

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ГНУ «Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси»



С.Н. Поддубко

2025 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации на диссертационную работу
Янкевича Степана Николаевича «Повышение ресурса средств персональной
мобильности совершенствованием технологий изготовления безвоздушных шин
и коммутации элементов питания тяговых батарей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Янкевича С.Н. «Повышение ресурса средств персональной мобильности совершенствованием технологий изготовления безвоздушных шин и коммутации элементов питания тяговых батарей» относится отрасли технических наук и посвящена решению важной технической задачи, направленной на повышение ресурса работы средств персональной мобильности за счет применения безвоздушных колес, изготавливаемых из полимерных материалов по усовершенствованной технологии, базирующейся на результатах изучения влияния внутренней структуры, плотности заполнения, толщины наружного контура, материалов и их сочетания на физико-механические свойства безвоздушных шин, а также применения технологии коммутации элементов питания тяговых батарей, предусматривающей формирование неразъемного соединения путем воздействия импульсов электрического тока или ультразвукового воздействия при определенных конструктивных параметрах и материалах элементов соединительных шин.

Объектом исследования являются сборные безвоздушные колеса и многоэлементные тяговые литиевые аккумуляторные батареи.

Предметом исследований являются процессы формирования структуры и свойств полимерного материала при термическом воздействии, а также форми-

рования неразъемного соединения «шина – элемент питания тяговой батареи» при различных физических воздействиях, влияющие на характеристики ресурса средств персональной мобильности.

В работе проведен широкий спектр исследований по изучению механизмов формирования внутренней структуры, плотности объемного заполнения, толщины наружного контура, полимерных материалов при различном термическом воздействии и скорости экструзии полимерных материалов при 3D-печати, разработана классификация дефектов 3D-печати по степени их влияния на свойства изделий. Рассмотрены различные способы получения неразъемных соединений, при коммутации элементов питания тяговых батарей, в зависимости от вида энергетического воздействия (импульсы электрического тока, ультразвуковые колебания, лазерное), проведен анализ процессов теплообмена между токопроводящими шинами и элементами питания, определены материал и конструктивные параметры элементов соединительных шин, позволивших на 15 % увеличить энергоэффективность тяговых батарей. Предложена физико-математическая модель процесса формирования неразъемного соединения шин с элементами питания тяговых батарей по схеме двухимпульсного электрического воздействия с пластическим деформированием контактных областей.

Судя по общему содержанию, данная диссертационная работа может быть отнесена к специальности 05.02.07 – технология и оборудования механической и физико-технической обработки. В то же время следует указать на неудачную редакцию наименования диссертационной работы с использованием терминологии, не характерной для данной специальности.

Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Научный вклад Янкевича С.Н. заключается:

- в проведении исследований влияния технологических режимов 3D-печати, механизмов формирования внутренней структуры, плотности объемного заполнения, толщины наружного контура при использовании технологии трехмерной печати FDM на прочность и жесткость изделий для средств персональной мобильности из полимерных материалов;

- в разработке математической модели процесса формирования неразъемного соединения по схеме контактной сварки, фактически реализуемой посредством импульсного воздействия электрического тока и пластической деформации зоны соединения электропроводящих шин с элементами питания тяговых батарей электротранспортных средств, связывающей удельную объемную теплоемкость и среднюю температуру объема металла формируемого неразъемного контакта с количеством тепла, выделяющегося за время прохождения импульсов тока, отличающейся учетом влияния температуры разогрева на электрическое сопротивление и силу тока в контактах «электрод–шина» и «шина–корпус

элемента питания», позволившей определить толщину и конфигурацию электропроводящих шин из никеля или меди, силу и скважность импульсов тока, обеспечивающих формирование неразъемных соединений, соответствующих требованиям, предъявляемым к прочности на отрыв ($N \geq 100$ Н) и к уровню электрического сопротивления ($R_{\text{пер}} \leq 0,005$ Ом) для коммутационных цепей тяговых батарей.

- в проведении экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса получения неразъемного соединения при воздействии ультразвуковых колебаний, а также конструкции и материала соединительных шин на прочность неразъемных контактов «шина – элемент питания тяговых батарей»;

- в разработке математической модели и режимов испытаний спиц-демпферов безвоздушных колес для проведения расчетов степени упругой деформации демпфирующих элементов и возникающих в них статических и знакопеременных циклических напряжений при движении средства персональной мобильности с безвоздушным колесом. Так, установлено, что при нагрузке на колесо 500 Н и частоте нагружения, соответствующей скорости движения средства персональной мобильности до 30 км/ч, радиальные нагрузки в спицах достигают уровня 75 Н, а тангенциальные – 11 Н. Диапазон знакопеременных напряжений в опасных сечениях спиц при этом составляет от –50 МПа до +50 МПа. При циклической частоте 15 Гц спицы выдерживают до 200 тысяч циклов нагружения до разрушения.

Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Научные результаты, за которые Янкевичу С.Н. может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук, заключаются:

- в результатах исследования влияния термического воздействия при 3D-печати на различные полимерные материалы, а также скорости печати, параметров объемного заполнения, механизмов формирования внутренней структуры, толщины наружного контура при использовании технологии FDM, позволивших определить, что для полимера марки ABS при выборе рисунка объемного заполнения «шестигранник из треугольников» и плотности заполнения 90 % физико-механические свойства полученных изделий превышают аналогичные показатели образцов с базовой матрицей, что объясняется более развитой внутренней структурой, которой можно варьировать по зонам изделия, и это позволяет увеличить предел прочности базового изделия до 20 % и снизить его массу до 70 %;

- в разработке математической модели процесса формирования неразъемного соединения путем импульсного воздействия электрического тока и пласти-

ческой деформации зоны соединения электропроводящих шин с элементами питания тяговых батарей, связывающей удельную объемную теплоемкость C и среднюю температуру T объема расплавленного металла V с количеством тепла Q , выделяющегося при протекании импульсов тока силой I по участкам цепи сопротивлением R , отличающейся учетом влияния температуры разогрева на удельное сопротивление и силу тока в контактах при прохождении импульсов тока и позволившей определить силу, длительность и скважность импульсов электрического тока, а также толщину и конфигурацию электропроводящих шин из никеля и меди, обеспечивающих формирование неразъемных соединений, соответствующих требованиям, предъявляемым к прочности на отрыв ($N \geq 100$ Н) и к уровню электрического сопротивления ($R_k \leq 0,005$ Ом) контакта «шина– корпус элемента питания» при температуре разогрева внутренней поверхности корпуса не выше допустимых значений ($T \leq 60$ °С);

- в полученных новых результатах экспериментальных исследований, положенных в основу разработки температурно-временной диаграммы формирования неразъемных соединений путем импульсного воздействия электрического тока и пластической деформации зоны соединения электропроводящих шин с элементами питания тяговых батарей в системе Cu-Ni, которая показала, 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 контакта до температуры 1120 °С, ее плавление, увеличение температуры разогрева жидкой фазы до 1200 °С, что обеспечивает формирование неразъемного соединения толщиной от 20 до 30 мкм с концентрацией в них никеля от 5 до 20 ат.%, а также образование переходного слоя неразъемного соединения с корпусом элемента питания толщиной 3–5 мкм, состоящего из твердого раствора меди в никеле;

- на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований соискателем разработана технология изготовления упругих элементов безвоздушных колес, имеющих на 40–55 % меньшее сопротивление качению в сравнении с пневматическими шинами, а также технологический процесс коммутации элементов питания тяговых батарей соединительными шинами из меди, обеспечивающий формирование переходного слоя в зоне неразъемного соединения с прочностью на отрыв более 100 Н и уровнем контактного электросопротивления $R_k \leq 0,005$ Ом, что в совокупности позволило повысить ресурс средств персональной мобильности на 20–25 %.

Промышленная апробация разработанной технологии была проведена в ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» при выполнении ОКР на общую сумму 27 000 белорусских рублей (в ценах февраля 2022 г.).

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Проведенные при выполнении диссертационной работы теоретические и экспериментальные исследования свидетельствует о способности соискателя самостоятельно решать сложные научно-технические задачи.

Научные и прикладные результаты диссертационной работы, опубликованные в научных изданиях, доклады на международных научно-технических конференциях свидетельствуют о достаточно высокой научной квалификации Янкевича С.Н. и его соответствии ученой степени кандидата технических наук. Им соблюдены все требования, предъявляемые к соискателям ученой степени кандидата технических наук в соответствии с пунктом 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь.

Рекомендации по использованию результатов диссертации, которые могут найти практическое применение

Установленные режимы температурного воздействия и длительности инъекции для получения изделий из полимерных материалов марок ABS, PLA, полиамид PA6 и PETG, позволившие повысить стойкость и прочность упругих элементов безвоздушных шин до значений, соответствующих техническим требованиям, могут использоваться при разработке и изготовлении конкурентоспособной продукции, в частности, средств персональной мобильности.

Разработанная технология коммутации литиевых элементов питания может быть применена на предприятиях машиностроения для повышения токоотдачи и эффективности использования накопителей энергии.

Замечания по диссертационной работе

На основании анализа содержания диссертации и автореферата следует отметить следующие недостатки и замечания:

1. При том, что, судя по содержанию, данная диссертация может быть представлена по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, однако следует указать на неудачное использование соискателем терминологии, не характерной для данной специальности.

2. В главе 1 рассматриваются тенденции совершенствования средств персональной мобильности, среди которых был проведен анализ технологий коммутации элементов питания при сборке тяговых батарей. Однако в выводах по главе 1 (стр. 34), отсутствует вывод, отражающий состояние дел в технологиях

коммутации элементов питания при сборке тяговых батарей, из которого вытекало бы суть имеющихся в этом вопросе проблем и стоящих задач.

3. Из главы 2 не до конца понятно почему автор при выборе способа изготовления элементов полимерных безвоздушных колес по технологии 3D-печати отдает предпочтение схеме FDM, в то время как, судя по представленной им информации, схема SLA выглядит более перспективно.

4. В разделе 3.3 диссертации приведено сравнение механических характеристик ABS-пластика при литье под давлением и напечатанного FDM методом (стр. 59), из которого видно, что FDM метод позволяет получить более высокие показатели механических характеристик (предел прочности при растяжении, сжатии, изгибе), исходя из этого непонятно в связи с чем в дальнейшем для изготовления спиц-демпферов был выбран метод литья под давлением термопластов.

5. В разделе 4.1 диссертации при статическом расчете распределения нагрузок на шасси электросамоката, исходя из массы водителя и массы самоката, принята максимальная нагрузка на заднее колесо на уровне 500 Н, в то время как при движении самоката будут возникать, вероятно, гораздо большие динамические нагрузки, и становится неясным, каков будет ресурс колеса в этом случае.

6. Непонятен физический смысл используемого соискателем показателя «коэффициента сопротивления качению» с размерностью «см» (стр. 66, 79, 80).

7. Исходя из размеров безвоздушного колеса и данных, приведенных в таблице 4.5 (стр. 82), по-видимому, не совсем верно рассчитаны частота нагружения и количество циклов до разрушения, в связи с этим требует корректировки график на рисунке 4.22.

8. В выводах по главе 4 диссертации указывается, что замена пневматических шин на безвоздушные шины увеличивает пробег средства персональной мобильности в 1,4 раза, что, по мнению соискателя, обусловлено повышением жесткости колеса и уменьшением пятна контакта шины с дорогой. Но на это можно заметить, что такого же результата можно достигнуть, увеличив давление в пневматических шинах. Поэтому остается неясным, на сколько эффективна будет замена пневматического колеса на безвоздушное.

9. В рукописи диссертационной работы присутствуют опечатки и неточности редакционного характера.

Приведенные замечания не снижают достаточно высокого научного уровня и практической значимости проделанной соискателем работы, ряд из них носят рекомендательный характер. В целом, диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

Заключение

Диссертационная работа Янкевича Степана Николаевича «Повышение ре-

сурса средств персональной мобильности совершенствованием технологий изготовления безвоздушных шин и коммутации элементов питания тяговых батарей», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, является законченной квалификационной научной работой, самостоятельно подготовленной соискателем, которая по уровню научной новизны и практической значимости соответствует требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а ее автору может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук за комплекс исследований в области процессов синтеза материалов и формирования неразъемных соединений при воздействии физических полей различной природы для повышения качества и увеличения ресурса средств персональной мобильности, **включающий**

- результаты моделирования и экспериментальных исследований влияния технологических режимов термического воздействия на полимерный материал в процессе формирования элементов безвоздушных колес методами литья под давлением и 3D-печати, позволившие определить оптимальную конфигурацию рисунка («шестигранник из треугольников» при плотности объемного заполнения 90 %), материал (ABS-пластик), уровень термического воздействия (250–270 °С) и способ изготовления (технология FDM) для изготовления диска со спицами-демпферами с обеспечением заданного уровня их физико-механических свойств (конструкционная прочность ($\sigma_{всж}$, $\sigma_{вразт}$) на уровне 27–31 МПа, циклическая прочность при максимальной нагрузке 500 Н свыше 200 тыс. циклов);

- разработку температурно-временной диаграммы формирования неразъемного соединения в системе Cu-Ni в процессе импульсного воздействия электрического тока, которая позволяет обоснованно выбирать режимы нагрева (1120–1200 °С) и сжатия (20–30 Н), обеспечивающие формирование зоны соединения толщиной 20–30 мкм, состоящей из твердого раствора никеля в меди с концентрацией никеля 5–20 ат.%, а также образование переходного слоя с корпусом элемента питания толщиной 3–5 мкм, состоящего из твердого раствора меди в никеле;

- разработку математической модели теплового баланса в процессе формирования неразъемного соединения «шина – элемент питания тяговой батареи» при импульсном воздействии электрического тока, учитывающей влияние температуры разогрева на изменение тепловой мощности при прохождении импульсов тока и позволившей определить режимы процесса формирования неразъемного соединения «шина – корпус элемента питания» (сила, длительность и скважность импульсов тока, усилие прижатия), а также толщину и конфигурацию электропроводящих шин из меди, обеспечивающих формирование неразъемных электрических соединений, характеризующихся механической

прочностью на отрыв не менее 100 Н и электрическим сопротивлением не более 0,005 Ом при температуре разогрева внутренней поверхности корпуса не выше 60 °С,

что в совокупности позволило осуществить обоснованный выбор режимов технологического процесса изготовления упругих элементов из полимерного материала для безвоздушных колес, имеющих на 40–55 % меньше коэффициент сопротивления качению по сравнению с пневматическими шинами, а также разработать технологический процесс получения неразъемного соединения с повышенной механической прочностью и пониженным электросопротивлением при коммутации элементов питания тяговых батарей, что, в целом, обусловило увеличение ресурса средств персональной мобильности на 20–25 %.

Проект отзыва на диссертационную работу Янкевича С.Н. заслушан и обсужден на объединенном научном семинаре Научно-технического центра «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» и Научно-инжинирингового центра «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин» Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», протокол № 5 от 01 июля 2025 г.

В работе семинара приняли участие 28 научных работников ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», из них с ученой степенью – 17, в том числе 4 доктора наук и 13 кандидатов наук.

Соискатель выступил с докладом, ответил на заданные ему вопросы, состоялось обсуждение доложенных результатов исследований и проекта отзыва оппонировавшей организации, подготовленного экспертом, назначенным приказом Генерального директора ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» от 16.06.2025 г. № 92.

Результаты открытого голосования участников заседания научного семинара, имеющих ученые степени, относительно принятия заключения (отзыва оппонировавшей организации) по диссертационной работе и по вопросу присуждения Янкевичу Степану Николаевичу ученой степени кандидата технических наук:

«за» – 17, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель научного семинара,
доктор технических наук, профессор

В.И. Жорник

Секретарь научного семинара,
кандидат технических наук

Н.Н. Максимченко

Эксперт по диссертации,
кандидат технических наук, доцент

А.А. Курилёнок