

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 620.91

629.01

ЯНКЕВИЧ

Степан Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА СРЕДСТВ ПЕРСОНАЛЬНОЙ
МОБИЛЬНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕЗВОЗДУШНЫХ ШИН И КОММУТАЦИИ
ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ БАТАРЕЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2025

Работа выполнена в Государственном научном учреждении
«Физико-технический институт НАН Беларуси»

Научный руководитель	Волочко Александр Тихонович , доктор технических наук, профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий – заведующий лабораторией Государственного научного учреждения «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск
Официальные оппоненты:	Бойков Владимир Петрович , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Тракторы" автотракторного факультета Белорусского национального технического университета, г. Минск
	Касперович Андрей Викторович , кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полимерных композиционных материалов УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск
Оппонирующая организация	Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск

Защита состоится «10» июля 2025 в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.18.01 при Физико-техническом институте НАН Беларуси по адресу 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10. Тел. +375 17 367 06 10 (приемная), +375 17 367 06 05 (ученый секретарь совета), факс. +375 17 373 76 93, e-mail: priemnaya@phti.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института НАН Беларуси».

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 01.18.01,
кандидат технических наук

 С.Д. Латушкина

© Янкевич С.Н, 2025

© ФТИ НАН Беларуси, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Развитие средств персональной мобильности (СПМ) (электросамокаты, гидроскутеры, сигвеи, моноколеса и др.) для использования при передвижении со скоростью до 30 км/ч ставит во главу угла решение проблем повышения их безопасности и ресурса эксплуатации.

Ресурс эксплуатации СПМ определяется запасом хода на одном заряде и пробегом до выхода из строя, которые связаны с двумя основными узлами СПМ: тяговой батареей (ТБ) и колесным двигателем. Первый является накопителем электрической энергии и от его эффективной работы зависит энергообеспечение привода, а также, ввиду чувствительности литиевых элементов питания к перегреву, приводящему к их воспламенению, – безопасность СПМ. Второй узел подвержен динамическим нагрузкам при преодолении неровностей дорожного покрытия, снижение сопротивления качению увеличивает пробег на одном заряде, а повышение прочности упругих элементов – увеличивает ресурс эксплуатации СПМ.

Энергоемкость и прочность на отрыв соединительных шин от электродов элемента питания определяют ресурс ТБ, а ее безопасность – разогрев их внутренней поверхности в процессе сварки не выше 60 °С. Для обеспечения этих характеристик использован двухимпульсный процесс контактной сварки, отвод тепла при котором происходит преимущественно в медные шины.

Характеристиками ресурса колесного двигателя являются пробег до выхода из строя и потери на трение при качении. Для их обеспечения перспективно использование безвоздушных шин (БШ), функции воздуха в которых выполняют упругие элементы. Для применения данной конструкции требуется разработка математической модели колеса с БШ и их натурные испытания. Спицы БШ изготавливают преимущественно из термопластиков, в связи с чем, рациональным на этапе прототипирования является разработка технологии 3D печати получения образцов с высокими удельными механическими характеристиками, сопоставимыми с цельнолитыми изделиями.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с крупными научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2021-2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 года № 156), в частности п.4: «Машиностроение, машиностроительные технологии,

приборостроение и инновационные материалы»: машиностроение и машиноведение, электрические и беспилотные транспортные средства, аддитивные технологии; композиционные и многофункциональные материалы.

Результаты диссертационной работы получены при выполнении задания 4.1.37 «Разработка композиционных материалов, конструкций и технологий создания безвоздушных шин электротранспортных средств» (г.г.-г.г.) (№ ГР 20213646) ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021-2025 гг, подпрограмма 8.4 «Многофункциональные и композиционные материалы»

Работа соответствует тематике Государственной программы развития электротранспорта, выполнена в соответствии с проектом «Promoting Electric Mobility in Urban Europe» (PRO-EME), получившим грант Европейской комиссии в рамках конкурса, проводимого в рамках контракта № 723977 EMEurope (H2020 – GV-2016-RTD).

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение ресурса средств персональной мобильности совершенствованием технологий изготовления колес на основе исследования закономерностей влияния циклических нагрузок на прочность упругих элементов безвоздушных шин из полимерных материалов и процесса формирования сварных соединений при коммутации элементов питания тяговых батарей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Провести экспериментальные исследования влияния плотности заполнения и режимов 3D-печати полимерных изделий по технологии FDM (Fused Deposition Modelling).
2. Разработать математическую модель процесса упругой деформации элементов БШ с учетом статических и циклических нагрузок.
3. Исследовать влияние частоты циклической нагрузки на прочность упругих элементов БШ, изготовленных из полимера марки ABS, методом вынужденных колебаний.
4. Разработать физико-математическую модель процесса формирования сварных соединений в системах Ni-Ni и Cu-Ni.
5. Разработать технологии изготовления безвоздушных шин и коммутации элементов питания ТБ, обеспечивающих повышение ресурса СПМ на 20–25 %, изготовить опытные образцы БШ и ТБ, провести испытания их эксплуатационных свойств.

Научная новизна

1. Установлена зависимость прочности упругих элементов БШ, изготовленных из пластика ABS, от частоты циклической нагрузки, что позволило разработать методику испытаний БШ из полимерных материалов на циклическую стойкость, заключающуюся в установлении точки перегиба на графике зависимости изменения количества циклов нагружения до разрушения спицы от частоты приложения нагрузки, свидетельствующую об исчерпании упругих свойств и позволяющую определить оптимальные технологические режимы изготовления упругих элементов БШ из различных полимерных материалов для каждого вида СПМ.

2. Разработана математическая модель процесса двухимпульсной точечной односторонней сварки при коммутации элементов питания ТБ, связывающая удельную объемную теплоемкость и температуру объема сварного соединения с количеством тепла, выделяющегося при протекании импульсов тока по участкам цепи, отличающаяся учетом влияния температуры разогрева на удельное сопротивление и силу тока в контактах при прохождении импульсов тока, позволившая определить технологические условия, обеспечивающие формирование сварных соединений, соответствующих требованиям, предъявляемым к прочности на отрыв $N \geq 100$ Н и к уровню сопротивлений сварных соединений $R_c \leq 0,005$ Ом при температуре разогрева внутренней поверхности корпуса не выше допустимой ($T \leq 60$ °С).

3. Научно обоснованы температурно-временные диаграммы формирования соединений при двухимпульсной точечной односторонней сварке систем Ni-Ni и Cu-Ni. Показано, что в системе Cu-Ni при прохождении первого импульса тока силой 1000 А продолжительностью 1,0–1,3 мс происходит разогрев контакта *шина–корпус элемента питания* до температуры 1085 °С, плавление контактного слоя медной шины с образованием раствора, содержащего от 5 до 10 ат. % Ni, и, соответствующее его концентрации, повышение температуры расплава до 1120 °С. В промежутке между импульсами тока длительностью 1 мс происходит кристаллизация раствора Ni в Cu и снижение его температуры до ~200 °С. При прохождении второго импульса тока происходит повторный разогрев зоны сварки до температуры 1120 °С, ее плавление, увеличение температуры разогрева жидкой фазы до 1200 °С, что обеспечивает формирование сварных соединений толщиной от 20 до 30 мкм с концентрацией в них никеля от 5 до 20 ат. %, а также образование переходного слоя сварного соединения с корпусом элемента питания, состоящего из твердого раствора меди в никеле.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные закономерности формирования методом 3D-печати бездефектных изделий из полимерных материалов с конструкционной прочностью ($\sigma_{всж}$, $\sigma_{врост}$) на уровне 27–31 МПа при объемной плотности заполнения структуры до 40 % и повышения конструкционной прочности ($\sigma_{всж}$, $\sigma_{врост}$) в 1,7–1,8 раза при выборе рисунка объемного заполнения «шестигранник из треугольников» и плотности заполнения 90 %, результаты сравнительных исследований физико-механических свойств и экономических показателей изготовления изделий методом 3D-печати, показавшие сокращение материальных затрат в ~15 раз на стадии подготовки их производства.

2. Результаты экспериментальных исследований зависимости ресурса упругих элементов безвоздушных шин, изготовленных из полимера марки ABS, от частоты циклической нагрузки.

Методика испытаний спиц БШ из полимерных материалов, заключающаяся в установлении точки перегиба на зависимости количества циклов нагружения до разрушения спицы от частоты приложения нагрузки, свидетельствующей об исчерпании упругих свойств и позволяющей определить коэффициент эффективности использования различных полимерных материалов и технологических режимов изготовления спиц.

3. Математическая модель процесса двухимпульсной точечной сварки при коммутации элементов питания ТБ, связывающая удельную объемную теплоемкость c и среднюю температуру T объема сварной точки V с количеством тепла Q , выделяющегося при протекании импульсов тока I по участкам цепи сопротивлением R ($Q = cTV = I^2Rt$), отличающаяся учетом влияния температуры разогрева на удельное сопротивление и силу тока в контактах при прохождении импульсов тока, позволившая определить силу, длительность и скважность импульсов тока, а также толщину и конфигурацию электропроводящих шин из никеля и из меди, обеспечивающих формирование сварных соединений, соответствующих требованиям, предъявляемым к прочности на отрыв ($N \geq 100$ Н) и к уровню контактных сопротивлений шина–корпус элемента питания ($R_k \leq 0,005$ Ом) при температуре разогрева внутренней поверхности корпуса не выше допустимых значений ($T \leq 60$ °С).

4. Научно–обоснованная температурно-временная диаграмма формирования соединений при двухимпульсной точечной односторонней сварке в системе Cu-Ni, позволившая установить, что при прохождении первого импульса тока силой 1000 А продолжительностью 1,0–1,3 мс происходит разогрев контакта Cu - Ni до температуры 1085 °С, плавление

контактного слоя медной шины с образованием раствора, содержащего от 5 до 10 ат. % Ni, и, соответствующее его концентрации, повышение температуры расплава до 1120 °С. В промежутке между импульсами тока длительностью 1 мс происходит кристаллизация раствора Ni в Cu и снижение его температуры до ~200 °С. При прохождении второго импульса тока происходит повторный разогрев зоны сварки до температуры 1120 °С, ее плавление, увеличение температуры разогрева жидкой фазы до 1200 °С, что обеспечивает формирование сварных соединений толщиной от 20 до 30 мкм с концентрацией в них никеля от 5 до 20 ат. %, а также образование переходного слоя сварного соединения с корпусом элемента питания, состоящего из твердого раствора меди в никеле.

5. Результаты исследований влияния температуры заливки полимерных материалов из ABS и PLA пластиков в интервалах 250–270 °С и 225–240 °С соответственно на их прочностные характеристики (σ , E), позволившие разработать технологию изготовления упругих элементов БШ, имеющих сопротивление качения на 40-55 % меньше в сравнении с пневматическими шинами. Технологический процесс коммутации элементов питания ТБ, соединительными шинами из меди, обеспечивающий формирование переходного слоя в зоне сварных соединений с прочностью на отрыв более 100 Н и уровнем контактных сопротивлений $R_k \leq 0,005$ Ом, что в совокупности позволило повысить ресурс СПМ на 20–25 %.

Личный вклад соискателя ученой степени. Все основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Работа выполнена под руководством профессора, д.т.н. Волочко А.Т., совместно с которыми сформулированы цели и задачи исследований, а также обсуждены полученные научные результаты.

Д.т.н. Зеленин В.А. принимал участие в проведении исследований по теме контактной сварки и обсуждении основных положений диссертации. Член-корр., д.т.н. Рубаник В.В. оказывал научно-консультационную помощь при исследовании процессов ультразвуковой сварки. Потоцкий Д.А. оказывал практическую помощь в реализации результатов исследований на ОАО «Приборостроительный завод Оптрон». Хроль И.А., Подорожная И.В., Калиновский И.А., Романович А.В., Макарова Ж.Е., Азаркова Е.А. принимали участие в проведении отдельных экспериментов и аналитических расчетов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований доложены на следующих международных научно-технических конференциях:

Международной научно-практической конференции «Система «наука-технологии-инновации»: методология, опыт, перспективы», Минск, 2018 г.; Международной научно-практической конференции «Система «наука-технологии-инновации»: методология, опыт, перспективы», Минск, 2019 г.; 17-й международной конференции молодых ученых «Молодежь в науке 2020», Минск, 2020 г.; Научно-практической конференции «Автомобиле- и тракторостроение» Минск, 2020; TRA2020, the 8th Transport Research Arena, Хельсинки, 2020; Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии», Минск, 2021; XV Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, 2023 г.

Результаты работы внедрены в производственный процесс ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» и РУП «Научно-производственный центр многофункциональный беспилотный комплексов» НАН Беларуси, используются при проведении работ в рамках Комплексной программы развития электротранспорта, утвержденной постановлением СМ Республики Беларусь от 9 апреля 2021 г. № 213 «О комплексной программе развития электротранспорта на 2021 – 2025 годы», а также при выполнении договоров при производстве собственной продукции.

При непосредственном участии автора разработаны и зарегистрированы технические условия на линейку литий-ионных ТБ, выпускаемых предприятием ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (ТУ ВУ 100379519.001-2021).

Опубликование результатов диссертации. По теме диссертации соискателем опубликовано 16 научных работ, из них 9 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований. Получены 1 патент на полезную модель и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 181 страницу, она содержит 124 страницы основного текста, 83 рисунка на 62 страницах, 26 таблиц на 24 страницах,

библиографический список, включающий 125 использованных источников, 18 научных работ автора, в том числе 16 статей и 2 патента.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе приведен анализ состояния производства колесных двигателей, многоэлементных аккумуляторных батарей и применения 3D-печати в области производства СПМ. Проведена оценка возможности применения колес с БШ, выполнен анализ конструктивных решений ведущих производителей в этой области.

Проанализированы современные технологии аддитивного производства, выполнен обзор мировых достижений в области СПМ, изготовленных с применением аддитивных технологий.

Проведен анализ современных практических решений в области технологий коммутации литиевых элементов питания применимо к средствам индивидуальной мобильности. Выявлены основные факторы, влияющие на качество и выходные характеристики сборок литиевых элементов питания.

Сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе приведено описание основного оборудования, приборов, устройств, материалов и методик проведения экспериментальных исследований.

Для печати образцов использовали 3D-принтер TEVO Michelangelo. Для проведения испытаний на разрыв на универсальной установке растяжения-сжатия WDW-100E использовали образцы из полимерных материалов типа 1А по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012).

Исследование прочности спиц БШ проводили методом вынужденных колебаний путем их сжатия-растяжения на токарном станке WEILER Primus с установленным в патроне валом, имеющим эксцентриситет величиной 4 мм. Опытные образцы спиц и вид их крепления в резцедержателе показаны на рисунке 1.

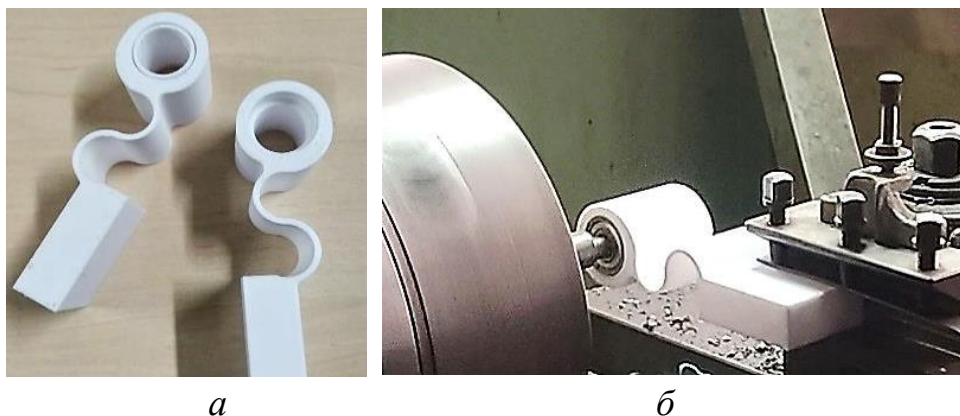


Рисунок 1. – Опытные образцы спиц (а) и их испытания (б)

Образцы для проведения исследований механических свойств полимерных материалов изготавливали методом литья под давлением на термопластавтомате марки Мини ТПА-20 «Спартанец».

Испытания на разрыв образцов из полимерных материалов типа 1А по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) проводили на универсальной установке растяжения-сжатия WDW-100E.

Металлографические исследования проводили с использованием металлографического комплекса МИКРО 200 и СЭМ Tescan Mira 3.

Испытания несущей способности, определение жесткости и сопротивления качению колес СПМ в лабораторных условиях проводили на специально разработанном стенде, представленном ниже на рис. 7 (гл. 4).

В третьей главе приведены результаты исследований влияния режимов и плотности объемного заполнения на механические свойства изделий из полимерных материалов, изготовленных методом 3D-печати FDM (Fused Deposition Modelling). Определено, что предпочтительным для достижения оптимальных механических свойств для знакопеременных нагрузок при одинаковых режимах изготовления (температура сопла, скорость печати) является 60 %-ное объемное заполнение. Увеличение плотности объемного заполнения до 90 % приводит к увеличению прочности на разрыв. При 100 %-ном заполнении прочность составляет 140 % от прочности образца с 60 %-ным заполнением. Установлено, что прочность на разрыв образцов с рисунком заполнения «концентрический» выше всех остальных, в то время как при испытаниях на сжатие наилучшие результаты были получены у образца с рисунком заполнения «сетка». Наилучшие результаты при эксплуатации со знакопеременными нагрузками достигнуты при использовании рисунка заполнения «шестигранник» (рисунок 2).

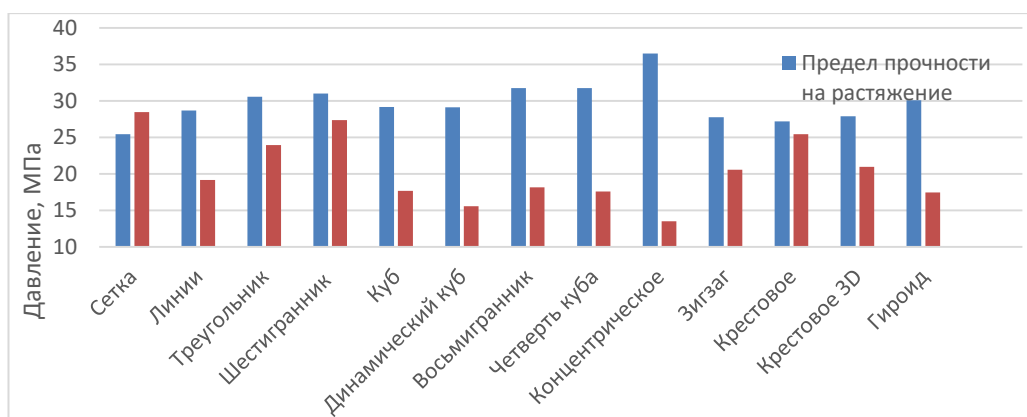
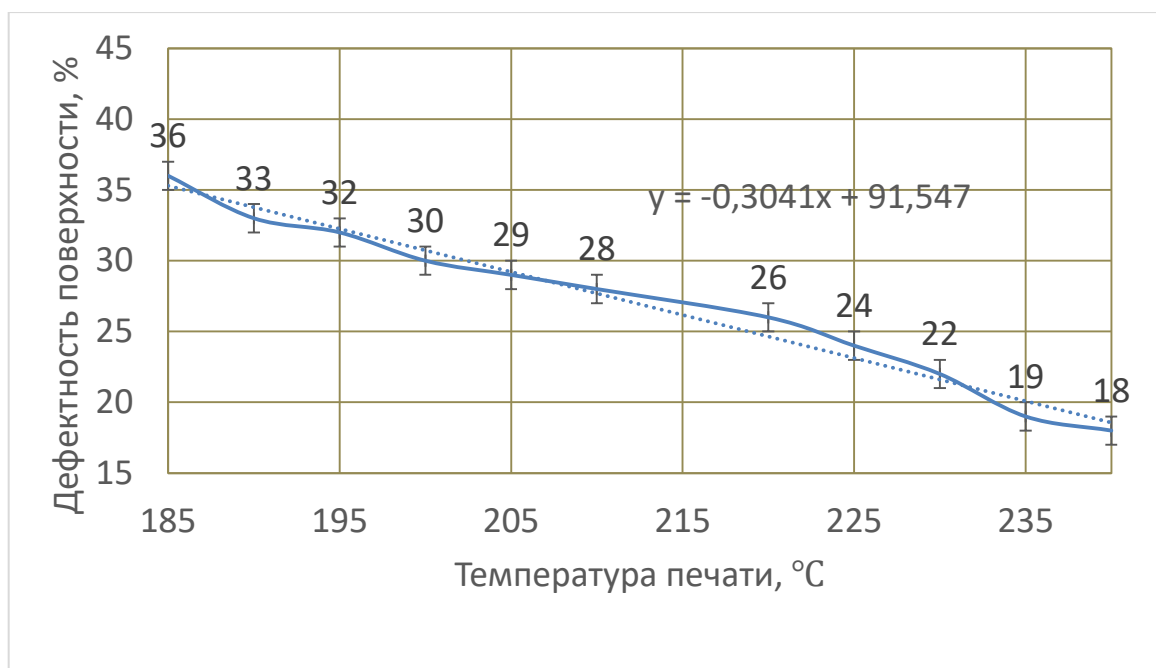
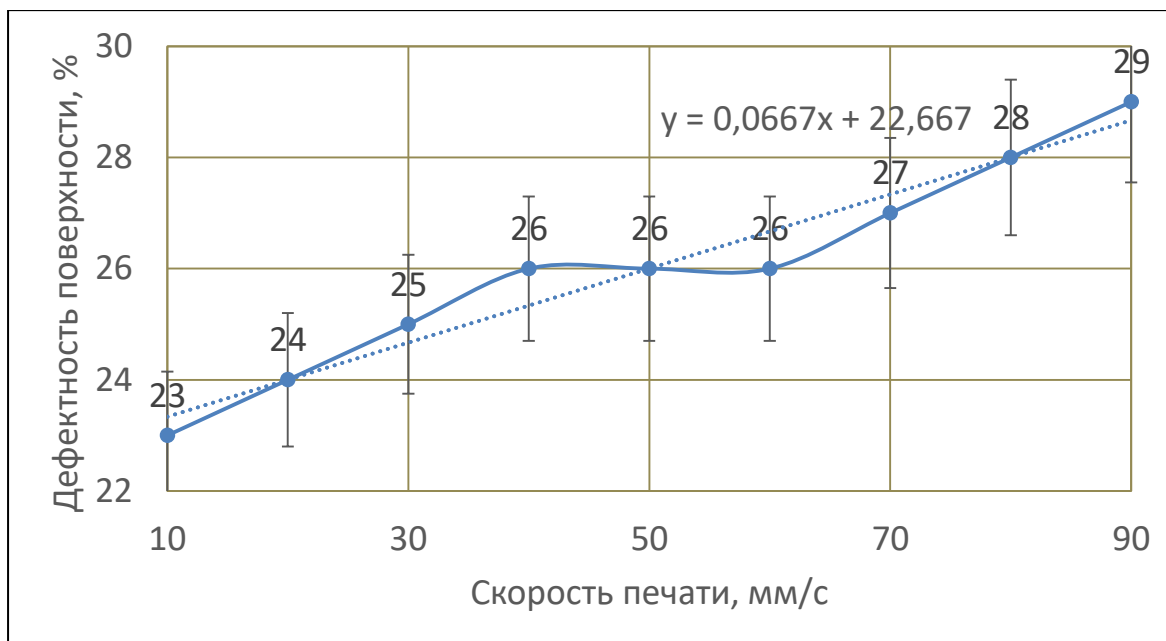


Рисунок 2. – Влияние рисунка объемного заполнения на прочность образцов при испытаниях на растяжение и на сжатие.

Разработана классификация дефектов образцов, полученных методом 3D-печати, и установлено, что количество дефектов в образцах уменьшается по близким к линейным законам при увеличении температуры и повышается с увеличением скорости печати (рисунок 3).

Сравнительные расчеты производственной себестоимости изготовления колеса с БШ из полимерного материала методами 3D-печати и механической обработки показали, что на стадии подготовки производства сокращение материальных затрат при использовании 3D-печати снижается в ~15 раз.





б

Рисунок 3. – Влияние температуры (а) и скорости (б) 3D-печати на дефектность поверхностного слоя изделий

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния класса полимерных материалов и режимов изготовления спиц на прочность колеса и разработанная конструкция колеса с БШ для СПМ. Разработана компьютерная 3D-модель колеса для электросамоката и изготовлены на 3D-принтере колеса с БШ из полимера марки ABS с 13-ю спицами (рисунок 4). Определено, что выше оси колеса спицы БШ (100%-ное заполнение) испытывают нагрузки на растяжение и изгиб, а ниже – на изгиб и сжатие. Для снижения неподрессоренных масс наружный обод выполнен с 30 %-ным объемным заполнением, рисунок заполнения – «шестигранник из треугольников». Установлено, что данный вид заполнения имеет высокие показатели прочности как при испытаниях на растяжение, так и на сжатие.

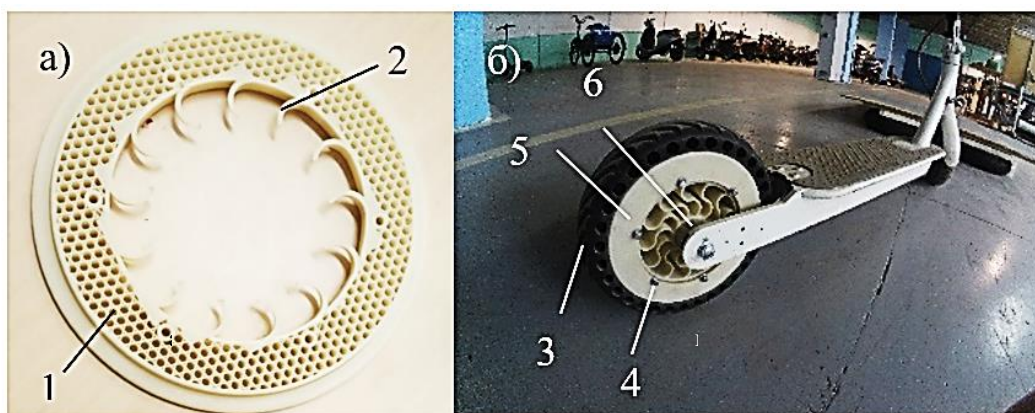


Рисунок 4. – Структура обода колеса (а) и колесо с БШ (б), установленное на электросамокат Xiaomi Mijia M365:

1 – заполнение обода, 2 – заполнение спиц обода, 3 – шина, 4 – шпильки, 5 – кольцо, 6 – ось со ступицей

Определено, что при серийном изготовлении колес с БШ экономически целесообразно использование методов литья и экструзии полимерных материалов. Разработана сборная конструкция колеса с БШ, включающая втулку А, набор спиц Б и обод В (рисунок 5).

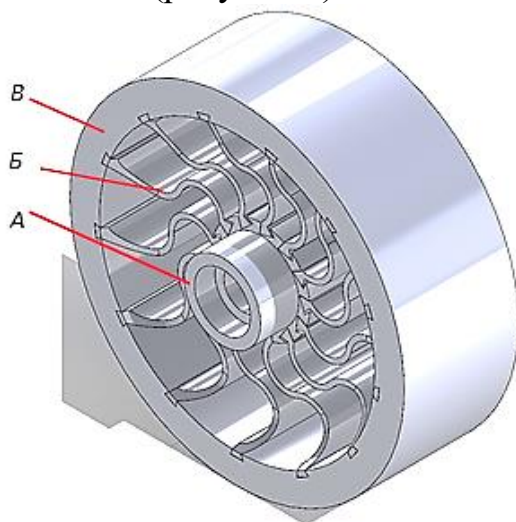


Рисунок 5. – Конструкция сборного колеса с БШ

А – ступица; Б – спицы; В – обод

Разработана методика проектирования упругих элементов БШ электрического самоката S-образной конфигурации. Выполнены расчеты деформации спиц и возникающих в них статических и циклических напряжений при движении электрического самоката с БШ. Схема нагружения спиц в моменты приложения к ним максимальных растягивающих и максимальных сжимающих радиальных нагрузок R показаны на рисунке 6.

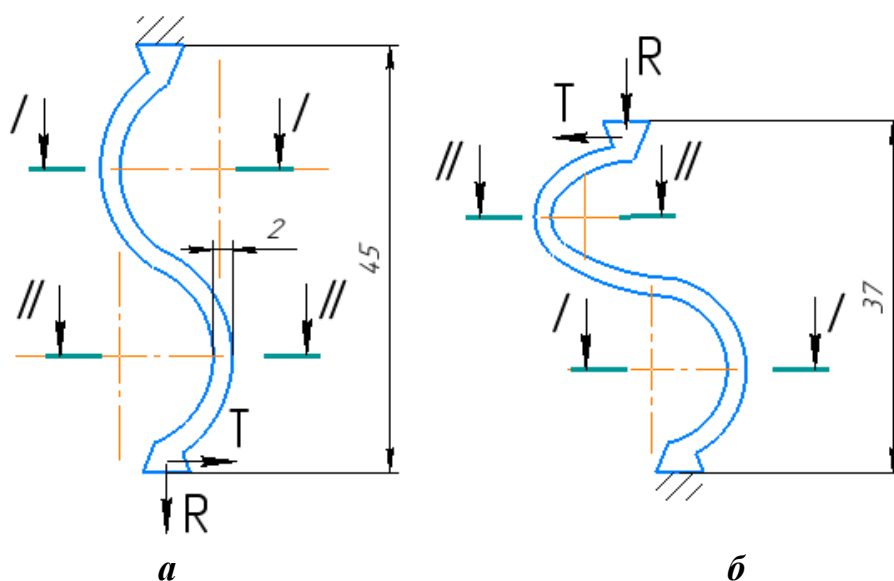


Рисунок 6. – Схема нагружения спиц при растяжении (а) и сжатии (б):
а – спица в верхнем положении; б – та же спица после поворота колеса на 180°

Установлено, что при статической нагрузке на колесо 500 Н при скорости до 30 км/ч радиальная нагрузка на спицу составляет до 75 Н, а тангенциальная — до 11 Н. Уровень знакопеременных напряжений в поверхностных слоях опасных сечений спиц составляет при этом от -50 МПа до + 50 МПа при частоте циклической нагрузки до 15 Гц.

Установлена зависимость количества циклов нагрузки спиц БШ, изготовленных из полимера марки ABS, от частоты нагрузки (рисунок 7).

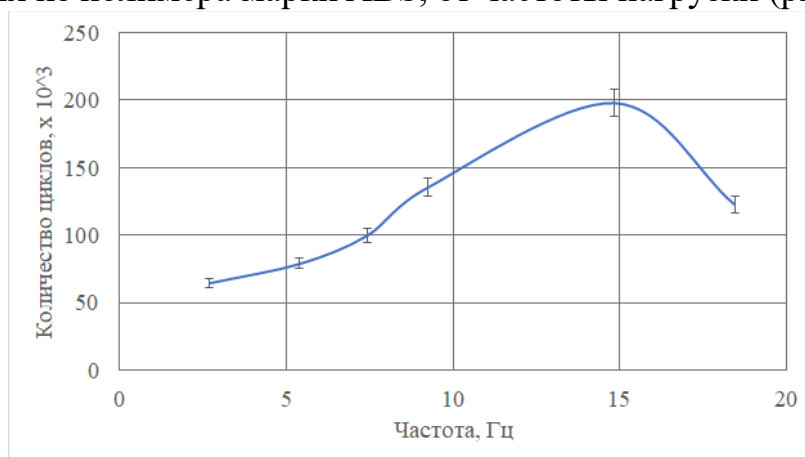


Рисунок 7. – Зависимость циклов нагрузки до разрушения спиц, изготовленных из пластика ABS, от частоты нагрузки

Максимум на кривой соответствует частоте 15–15,5 Гц, при которой спицы выдерживают 200 тысяч циклов до разрушения. При увеличении частоты нагрузки прочность спиц снижается, что связано с особенностями строения и деформирования полимерных материалов. Перегиб на кривой свидетельствует о том, что возможности материала к быстрому восстановлению его первоначальной формы и размеров исчерпаны, и дальнейшие циклические нагрузки сопровождаются пластическими деформациями в зонах расположения максимальных напряжений опасных сечений спиц.

Показано, что разработанные БШ имеют существенные преимущества в сравнении с пневматическими, в частности, вследствие большой жесткости обода площадь пятна его контакта с дорожным покрытием уменьшается на 40–55 %, что снижает сопротивление качению колес с БШ.

Установлено, что спицы, изготовленные из материала ABS при температуре экструдирования 260 °С, обладают на 23,5 % более высоким пределом прочности на растяжение по сравнению с образцами из пластиков PA6, PETG и PLA (рисунок 8).

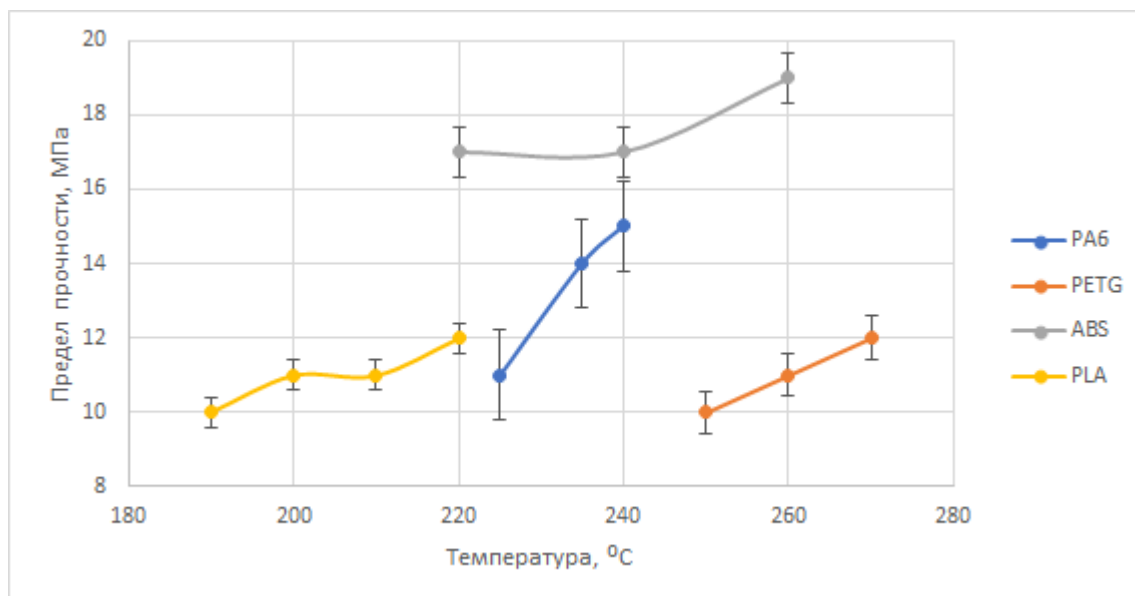


Рисунок 8. – Зависимости пределов прочности на растяжение спиц БШ из различных полимерных материалов от температуры экструдирования

Оптимизированы технологические режимы литья, разработана и утверждена технологическая карта процесса изготовления БШ.

Разработана методика испытаний спиц БШ из полимерных материалов, заключающаяся в установлении точки перегиба на графике зависимости $N_T = f(\omega)$, где N_T - число циклов нагружения до разрушения спицы, изготовленной из пластика ABS, свидетельствующей о исчерпании упругих свойств и позволяющую определить коэффициент эффективности K_3 использования различных полимерных материалов и технологических режимов изготовления спиц по уравнению $K_3 = N_{и} / N_T$, где $N_{и}$ - число циклов до разрушения спицы, изготовленной из исследуемого полимерного материала и/или по усовершенствованной технологии.

Определены режимы литья под давлением (температура расплава и время инъекции) полимерных материалов марок ABS, PLA, полиамид PA6 и PETG, позволившие повысить стойкость и прочность спиц до значений, соответствующих техническим требованиям к СПМ. Разработан технологический процесс изготовления БШ методом литья термопластов под давлением.

Разработан стенд для испытаний несущей способности и ресурса колес СПМ в лабораторных условиях (рисунок 9), который состоит из рамы 1, оснащенной статическим механизмом нормального 2 и осевого 3 нагружения испытуемого колеса. Опорная платформа имеет возможность перемещаться как в нормальном, так и осевом направлении и оснащена механизмом пружинного возврата. Динамическое нагружение осуществляется за счет пары электромагнитов 4, 5, расположенных во взаимно перпендикулярных

направлениях, управляемых электронным блоком широтно-импульсной модуляции. Регистрация частоты и амплитуды колебаний осуществляется инкрементными оптическими датчиками угла поворота 6, 7 посредством кривошипных механизмов, преобразующих поступательные колебания платформы во вращательные движения вала соответствующего датчика.

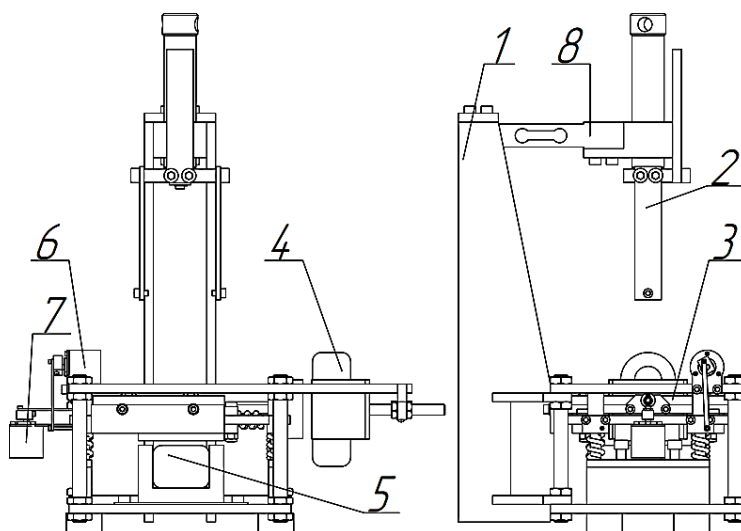


Рисунок 9. – Стенд для проведения испытаний колес СПМ

Регистрация нагрузки на колесо осуществляется тензометрическим датчиком 8, установленным на кронштейне механизма статического нагружения в нормальном направлении. За счет отсутствия механической связи двух перпендикулярно расположенных колебательных механизмов стенд имеет возможность оказывать импульсные воздействия одновременно в двух направлениях с произвольной амплитудой и частотой с регистрацией параметров в режиме реального времени.

Разработана и запатентована методика измерения демпфирующих свойств БШ, обеспечивающая экспериментальное определение несущей способности, относительной оценки демпфирования шин.

В пятой главе приведены результаты анализа процессов теплообмена между шинами из никеля и из меди с корпусом элемента питания ТБ при контактной сварке. Определены эквивалентные схемы протекания токов при коммутации элементов питания шинами из никеля и из меди. Разработана математическая модель процесса сварки, связывающая удельную объемную теплоемкость c и среднюю температуру T объема сварной точки V с количеством тепла, выделяющегося при протекании токов I по участкам разветвленной цепи с сопротивлениями R_i .

Показано, что при коммутации элементов питания шинами из меди в момент окончания прохождения импульса тока силой 1000 А длительностью

1 мс температура в контакте *электрод–шина* достигает 300 °С, а в контакте *шина–корпус* 500 °С (рисунок 10).

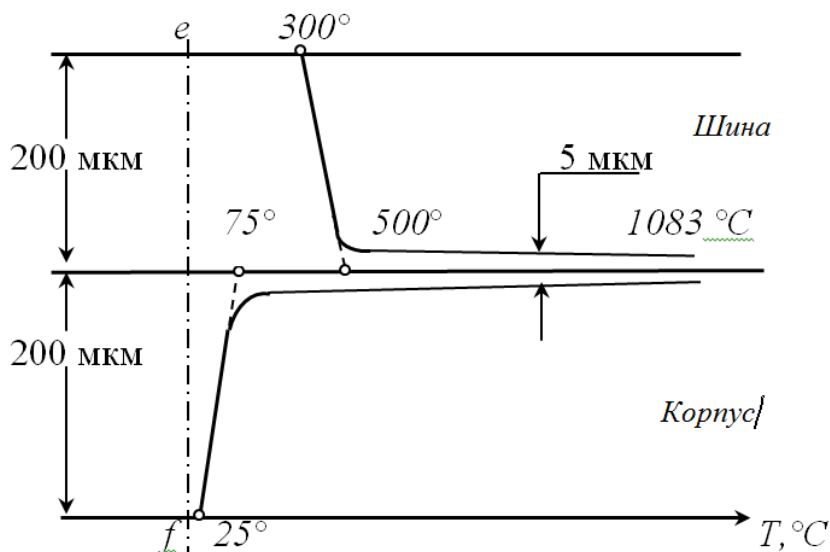


Рисунок 10. – Распределение температуры по проходящему через ось *ef* электрода сечению зоны сварки в системе Cu–Ni в момент окончания прохождения первого импульса тока

При градиенте температуры в корпусе элемента питания $\sim 0,25$ °С/мкм температура наружной поверхности корпуса составляет 75 °С, а температура его внутренней поверхности 25 °С. За время 1 мс между двумя импульсами тока происходят процессы перераспределения тепла и температур в зоне сварки, средняя температура медной шины снижается при этом до ~ 200 °С.

Средняя температура разогретой области корпуса за время между двумя импульсами снижается с 50 °С до ~ 30 °С.

При прохождении второго импульса тока формируется сварное соединение площадью $F_c \approx 2 \text{ мм}^2$ расчетной толщиной 22 мкм. Дополнительный разогрев внутренней поверхности корпуса элемента питания, как и при прохождении первого импульса тока, составляет 25 °С. Следовательно, при принятых режимах точечной сварки максимальная температура границы раздела корпус–электролит не превышает допустимых значений $T_{\text{кз max}} = 55 \text{ °С} < T = 60 \text{ °С}$.

Построены температурно-временные диаграммы процесса формирования сварных соединений в системах Ni-Ni и Ni-Cu (рисунок 11).

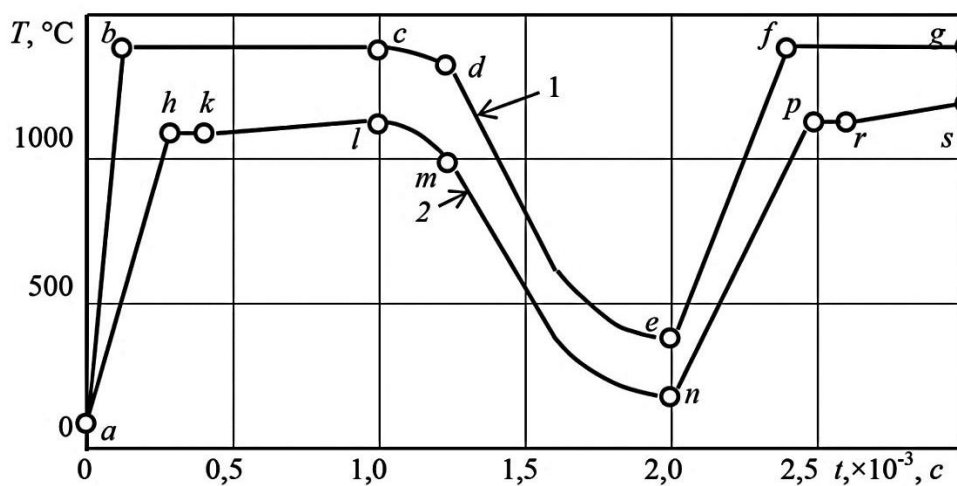


Рисунок 11. – Температурно-временные диаграммы процесса формирования сварных соединений в системах Ni-Ni (1) и Cu-Ni (2)

Рассмотрены основные стадии и особенности формирования сварных соединений систем Ni-Ni и Cu-Ni. При прохождении первого импульса тока силой 1200 А в системе Ni-Ni в течение $1 \cdot 10^{-4}$ с происходит разогрев контакта шина – корпус элемента питания до температуры плавления Ni, равной 1455 °С (участок *ab*). Далее происходит плавление зоны контакта объемом $3,6 \cdot 10^{-5}$ см³ (участок *bc*). В промежутке между импульсами тока происходит кристаллизация расплава с образованием соединения (участок *cd*), с последующим его охлаждением до температуры 340 °С (участок *de*). При прохождении второго импульса тока происходит разогрев (участок *ef*), плавление и увеличение размеров сварного соединения (участок *fg*).

В отличие от диаграммы 1, при формировании соединений в системе Cu-Ni (диаграмма 2) плавление и образование растворов происходит в интервале температур от 1085 °С до 1200 °С. Увеличение объема жидкой фазы при прохождении тока в этом случае происходит за счет образования жидкого раствора никеля в меди.

Распределение элементов по поперечному сечению сварного соединения, (рисунок 12а), показано на рисунке 12б. Представленные на рисунке 12б результаты анализа распределения элементов по сечению сварного соединения свидетельствуют о том, что его формирование происходит путем растворения никеля в расплаве меди с образованием жидкого раствора, а также путем диффузии атомов Cu в Ni с образованием твердого раствора.

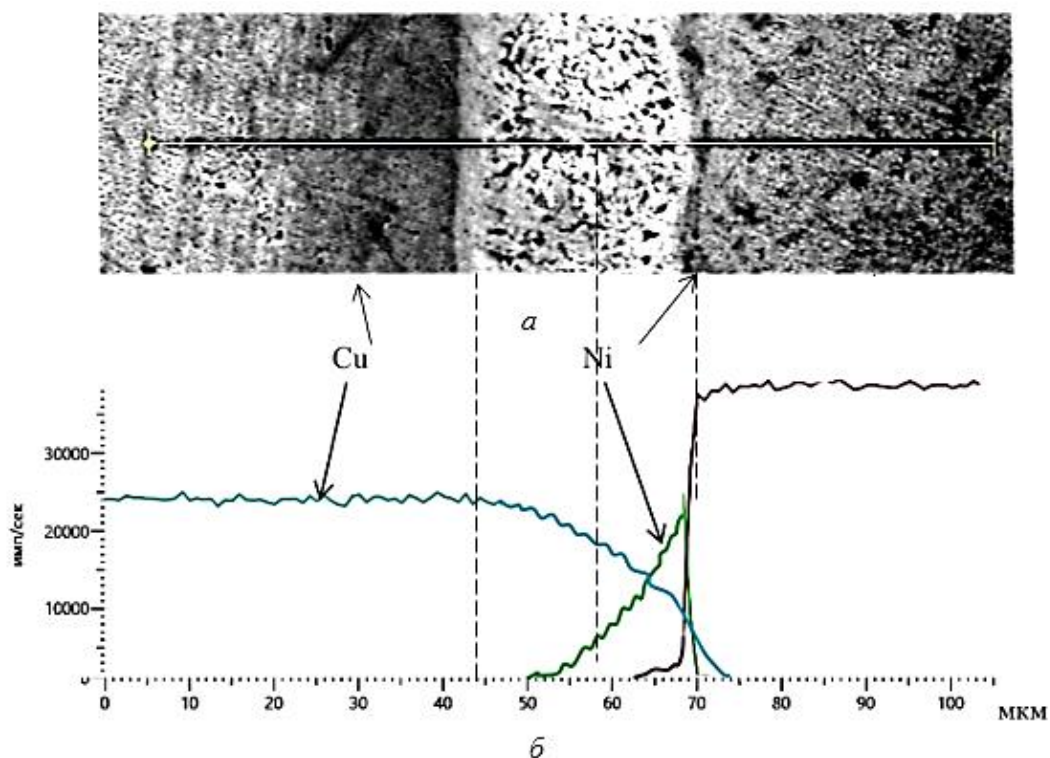


Рисунок 12. – Распределение элементов (б) по поперечному сечению сварного соединения шины из Cu с корпусом элемента питания из Ni (а)

Исследовано влияние параметров ультразвуковой сварки на прочность сварных соединений системы Cu–Ni. Установлено, что с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний усилие на отрыв соединений возрастает. Его максимальная величина, равная 96 Н, была достигнута при амплитуде колебаний 37 мкм и сварочном давлении 0,25 МПа при времени сварки 0,8 с.

Разработан технологический процесс коммутации элементов питания токопроводящими шинами из меди. Представлены результаты испытаний опытных образцов ТБ. Показано, что КПД выпускаемых по разработанной технологии ТБ с медными шинами на 15% выше по сравнению с ранее используемой технологией.

Результаты работы внедрены в производственный процесс ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» и РУП «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» НАН Беларуси. Они используются при реализации работ в рамках Комплексной программы развития электротранспорта, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 9 апреля 2021 г. № 213 «О комплексной программе развития электротранспорта на 2021 – 2025 годы», а также при реализации работ по хозяйственным договорам при производстве собственной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель процесса деформации упругих элементов в безвоздушной шине при движении колеса СПМ, позволившая определить конфигурацию, минимально необходимую толщину и количество упругих элементов БШ [1– 3].

2. Проведены расчеты степени упругой деформации демпфирующих элементов и возникающих в них статических и знакопеременных циклических напряжений при движении электрического самоката с БШ. Установлено, что при нагрузке на колесо 500 Н при скорости движения СПМ до 30 км/ч радиальные нагрузки в спицах составляют до 75 Н, а тангенциальные – до 11 Н. Уровень знакопеременных напряжений в опасных сечениях спиц достигает при этом от -50 МПа до +50 МПа при циклической частоте до 15 Гц [4, 5, 14].

3. Разработана методика испытаний спиц безвоздушных шин из полимерных материалов на циклическую стойкость, заключающаяся в установлении точки перегиба на зависимости $N = f(\omega)$, где N – число циклов нагружения до разрушения спицы, ω – частота циклов нагружения, Гц, свидетельствующей об исчерпании упругих свойств полимерного материала при данной частоте нагружения и позволяющей определить эффективность использования различных полимерных материалов и технологических режимов изготовления спиц по уравнению $K_3 = N_y/N_d$, где N_d – число циклов нагружения до разрушения спицы, изготовленной по традиционной технологии из широко применяемого при изготовлении деталей автомобилей пластика ABS; N_y – число циклов нагружения до разрушения спицы, изготовленной из исследуемого полимерного материала и/или по усовершенствованной технологии [1-5, 14-16].

4. По результатам теоретических и экспериментальных исследований влияния материала, технологии изготовления и технологических параметров производства полимерных демпферных элементов на эксплуатационные свойства при заданных показателях динамического нагружения (амплитуда и частота колебаний), установлено, что максимальная стойкость спиц до разрушения достигается при частоте приложения нагрузки 15 Гц, при которой спицы выдерживают до 200 тысяч циклов нагрузки до разрушения [2–5].

5. Проведены исследования влияния режимов 3D-печати и плотности объемного заполнения по технологии трехмерной печати FDM на прочность изделий из полимерных материалов. Установлено, что при 60 %-

ном объемном заполнении достигается уровень прочности порядка 70 % от прочности базового полимера. Увеличение плотности объемного заполнения до 90 % приводит к увеличению прочности на разрыв на 15 %, наивысшая прочность образцов достигается при 100 %-ном заполнении [1, 11–16].

6. Разработана модель процесса двухимпульсной точечной сварки электропроводящих шин с элементами питания тяговых батарей электротранспортных средств, включающая уравнение, связывающее удельную объемную теплоемкость c и среднюю температуру T объема сварного соединения V с количеством тепла Q , выделяющегося за время прохождения импульсов тока ($Q = cTV$), отличающаяся учетом влияния температуры разогрева на сопротивление и силу тока в контактах, *электрод–шина* и *шина–корпус элемента питания*, позволившая определить толщину и конфигурацию электропроводящих шин из меди, силу и скважность импульсов тока, обеспечивающих формирование сварных соединений, соответствующих требованиям, предъявляемым к прочности на отрыв ($N \geq 100$ Н) и к уровню сопротивлений сварных соединений ($R_{\text{пер}} \leq 0,005$ Ом) ТБ [6–10].

7. Проведены экспериментальные исследования влияния технологических параметров процесса контактной сварки и конструкции соединительных шин в системе Cu-Ni на прочность сварных соединений, а также изучено влияние температуры заливки полимерных материалов на их прочностные характеристики (σ , E) [6–10].

Рекомендации по практическому применению результатов работы

Установленные режимы литья под давлением (температура расплава и время инжекции) полимерных материалов марок ABS, PLA, полиамид PA6 и PETG, позволившие повысить стойкость и прочность упругих элементов БШ до значений, соответствующих техническим требованиям, предлагается использовать при разработке и изготовлении конкурентоспособной продукции, в частности СПМ [4, 5].

Разработанные технологии коммутации литиевых элементов питания могут быть применены на предприятиях машиностроения для повышения токоотдачи и эффективности использования накопителей энергии. Промышленное апробирование разработанной технологии было проведено в ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» при выполнении ОКР на общую сумму 27 000 белорусских рублей (в ценах февраля 2022 г.).

Разработанные новые конструкции стенда для испытания колес с БШ могут быть использованы в учебном процессе учреждений образования

соответствующей направленности и в различных секторах промышленного производства Республики Беларусь [17, 18].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках, включенных в перечень ВАК

1. Волочко, А. Т. Разработка подхода к проектированию и расчету безвоздушного колеса электрического самоката / А.Т. Волочко, С.Н. Янкевич // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 2 (125). – С. 42–48.

2. Янкевич, С. Н. Разработка и апробация методики проектирования демпфирующих элементов колес персонального электротранспорта с применением аддитивных технологий / С.Н. Янкевич, А.Т. Волочко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2021. – № 3. – С. 27–33.

3. Волочко, А.Т. Применение вибродиагностики при создании элементов персонального электротранспорта / А.Т. Волочко, С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль, И.В. Подорожня, Н.А. Калиновский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук.. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 69–76.

4. Янкевич, С.Н. Оценка прочностных характеристик полимерных материалов для изготовления элементов персонального электротранспорта/ С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль, Н.А. Калиновский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук.. – 2023. – Т.68, №1. – С.24-31.

5. Янкевич, С.Н. Влияние технологических параметров литья под давлением на циклическую стабильность и прочность упругих элементов безвоздушных шин из полимерных материалов/ С.Н. Янкевич, В.А. Зеленин, А.Т. Волочко// Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.). Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2023. – С. 282–293.

6. Зеленин, В.А. Токопроводящие материалы для соединительных шин многоэлементных аккумуляторных тяговых батарей / В. А. Зеленин, А.Т. Волочко, Д.А. Патоцкий, С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль, И.В. Подорожня. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук.. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 280–287.

7. Зеленин, В.А. Процессы формирования соединений при

контактной сварке элементов питания тяговых батарей электротранспортных средств / В.А. Зеленин, А.Т. Волочко, С.Н. Янкевич, Ж.Е. Макарова // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – № 1, С. 76–85.

8. Рубаник, В.В. Сравнительный анализ методов ультразвуковой и контактной сварки элементов питания тяговых батарей электротранспортных средств / В.В. Рубаник, А.Т. Волочко, В.А. Зеленин, С.Н. Янкевич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением /редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.). — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022. — С. 187–199.

9. Зеленин, В. А. Коммутация элементов питания тяговых батарей шинами из никеля и меди / В.А. Зеленин, А.Т. Волочко, С. Н. Янкевич, Е.А. Азаркова // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – № 3, С. 114–123.

Статьи в сборниках материалов конференций и научных трудов

10. Зеленин, В. А. Разработка математической модели процесса точечной сварки токопроводящих шин многоэлементных литиевых аккумуляторных батарей / В.А. Зеленин, А.Т. Волочко, С.Н. Янкевич // Актуальные проблемы прочности: материалы конференции, 23-27 мая 2022 г., г. Витебск. УП «ИВЦ Минфина». – 2022. С. 256 – 261.

11. Янкевич, С.Н. Внедрение принципов электромобильности, как пример инноваций в Республике Беларусь / С.Н. Янкевич // Система «наука – технологии – инновации»: методология, опыт, перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 сент. 2019 г. / НАН Беларуси; под ред. В. В. Гончарова. – Минск, 2019. – С. 285–289.

12. Янкевич, С.Н. Экономическое обоснование использования персонального электротранспорта в городских условиях / С.Н. Янкевич, А. В. Романович // Молодежь в науке 2020: тезисы докладов XVII междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 22-25 сентября 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 472–474.

13. Патоцкий, Д.А. Применение композиционных полимерных магнитомягких материалов при производстве электрических машин / Д.А. Патоцкий, С.Н. Янкевич, И.Н. Хроль, И.В. Подорожня // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (Минск, 23-27 августа 2021 г.); под. ред. В.В. Рубаника - Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации»,

2021. – С. 90–92.

14. Volochko, A. 3D printing application in personal light electric transport production in Belarus / A. Volochko, St. Yankevich // Proceedings of the conference “Transport Research Arena” (TRA-2020): Proceedings of TRA2020, the 8th Transport Research Arena. Rethinking transport – towards clean and inclusive mobility. Helsinki, 16-19 April 2020 <https://traconference.eu/book-of-abstracts-gathers-the-scientific-content-of-tra2020/> p. 159 – 160 DOI: 10.13140/RG.2.2.26055.85924.

Другие публикации

15. Янкевич, С.Н. Оптимизации технологических параметров изготовления полимерных деталей методом 3D-печати / С.Н. Янкевич // Инженер-механик. – 2019. – № 3. – С. 11-14.

16. Янкевич, С. Н. Наноструктурированные материалы и аддитивные технологии для персонального электротранспорта / С.Н. Янкевич // Наука и инновации. – 2021. – № 1. – С. 34-41.

Патенты

17. Стенд для испытания колес с шинами: пат. и 20210209/ А.Т. Волочко, Д.А. Патоцкий, С.Н. Янкевич. – Оpubл. 30.12.2021.

18. Способ определения жесткостных и демпфирующих свойств шин и стенд для его осуществления пат. а 20220163/ А.Т. Волочко, Д.А. Патоцкий, С.Н. Янкевич. – Оpubл. 28.02.2024.



РЕЗЮМЕ

Янкевич Степан Николаевич

**Повышение ресурса средств персональной мобильности
совершенствованием технологий изготовления безвоздушных шин и
коммутации элементов питания тяговых батарей**

Ключевые слова: средства индивидуальной мобильности, безвоздушные шины, тяговые батареи, ресурс, полимерный материал, контактная сварка.

Цель работы: повышение ресурса средств персональной мобильности совершенствованием технологий изготовления колес на основе исследования закономерностей влияния циклических нагрузок на прочность упругих элементов безвоздушных шин из полимерных материалов и процесса формирования сварных соединений при коммутации элементов питания тяговых батарей.

Методы исследования: испытания литых упругих элементов безвоздушных шин из полимерных материалов на циклическую стойкость (установка растяжения-сжатия WDW-100E, МиниТПА-20 «Спартанец»), оптическая и электронная микроскопия (МИКРО 200, СЭМ Tescan Mira 3), термография (Testo 865), аддитивное производство (TEVO Michelangelo), структурный и фазовый анализ сварных соединений (Дрон 3М), стенд для испытаний колес СПМ.

Полученные результаты и их новизна: разработана физико-математическая модель процесса деформации упругих элементов безвоздушных шин, позволившая определить размеры, форму и количество демпфирующих элементов, методика испытаний спиц из полимерных материалов на циклическую стойкость. Предложена физико-математическая модель процесса двухимпульсной точечной сварки электропроводящих шин с элементами питания тяговых батарей. Разработаны технологии изготовления безвоздушных шин, имеющих на 40-55 % меньшее сопротивление качения по сравнению с пневматическими шинами и технологический процесс коммутации элементов питания тяговых батарей соединительными шинами из меди, обеспечивающий формирование переходного слоя в зоне сварных соединений с прочностью на отрыв ≥ 100 Н и уровнем переходных сопротивлений $R_{\text{пер}} \leq 0,005$ Ом, что в совокупности позволило повысить ресурс средств персональной мобильности на 20–25 %.

Рекомендации по использованию и область применения: средства персональной мобильности, беспилотные летательные аппараты. Результаты исследований внедрены на предприятиях ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» и РУП «НПЦ многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси.

РЭЗІЮМЭ

Янкевіч Сцяпан Мікалаевіч

Павышэнне рэсурсу сродкаў персанальнай мабільнасці ўдасканаленнем тэхналогій вырабу беспаветраных шын і камутацыі элементаў сілкавання цягавых батарэй

Ключавыя словы: сродкі індывідуальнай мабільнасці, беспаветраныя шыны, цягавыя батарэй, рэсурс, палімерны матэрыял, кантактная зварка.

Мэта работы: павышэнне рэсурсу сродкаў персанальнай мабільнасці ўдасканаленнем тэхналогій вырабу колаў на аснове заканамернасцей уплыву цыклічных нагрузак на трываласць пругкіх элементаў беспаветраных шын і цягавых батарэй на аснове фізіка-матэматычнай мадэлі працэсу фарміравання зварных злучэнняў пры камутацыі элементаў сілкавання.

Метады даследавання: выпрабаванні літых пругкіх элементаў беспаветраных шын з палімерных матэрыялаў на цыклічную ўстойлівасць (устаноўка расцяжэння-сціску WDW-100E, МініТПА-20 «Спартанец»), аптычная і электронная мікраскапія (МІКРА 200, СЭМ Tescan Mira 3), тэрмаграфія (Testo 865), адытыўная вытворчасць (TEVO Michelangelo), структурны і фазавы аналіз зварных злучэнняў (Дрон 3М).

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана фізіка-матэматычная мадэль працэсу дэфармацыі пругкіх элементаў беспаветраных шын, якая дазволіла вызначыць памеры, форму і колькасць дэмпфіруючых элементаў, метадыка выпрабаванняў спіц з палімерных матэрыялаў на цыклічную ўстойлівасць. Прапанавана фізіка-матэматычная мадэль працэсу двухімпульснай кропкавай зваркі электраправодных шын з элементамі сілкавання цягавых батарэй. Распрацаваны тэхналогіі вырабу беспаветраных шын, якія маюць на 40-55 % меншае супраціўленне качэння ў параўнанні з пнеўматычнымі шынамі і тэхналагічны працэс камутацыі элементаў сілкавання цягавых батарэй злучальнымі шынамі з медзі, які забяспечвае фарміраванне пераходнага пласта ў зоне зварных злучэнняў з трываласцю на адрыў ≥ 100 Н і ўзроўнем пераходных супраціўленняў $R_{\text{пер}} \leq 0,005$ Ом, што ў сукупнасці дазволіла павысіць рэсурс сродкаў персанальнай мабільнасці на 20–25%.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: сродкі персанальнай мабільнасці, беспілотныя лятальныя апараты. Вынікі даследаванняў знайшлі ўкараненне на прадпрыемствах ААТ “Прыборабудаўнічы завод Аптрон” і РУП “НВЦ шматфункцыянальных беспілотных комплексаў” Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі.

SUMMARY

Yankevich Stepan Nikolaevich

Increasing the resource of personal mobility means by improving the technologies of manufacturing of airless tires and welding of battery power elements

Key words: personal mobility aids, airless tires, traction batteries, resource, polymer material, contact welding.

The objective of the work: to increase the service life of personal mobility devices by improving wheel manufacturing technologies based on the laws of the influence of cyclic loads on the service life of elastic elements of airless tires and traction batteries based on a physical and mathematical model of the process of forming welded joints during switching of power elements.

Research methods: testing of cast elastic elements of airless tires made of polymer materials for cyclic resistance (tension-compression unit WDW-100E, MiniTPA-20 "Spartanets"), optical and electron microscopy (MICRO 200, SEM Tescan Mira 3), thermography (Testo 865), additive manufacturing (TEVO Michelangelo), structural and phase analysis of welded joints (Dron 3M).

The obtained results and their novelty: a physical and mathematical model of the deformation process of elastic elements of airless tires has been developed, which made it possible to determine the dimensions, shape and number of damping elements, as well as a method for testing spokes made of polymeric materials for cyclic resistance. A physical and mathematical model of the process of double-pulse spot welding of conductive tires with power elements of traction batteries has been proposed. Technologies have been developed for manufacturing airless tires with 40-55% lower rolling resistance compared to pneumatic tires and a technological process for switching power elements of traction batteries with copper connecting buses, ensuring the formation of a transition layer in the welded joint zone with a tear strength of ≥ 100 N and a transition resistance level of $R_{\text{trans}} \leq 0.005$ Ohm, which together made it possible to increase the service life of personal mobility devices by 20-25%.

Recommendations for use and scope of application: personal mobility devices, unmanned aerial vehicles. The research results have been implemented in the educational process and at the enterprises of the OJSC «Instrument-Making Plant Optron » and the RUE "Scientific and Production Center for Multifunctional Unmanned Complexes" of the National Academy of Sciences of Belarus.

Подписано в печать 09.06.2025.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,45. Тираж 60 экз. Заказ №198.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.