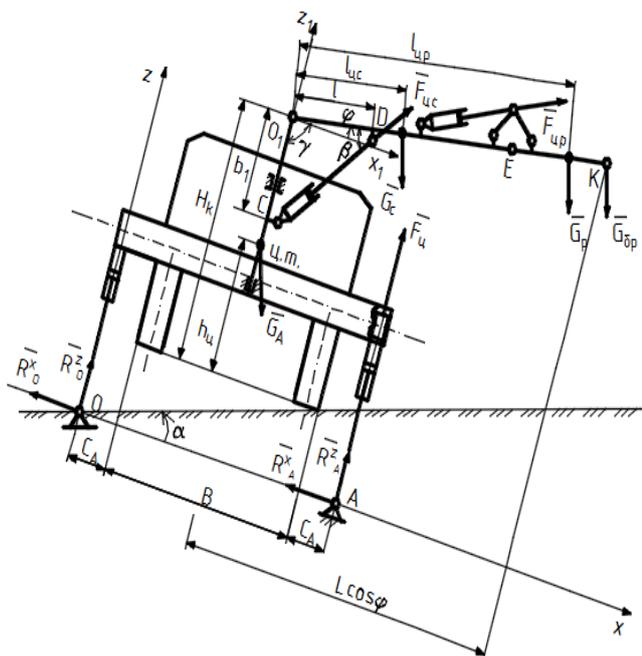


Рисунок 3 – Расчетная схема манипулятора на склоне

3 Результаты исследований

Предварительные расчеты с использованием программы MathCad позволили получить кинематические и динамические параметры энергосберегающего гидропривода.

Разработана математическая модель подъема стрелы манипулятора с энергосберегающим гидроприводом при работе на уклоне, когда гидроаккумулятор полностью заряжен и отдает накопленную энергию при опускании груза на подъем стрелы:

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{бр} + J_p + J_c) \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot p - \\ - (G_{бр} L + G_p l_{ц,п} + G_c l_{ц,с}) \cos(\varphi - \alpha), \\ q_n n_n = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot \frac{d\varphi}{dt} - k_{ак} \sqrt{P_A - p} + \\ + a_y p - \frac{V_{сум}}{E_{пр}} \cdot \frac{dp}{dt}, \\ \frac{dP_A}{dt} = \frac{-E_{ж} k_{ак}}{V_0 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{1}{K}} + \frac{E_{ж}}{K P_A} \left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{1}{K}} \right]} \cdot \sqrt{P_A - p}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $J_{бр}$, J_p , J_c – соответственно моменты инерции пачки бревен, рукояти, стрелы относительно точки O_1 , кг·м²;

φ – угол подъема стрелы, рад;

α – угол уклона, рад;

t – время, с;

$G_{бр}$ – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н;

d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м;

q_n – рабочий объем насоса, м³/об;

n_n – частота вращения насоса, с⁻¹;

p – текущее значение давления в напорном трубопроводе, Па;

P_A – текущее значение давления в гидроаккумуляторе, Па;
 P_0 – давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па;
 V_0 – рабочий объем гидроаккумулятора, м³;
 $E_{пр}$ – приведенный модуль упругости рабочей жидкости и упругих элементов гидропривода, Па;
 $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости, Па;
 K – показатель адиабаты газа в гидроаккумуляторе, равный 1,41;
 μ – коэффициент расхода равен 0,7...0,8;
 $d_{ак}$ – внутренний диаметр штуцера гидроаккумулятора, м;
 d_p – внутренний диаметр гидроцилиндра рекуперации энергии, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;
 $V_{сум}$ – суммарный объем подводящего трубопровода, м³;
 $k_{ак}$ – коэффициент дросселирования штуцера аккумулятора, м³·с·Па^{-1/2}

$$k_{ак} = \frac{\mu \pi d_{ак}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (2)$$

Обозначения остальных геометрических параметров механизма подъема стрелы, входящих в уравнения (1), ясны из рис.3. Отметим, что в треугольнике O_1DC из теоремы косинусов вытекает соотношение между углами β , γ , φ

$$\sin \beta = \frac{b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{\sqrt{l^2 + b^2 - 2lb_1 \cos(\gamma + \varphi)}}. \quad (3)$$

В настоящей работе для возможности решения задачи сделано допущение, что угол β не зависит от t на отдельном участке, это означает что отношение в правой части формулы постоянное при каждом t .

На отрезке $t \in [0; t_k]$ рассматривается задача Коши:

$$\begin{cases} \varphi(0) = \varphi_0, & p(0) = p_0, & P_A(0) = P_{A_0}, \\ \varphi'(0) = \varphi_1, & p'(0) = p_1, & P'_A(0) = P_{A_1}. \end{cases} \quad (4)$$

Представлена математическая модель процесса подъема стрелы, описываемая системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. При старшей производной стоит необратимый оператор – такие системы являются неразрешенными относительно этой производной. Вследствие нелинейности системы найти решение в явном виде зависимости от t невозможно, что влечет необходимость применения приближенных методов. Искомые функции вычисляются в узловых точках t_i . Обозначим

$$\varphi_i = \varphi(t_i), \quad p_i = p(t_i), \quad P_{A_i} = P_A(t_i), \quad (5)$$

где номер i меняется от 0 до n включительно. Одним из приближенных методов является метод конечных разностей, в котором все производные заменяются соответствующими разностными аналогами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi}{dt}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+1}-\varphi_i}{h}, \frac{d^2\varphi}{dt^2}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+2}-2\varphi_{i+1}+\varphi_i}{h^2}; \\ \frac{dp}{dt}(t_i) \approx \frac{p_{i+1}-p_i}{h}, \frac{d^2p}{dt^2}(t_i) \approx \frac{p_{i+2}-2p_{i+1}+p_i}{h^2}; \\ \frac{dP_A}{dt}(t_i) \approx \frac{P_{A_{i+1}}-P_{A_i}}{h}, \frac{d^2P_A}{dt^2}(t_i) \approx \frac{P_{A_{i+2}}-2P_{A_{i+1}}+P_{A_i}}{h^2}, \end{array} \right. \quad (6)$$

что приводит к системе рекуррентных соотношений второго порядка.

Поскольку система уравнений (1) не разрешена относительно производной, то задача Коши имеет решение не при всех начальных значениях.

Для ее разрешения относительно старшей производной применяется результат, полученный в работе [теорема], благодаря чему система распадается на равенства в подпространствах уменьшающихся размерностей. Такой способ решения носит название метода каскадной декомпозиции и был успешно применен, например, при исследовании возмущений линейных алгебро-дифференциального уравнения, вызываемых наличием малого параметра в работе.

Решение задачи проведем в соответствии с теоремой, изложенной в вышеуказанной работе.

Решение задачи (1), существует тогда и только тогда, когда выполнены следующие равенства:

$$\begin{aligned} p_1 - p_0 &= \sigma(\varphi_1 - \varphi_0) + \\ &+ h \cdot \frac{E_{\text{пр}}}{V_{\text{сум}}} \cdot (-k_{\text{ак}}\sqrt{P_A - p} + a_y p_0 - q_n n_n), \\ P_{A_1} - P_{A_0} &= \frac{-h E_{\text{ж}} k_{\text{ак}}\sqrt{P_{A_0} - p_0}}{V_0 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}} + \frac{E_{\text{ж}}}{K P_{A_0}} \left(\frac{P_0}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}} \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения задачи разработан следующий алгоритм решения задачи (1) на ЭВМ.

1. Ввести значения коэффициентов $J_{\text{бр}}, J_p, J_c, d_c^2, l, G_{\text{бр}}, L, G_p, l_{\text{ц,р}}, G_c, l_{\text{ц,с}}, \alpha, q_n, n_n, \mu, a_y, V_{\text{сум}}, E_{\text{пр}}, E_{\text{ж}}, V_0, P_0, K, \rho$. Определить $k_{\text{ак}}$ формулой (2) и σ - формулой

$$\sigma = \frac{\pi d_c^2 l E_{\text{пр}} \sin \beta i}{4V_{\text{сум}}}. \quad (8)$$

2. Ввести начальные значения (в момент времени $t = 0$) искомых величин: φ_0, p_0, P_{A_0} .

Из теоремы выше следует, что значения скоростей изменения φ_1, p_1, P_{A_1} искомых величин в начальный момент времени нужно вводить так, чтобы выполнялись равенства (7).

3. Ввести значение t_k правого конца отрезка изменения переменной t . Этот отрезок разбить равноотстоящими узловыми точками t_i с шагом h :

$$t_i = i \cdot h, \quad (9)$$

где $h = \frac{t_k}{n}$, n – количество точек разбиения

Замечание. Чем больше n , тем меньше погрешность приближения реальных функций их значениями в узловых точках.

4. Ввести следующие величины

$$\Phi_i^{(1)} = \frac{\pi d_c^2 h^2 l \sin \beta}{4(J_{6p} + J_p + J_c)} p_i - \frac{(G_{6p}L + G_p l_{ц,п} + G_c l_{ц,с}) h^2}{J_{6p} + J_p + J_c} \cos(\varphi_i - \alpha), \quad (10)$$

$$\Phi_i^{(2)} = \frac{\pi^2 d_c^4 h^2 l^2 E_{np} \sin^2 \beta}{16 V_{сум} (J_{6p} + J_p + J_c)} p_i - \frac{\pi d_c^2 h^2 E_{np} l \sin \beta (G_{6p}L + G_p l_{ц,п} + G_c l_{ц,с})}{J_{6p} + J_p + J_c} \cos(\varphi_i - \alpha) - \frac{E_{np} h k_{ак} \mu}{V_{сум}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}} + \frac{a_y E_{np} h}{V_{сум}} p_{i+1} - \frac{E_{np} h n_H q_H}{V_{сум}}, \quad (11)$$

$$\Phi_i^{(3)} = - \frac{-h k_{ак} E_{ж} K P_{A_{i+1}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}}}{K P_{A_{i+1}} \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} V_0 - E_{ж} V_0 \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} - K V_0 P_{A_{i+1}}}. \quad (12)$$

5. Искомые значения при каждом $i = 2, 3, \dots, n$ определяются из итерационных процессов, когда каждое значение получается при вычислении предыдущих.

Угол φ (в радианах) определяется формулой

$$\varphi_i = \varphi_0 + i(\varphi_1 - \varphi_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} (i-1-j) \Phi_j^{(1)}; \quad (13)$$

давление p – формулой

$$p_i = p_1 + i \sigma (\varphi_1 - \varphi_0) + \sigma \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} (i-2-j) \Phi_j^{(1)} + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} \Phi_j^{(2)} + \sigma \Phi_{i-1}^{(1)} - \Phi_{i-1}^{(2)}; \quad (14)$$

давление P_A – формулой

$$P_{A_i} = P_{A_1} + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} \Phi_j^{(3)} - \Phi_{i-1}^{(3)}, \quad (15)$$

где обозначено

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (16)$$

6. Зная значения φ_i , p_i , p_{A_i} , вычисленные на предыдущем шаге, можно вычислить их первые и вторые производные по приближенным формулам (4).

7. Зная угол φ_i , можно вычислить значение угла β из формулы (3) и построить график зависимости $\sin(\beta)$ от угла поворота стрелы φ_i (рис. 4), данные которого используются в расчетах.

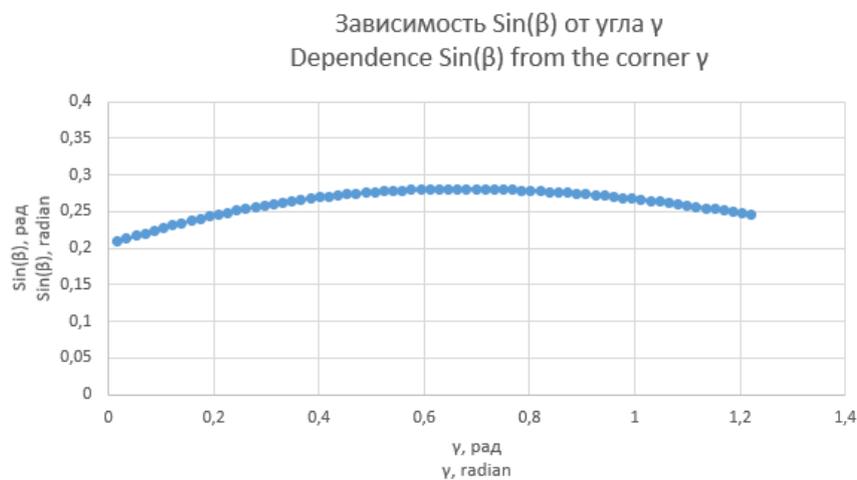


Рисунок 4 – Зависимость $\sin(\beta)$ от угла поворота стрелы φ_i

На рисунке 5 представлена зависимость угла поворота стрелы от времени, угол поворота возрастает сначала плавно, а затем резко возрастает, что объясняется кинематическими свойствами четырехзвенного механизма.

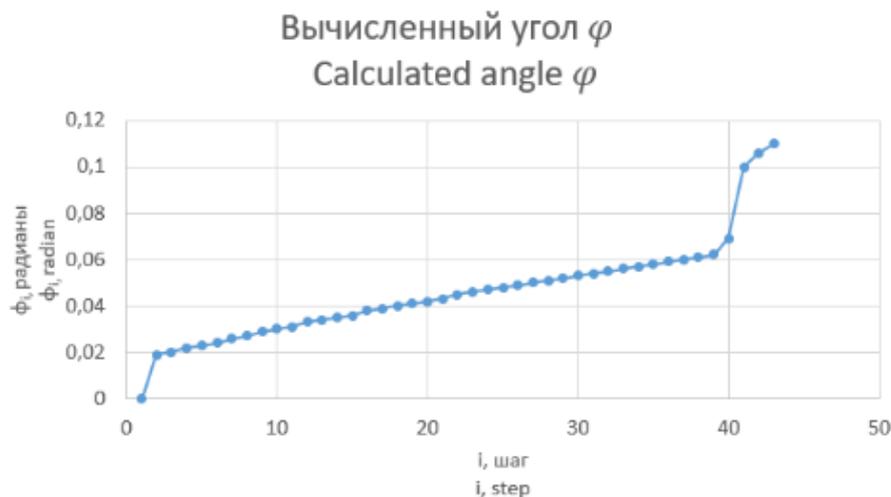


Рисунок 5 – Рассчитанное значение φ в радианах

Графики зависимостей давления рабочей жидкости (рис. 6) показали, что подключение энергосберегающего демпфирующего устройства в гидропривод механизма подъема стрелы позволяет снизить пиковое давление в гидрوليнии поршневой полости гидроцилиндра при переходных режимах на в 1,5-1,6 раза.

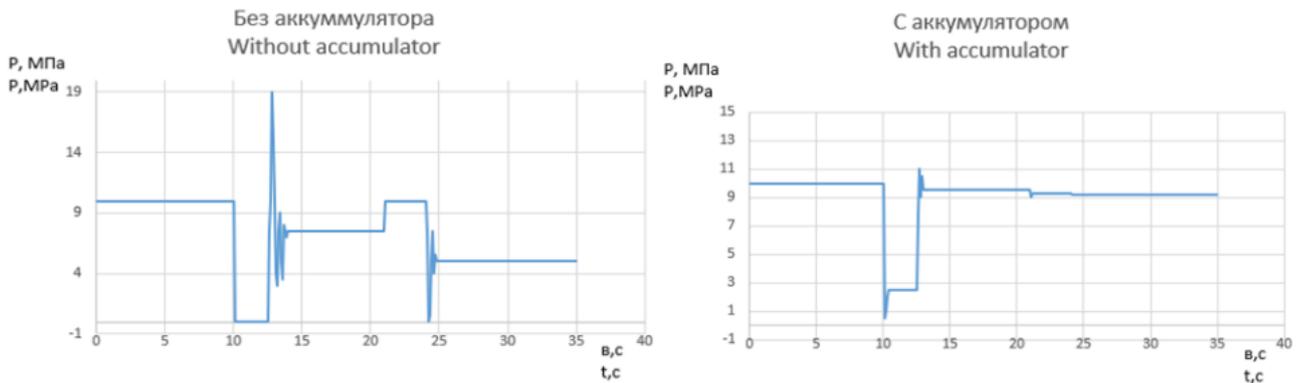


Рисунок 6 – Теоретические зависимости давления в гидросистеме при использовании энергосберегающего демпфирующего устройства

4 Обсуждение и заключение

Применение нового энергосберегающего гидропривода механизма подъема стрелы манипулятора лесовозного автомобиля позволяет существенно сгладить всплески давления в гидросистеме, кроме этого в переходных режимах устраняются высокочастотные колебания давления, вызывающие усталостное разрушение металлоконструкций элементов манипулятора. Всплески давления рабочей жидкости не превышают давления настройки срабатывания предохранительных клапанов, которые не превращают гидравлическую энергию потока жидкости в тепловую, и гидросистема манипулятора не перегревается.

Таким образом, снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочих процессов механизма подъема стрелы лесного манипулятора путем обоснования параметров энергосберегающего демпфирующего устройства гидропривода позволяет уменьшить энергозатраты, а также время простоев в ремонте из-за выхода из строя гидрооборудования. В результате модернизации гидропривода механизма подъема стрелы манипулятора автосортиментовоза появится возможность эксплуатации автомобильных средств манипуляторного типа с наименьшими нагрузками на гидропривод, что сократит стоимость обслуживания и увеличит надежность машин в целом. Результаты исследований, проведенных применительно к манипуляторам лесовозных машин применимы к манипуляторам, которыми оснащаются другие транспортные средства в т.ч. автомобили-эвакуаторы.

Список литературы

- 1 Jensen, K. J. Novel Concept for Electro- Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // *Energies*. – 2021 – Т. 14 – №. 20 – С. 6566
- 2 Jensen, K. J. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // *Mechatronics*. – 2021 – Т. 77 –С. 102599
- 3 Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability // *Energy*. – 2021 – Т. 216 – С. 119291
- 4 Agostini T. etal. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // *Actuators*. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020 – Т. 9 – №.1 – С. 12

5 Тарбеев, А.А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования [текст]: автореф. Канд. Техн. Наук /А.А. Тарбеев – Йошкар-Ола, 2019 – 17.

6 Попиков, П. И. Повышение технического уровня гидропривода манипуляторов автосортиментовозов / П. И. Попиков, И. В. Четверикова, А. С. Черных // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 1(48). – С. 129-134. – DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-129-134. – EDN MLKESM.

7 Попиков, П. И. Повышение эффективности лесного манипулятора при оснащении энергосберегающим гидроприводом / П. И. Попиков, И. В. Четверикова, С. В. Зимарин // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса : Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15–16 октября 2020 года / Редколлегия: Е.А. Яковлева [и др.]. – Воронеж: Издательство "Знание-М", 2020. – С. 354-358. – DOI 10.38006/907345-73-7.2020.354.358. – EDN THJCAZ.

8 Четверикова, И. В. Анализ манипуляторов для лесозаготовок в условиях Северо-Западного федерального округа / И. В. Четверикова, А. И. Усков // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 07 октября 2022 года / Отв. редактор А.А. Платонов. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 75-80. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_75-80. – EDN AVYUVC.

9 Болгов, А.В. Совершенствование механизма подъема стрелы лесного манипулятора / А. В. Болгов, И. Д. Евсиков, И. В. Четверикова, В. П. Попиков // Наука и технологии: модернизация, инновации, прогресс : сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции, Анапа, 28 марта 2023 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2023. – С. 11-15. – EDN ПЕОНW.

10 Zimarin, S. V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis / S. V. Zimarin, I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // , 01–30 апреля 2022 года, 2022. – P. 179-184. – EDN GRSZBY.

11 Четверикова, И.В. Дополнительные возможности совершенствования гидросистемы лесного манипулятора, ведущие к снижению динамической нагрузки / И. В. Четверикова, П. И. Попиков, Н. А. Бородин [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. – 2017. – Т. 3, № 3(21). – С. 49-52. – EDN ZHVAJR.

12 Патент № 2652596 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма стрелы манипулятора : № 2017100113 : заявл. 09.01.2017 : опубл. 27.04.2018 / П. И. Попиков, В. А. Зеликов, К. А. Меняйлов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – EDN OLSKPV.

References

1 Jensen, K. J. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // Energies. – 2021 – Vol. 14 – No. 20 – p. 6566

2 Jensen, K. J. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // Mechatronics. – 2021 – Vol. 77 –p. 102599

3 Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability // Energy. – 2021 – Vol. 216 – p. 119291

4 Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // Actuators. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020 – Vol. 9 – No. 1 – p. 12

5 Tarbeev, A.A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forest machines by perfecting methods and means of their diagnosis [text]: abstract. Cand. Tech. Sciences /A.A. Tarbeev – Yoshkar-Ola, 2019 – 17.

6 Popikov, P. I. Raising the technical level of hydraulic drive of manipulators of vehicles / P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, A. S. Chernykh // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. – 2020. – Vol. 8, No. 1(48). – pp. 129-134. – DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-129-134. – EDN MLKECM.

7 Popikov, P. I. Improving the efficiency of a forest manipulator when equipped with an energy-saving hydraulic drive / P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, S. V. Zimarin // Improving the efficiency of sustainable development management of the timber industry complex : Materials of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, Voronezh, October 15-16, 2020 / Editorial Board: E.A. Yakovleva [et al.]. – Voronezh: Publishing House "Znanie-M", 2020. – pp. 354-358. – DOI 10.38006/907345-73-7.2020.354.358. – EDN THJCAZ.

8 Chetverikova, I. V. Analysis of manipulators for logging in the conditions of the North-Western Federal District / I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // Modern forest complex of the country: problems and development trends : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, October 07, 2022 / Editor A.A. Platonov. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – pp. 75-80. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_75-80. – EDN AVYUVC.

9 Bolgov, A.V. Improving the mechanism of lifting the boom of a forest manipulator / A.V. Bolgov, I. D. Evsikov, I. V. Chetverikova, V. P. Popikov // Science and Technology: modernization, innovation, progress : a collection of scientific papers based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, Anapa, March 28, 2023. – Anapa: Limited Liability Company "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District, 2023. – pp. 11-15. – EDN IIEONW.

10 Zimarin, S. V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis / S. V. Zimarin, I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // , 01-30 April 2022, 2022. – P. 179-184. – EDN GRSZBY.

11 Chetverikova, I.V. Additional possibilities for improving the hydraulic system of the forest manipulator, leading to a decrease in dynamic load / I. V. Chetverikova, P. I. Popikov, N. A. Borodin [et al.] // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2017. – Vol. 3, No. 3(21). – pp. 49-52. – EDN ZHVAJR.

12 Patent No. 2652596 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the lifting mechanism of the manipulator boom : No. 2017100113 : application 09.01.2017 : published 27.04.2018 / P. I. Popikov, V. A. Zelikov, K. A. Menyailov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov". – EDN OLSKPV.

© Попиков П.И., Четверикова И.В., Усков А.И., Мироненко Д.А., Пономарев П.И., 2023