

# НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

УДК 62-272.25



**Степан Янкевич,**  
начальник  
научно-исследовательского отдела  
ОАО «Приборостроительный  
завод Оптрон»;  
com@optron.by

Глобальное внедрение электротранспорта в повседневную жизнь общества уже стало обыденностью, с которой имеет возможность соприкоснуться каждый человек. Так, при выборе автомобиля наряду с дизельными, бензиновыми и биотопливными двигателями потребители все чаще обращают внимание на электромобили. Это оптимальный вид легкового транспорта для городского цикла жизни, отвечающий всем требованиям экологической и энергетической безопасности, простой в техобслуживании, имеющий высокий КПД двигателя (более 85% против 50% для дизелей у ДВС), что достига-

ется благодаря простоте его конструкции, а также большой межсервисный пробег.

В Республике Беларусь электротранспорт развивается активно: организовано производство как электробусов, так и легковых автомобилей и электрического персонального транспорта, в планах – произвести и продать 40–70 тыс. электрических автомобилей, разработана программа поглощения образовавшегося профицита, в том числе через продвижение прогрессивных новинок [1]. Следует отметить, что 90% водителей в мире ежедневно проезжают не более 90 км, в связи с чем широкое применение электроскутеров, электровелосипедов, электромотоциклов и т.д., являю-



**Аннотация.** *Описан процесс создания опытных образцов персональных электрических транспортных средств, в частности электроскутера, электромотоцикла и электросамоката в условиях четвертой промышленной революции, характеризующейся широким внедрением в производство аддитивных технологий, наноструктурированных порошковых материалов и полностью виртуальным проектированием и моделированием.*

**Ключевые слова:** *аддитивные технологии, магнитомягкие материалы, твердотельное моделирование, индустрия 4.0.*

**Для цитирования:** *Янкевич С. Наноструктурированные материалы и аддитивные технологии для персонального электротранспорта // Наука и инновации. 2021. №1. С. 34–41.*

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-1-34-41>

щихся прекрасной альтернативой автомобилю, становится крайне актуальным.

Можно сформулировать ряд требований к индивидуальному транспортному средству жителя мегаполиса: недорогое, компактное, легкое, стильное, проезжающее на одном заряде 25–30 км. Казалось бы, еще пару лет назад это было недостижимо ввиду большого веса аккумуляторных батарей. Однако с развитием литиевых источников питания, технологий выпуска и моделирования синхронных электродвигателей, обладающих высоким КПД, и аддитивного производства, позволяющего изготавливать детали со сложной внутренней структурой, это стало реальным.

Четвертая промышленная революция сделала актуальным применение 3D-печати в различных сферах производства, предоставляя возможность варьирования свойств получаемой детали путем изменения ее внутренней структуры в различных сечениях: плотности, рисунка заполнения и толщины внешних контуров. Тем самым разработчик может изменять упругие и массовые свойства элементов изде-

лия в зависимости от его целевого назначения. Изготавливать их можно как путем штучного ручного производства с использованием механической обработки на ЧПУ, так и с помощью только 3D-печати. Наиболее эффективны с экономической точки зрения именно аддитивные технологии: высокий коэффициент использования материала, возможность изменения свойств отдельных участков детали путем варьирования внутренних структур, отсутствие необходимости в специальной оснастке.

Попытки изготовления экспериментальных образцов конструкций электродвигателей электрических скутеров, велосипедов и мотоциклов с применением аддитивных технологий, будучи реализованными даже на уровне поисковых работ, вызывают значительный интерес научной общественности и производственных организаций [1].

Развивается приложение аддитивных технологий для мотоциклов. Так, компания «TE Connectivity» представила на выставке Rapid 2015 первый в мире мотоцикл, напечатанный на 3D-принтере и способ-

ный передвигаться [2]. Технологии 3D-печати металлами (сталь, титан, алюминий) нашли свое применение и в производстве велосипедов. В частности, образец с рамой из нержавеющей стали создан в Нидерландах. Аддитивные технологии активно используют производители велокомпонентов во многих странах. В Бельгии представили велосипед, полностью изготовленный методом 3D-печати [3]. Выпущенный с помощью аддитивных технологий титановый велосипед Solid с вибрирующими ручками, которые подсказывают направление, создан компанией «Industry» из Портленда в партнерстве с «Ti Cycles» [4].

Уже сейчас аддитивные технологии активно внедряются в машиностроение. При изготовлении суппортов Bugatti Chiron принтер Laser Zentrum Nord с четырьмя 400-ваттными лазерами тратит около 45 часов на 4 элемента тормозной системы, а при спекании каждой детали по SLS-технологии печатающее устройство наносит поочередно 2213 слоев титанового порошка. 3D-печать использует Volvo, а Audi печатает на огромном принтере



Рис. 1. Иерархическая модель персонального электрического транспортного средства (ПЭТС)

алюминиевые кузовные детали и т.д. Однако говорить о широком применении перечисленного пока рано – это технологии V-VI уклада, требующие не только серьезных материальных вложений, но и значительного интеллектуального труда.

Важность исследований в данной области обусловлена высоким потенциалом аддитивных технологий для производства в будущем, так как они позволяют выпускать детали самой разной степени сложности и формы; значительно сокращают сроки изготовления;

снижают роль человеческого фактора, в ряде случаев исключая его полностью, что влечет за собой большую точность и высокое качество изделий, а также сокращают возможность конструкторско-технологических ошибок; снижают себестоимость и улучшают параметры продукции; предоставляют возможность управления физико-химическими свойствами компонентов при создании композитных структур [5].

Выбор одной из существующих аддитивных технологий (EBM, SLS (Selective Laser Sintering), MJM (Multi-Jet Modeling), SLA (Stereolithography apparatus) и др.) производится в результате выполнения комплекса исследований, направленных на обеспечение эксплуатационных характеристик деталей, изготовленных с помощью 3D-печати [6].

Коллектив ОАО «Приборостроительного завода «Оптрон» выполнил комплекс работ по систематизации накопленного мирового опыта, выборке приоритетных вет-

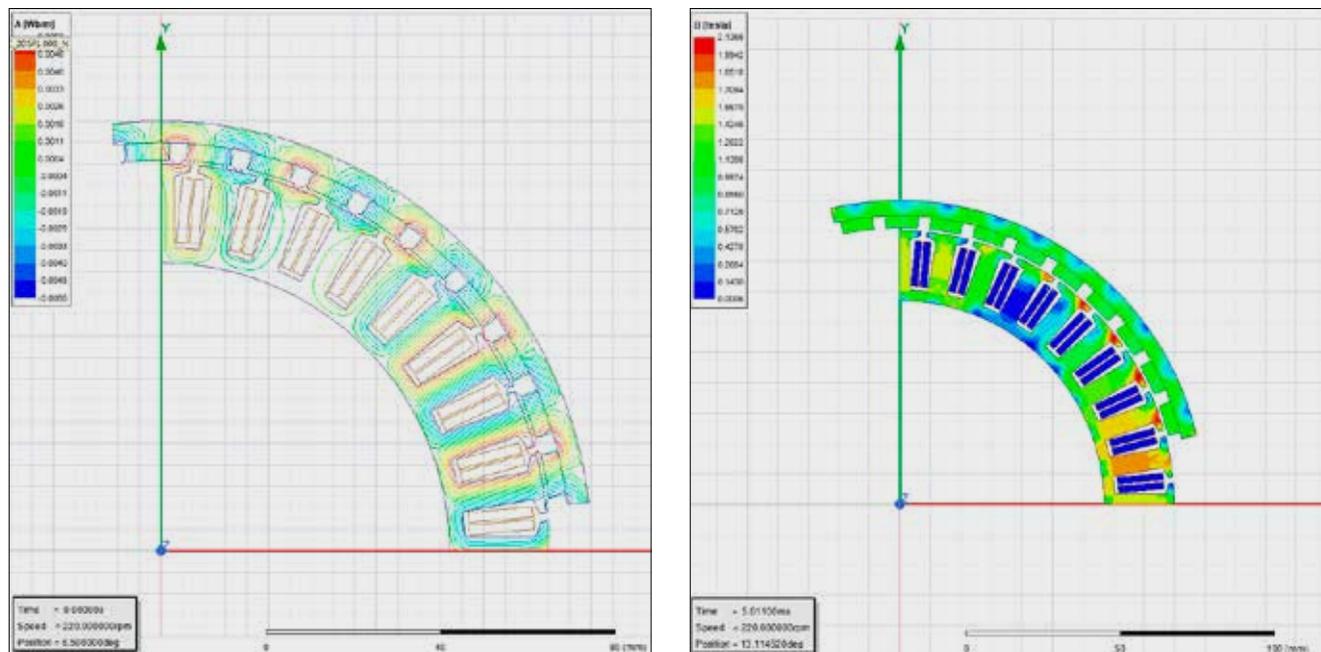


Рис. 2. Расчетная модель синхронного электродвигателя привода электроскутера: линии магнитного поля (слева), распределение магнитной индукции при пиковых токах фазы (справа)

вей развития персонального электротранспорта и гибких технологий производства опытных образцов и будущей продукции. Применен системный подход к проектированию персональных электрических транспортных средств, оптимизированы технологии их прототипирования для возможности быстрой адаптации к изменениям потребностей рынка, внедрены прогрессивные технологии и материалы, повышающие конкурентоспособность продукции.

К разработке конструкции персонального электрического транспортного средства применен системный подход (рис. 1).

Как следует из иерархической схемы общей конструкции ПЭТС, вся она «завязана» на трех основных узлах: двигателе, аккумуляторной батарее и раме. На них приходится 80% себестоимости любого электрического средства передвижения.

Синхронный электродвигатель, в свою очередь, имеет два основных элемента: статор с намоткой и ротор с наклеенными или встроенными постоянными редкоземельными магнитами. С точки зрения производства, наибольший интерес ввиду удельного веса и возможности внедрения новшеств вызывает статор электродвигателя. В классическом виде он представляет собой набор пластин, выполненных из стали с высоким содержанием кремния. Исходя из этого можно сформулировать две проблемы: первая – в конструкции применяется специализированный материал, имеющий специфические свойства для обработки; вторая – для сборки одного статора требуется большое (как правило, более 50) количество одинаковых пластин, что требует использования дорогостоящих штампов.

Нашими специалистами была разработана и апробирована

расчетная модель, позволяющая с высокой точностью выполнить проектирование и предварительный расчет параметров синхронного электродвигателя (мотор-колеса или конструкции с наружным статором) без необходимости изготовления большого количества опытных образцов (рис. 2).

В ходе проделанных работ был проанализирован мировой опыт, с учетом которого принято решение заменить изделия из листовых электротехнических сталей на порошковые (рис. 3). Это позволяет изготовить детали электроприводов методом прессования. Экономические, а в ряде случаев и технические преимущества порошковых магнитомягких материалов обеспечивают их широкое использование в переносных полях (рис. 4).

Разработана технологическая оснастка для прессования нанокристаллического порошка железа с покрытием на основе фосфатов. В результате проведенных испытаний технология хорошо себя зарекомендовала, полученный КПД электротрансмиссии свидетельствует о сопоставимости параметров. При проектировании применены параметрические твердотельные модели, которые позволяют быстро менять геометрию деталей с автоматическим изменением связанных параметров.

Полученные решения нашли применение в конструкции статора мотор-колеса скутера GreenLine GL-051 (рис. 5) производства ОАО «Приборостроительный завод Оптрон». Выпущена опытная партия из 10

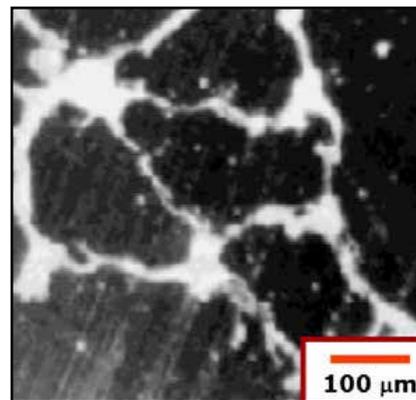


Рис. 3. Параметрическая твердотельная модель статора мотор-колеса электро-скутера (слева) и микроструктура изолированного магнитомягкого материала зубьев статора (справа)

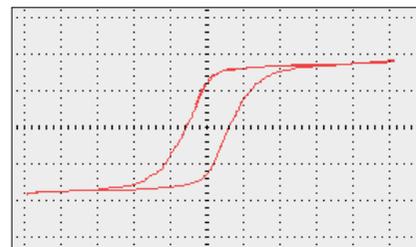
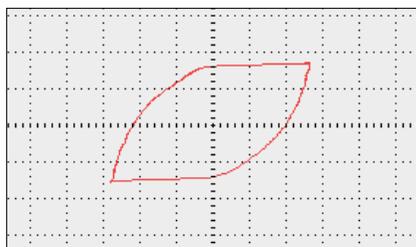


Рис. 4. Кривая намагничивания изолированного магнитомягкого материала (слева) и электротехнической стали 2212 ГОСТ 21427.2-83 (справа)

электроскутеров, разработаны технические условия. В данный момент проводится их сертификация для допуска к движению на дорогах общего пользования.

Анализируя иерархическую модель, можно отметить высокое присутствие полимерных деталей в конструкции ПЭТС: корпус аккумуляторной батареи, декоративные элементы, кронштейны и т.д. Стоит отметить, что все они, в отличие от рамных конструкций, мотор-колес, аккумуляторной батареи, в ходе жизни должны претерпевать множественные изменения, обновляться, модернизироваться. Для решения данного вопроса и обеспечения повторяемости производства опытных макетных образцов выполнен комплекс работ по исследованию и оптимизации аддитивной технологии FDM-печати.

Испытания на растяжение и сжатие проводились на установке WDW-100 E с использова-

нием образца типа 1А по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527–2:2012). При исследовании образцов различного рисунка заполнения плотность оставалась для всех равной 30% (рис. 6).

Сформированы технологические режимы печати отдельных деталей, в частности корпуса съемной батареи и элементов декоративного аэродинамического обвеса опытного электромотоцикла RedLine RL-01 производства ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (рис. 7).

На данный момент рынок мотоциклов с электрическим приводом очень узок, и основная цель создания опытного образца – мониторинг потребительского интереса. При наличии потенциального заказчика и инвестора, имея результаты профильных испытаний и технологическую оснастку, можно будет в кратчайшие сроки перейти к выпуску такой модели.

Полученные данные позволяют применять их при решении других задач. Так, при создании прототипа электросамоката, анализируя



Рис. 5. Электроскутер GreenLine GL-051

Температура сопла	200(±2)°C
Температура стола	50(±3)°C
Толщина слоя	0,28 мм
Толщина стенки	0,8 мм
Толщина дна/крышки	0,84 мм
Скорость печати	75 мм/с
Пластик	PLA (пр-во KHP)
Принтер	Ortur V4

Таблица 1. Параметры печати опытных образцов

№ п/п	Плотность заполнения, %	Среднее значение напряжения, МПа
1	10	25,37
2	20	25,48
3	30	25,73
4	40	33,28
5	50	35,88
6	60	49,83
7	70	52,35
8	80	55,80
9	90	62,17
10	100	71,70

Таблица 2. Результаты испытаний образцов различной плотности заполнения

потребительские качества моделей, представленных на белорусском рынке, выявлен ряд недостатков, например отсутствие достаточного демпфирования неровностей и ненадежности пневматических шин. С учетом новейших достижений было принято решение о разработке безвоздушного колеса с внутренней подвеской (рис. 8).

Для этого была использована программа САПР Solidworks. Разработанная модель соответствует посадочным размерам электросамоката Xiaomi Mijia M365, выбранного для проведения натурных испытаний. Заднее колесо демонтировали, и на его место установили весы. Было определено, что

при среднестатистическом весе водителя в 90 кг на заднее колесо может приходиться максимум 50 кг нагрузки (при положении водителя с максимальным смещением назад).

При выборе геометрии колеса предпочтение отдано двойной спиральной пружине кручения (рис. 9 А) для обеспечения его боковой жесткости при минимальном количестве деталей и узлов. Применение витых пружин в подобных конструкциях ведет к необходимости внедрения направляющего аппарата в конечное изделие. Плоские витые пружины благодаря своей форме обеспечивают функцию бокового ребра жесткости.

В первом приближении была создана модель с фиксированными посадочными размерами и свободными размерами геометрии спиц-демпферов. Были заданы статические и рабочие нагрузки и выполнен анализ деформированного состояния спиц обода в среде Solidworks Simulation (рис. 9 Б). Для выбора оптимальных параметров модели использован модуль исследования проектирования. В качестве переменных показателей применены радиусы скругления спиц-демпферов и их толщина. Радиусы и зависимы от толщины спицы Н и перестраиваются автоматически.

Для испытаний разработанной конструкции был собран трамплин, соответствующий высоте бордюра по ГОСТ 6665–91 – не более 0,05 м. Скорость электро-самоката – 20 км/ч (максимальная конструктивная), вес водителя – 90 кг. Запись прыжков производилась с частотой 120 fps.

Как видно из результатов моделирования (рис. 10), спицы обода испытывают преимуще-

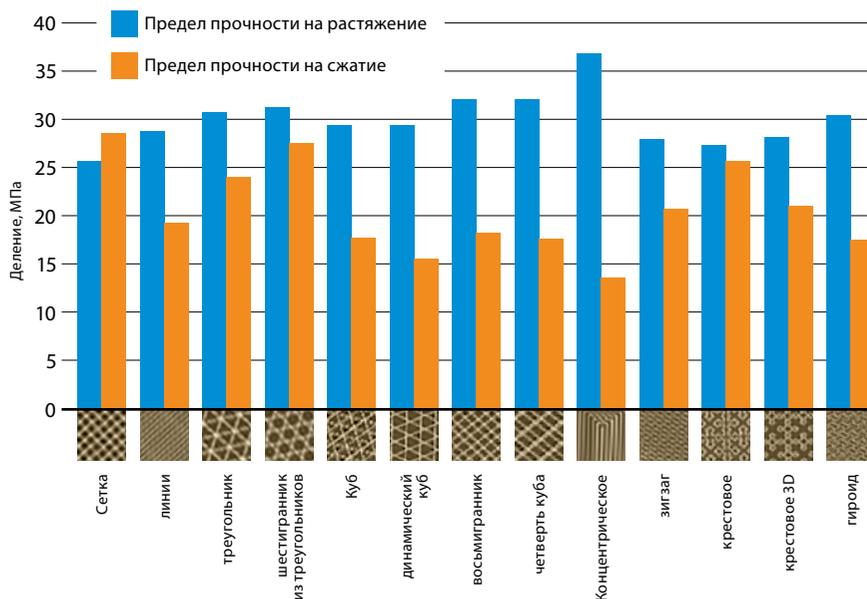


Рис. 6. Сравнение результатов испытаний образцов на растяжение и сжатие

ственно нагрузки на растяжение. Опираясь на полученные данные, можно сделать вывод о том, что для этой части детали необходимо использовать концентрический рисунок заполнения. Для корреляции данных с результатами моделирования было выбрано 100%-ное заполнение детали.

Проанализировано 43 возможных сценария с параметрами оптимизации: напряжение во всех точках детали меньше предела прочности при минимальной ее массе. Количество сценариев и время анализа напрямую связаны с возможностями вычислительной системы. Максимальная деформация при заложенных нагрузках составила 4 мм без разрушений.



Рис. 7. Электромотоцикл RedLine RL-01



Рис. 8. Велосипед с безвоздушными шинами Bridgestone [7]

Обод колеса испытывает комплексные деформации от сжатия – растяжения при знакопеременной нагрузке (рис. 11). В соответствии с результатами предыдущих исследований, для снижения неподрессоренных масс наружный обод заполнен неплотно (на 10%, с рисунком шестигранника, состоящего из треугольников). Это обеспечивает высокие относительно других образцов показатели прочности как при испытаниях на растяжение, так и на сжатие (рис. 12).

Все полученные данные были применены при проектировании отечественного электросамоката, находящегося сейчас в стадии доводочных испытаний (рис. 13).

Таким образом, в результате системного подхода к проектированию персональных электрических транспортных средств разработаны и изготовлены технология и технологическая оснастка для производства статоров синхронных электрических машин из порошковых магнитомягких материалов; проведены натурные испытания мотор-колеса с таким статором. Также разработана методика проектирова-

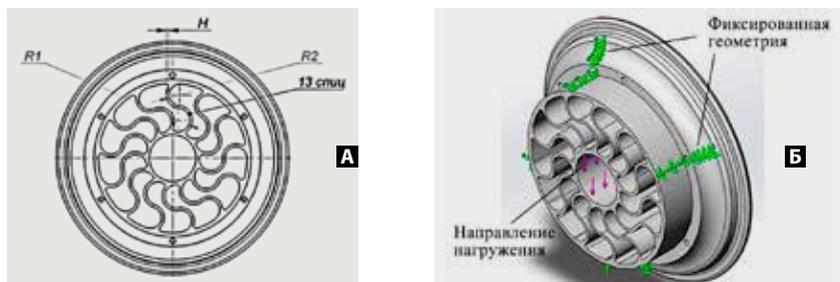


Рис. 9. Геометрия обода колеса с параметрами оптимизации (А) и расчетная модель обода колеса (Б)

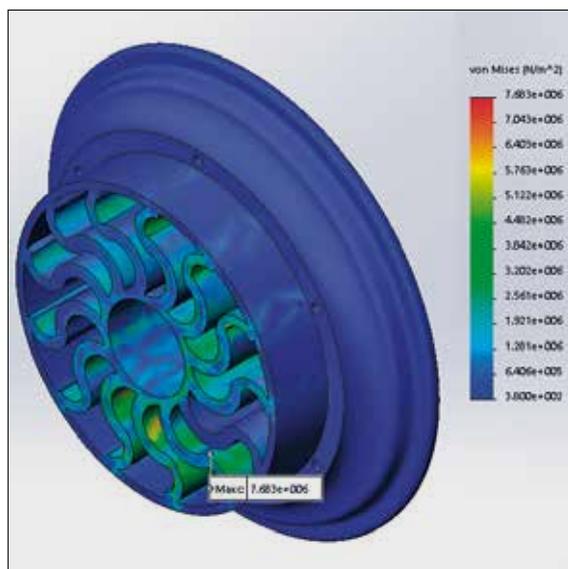


Рис. 10. Эпюра напряжений спиц обода

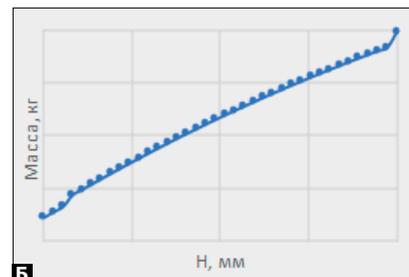
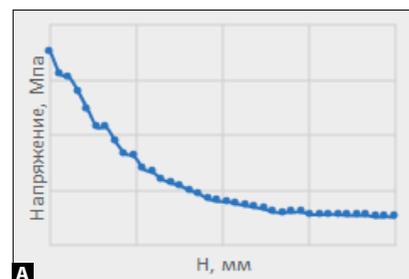


Рис. 11. Зависимости напряжений спиц (А) и массы обода от толщины спицы (Б)

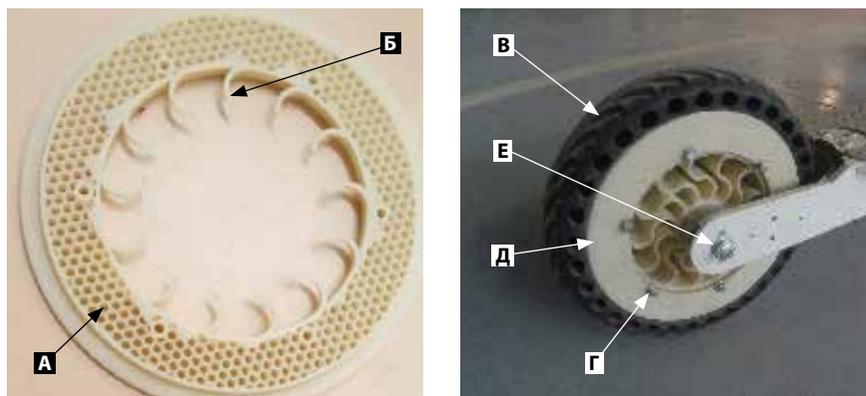


Рис. 12. Внутренняя структура обода колеса (слева) и колесо в сборе (справа), установленное на электросамокат XiaomiMijiaM365: А- внутреннее заполнение обода (30%, рисунок-шестигранник из треугольников), Б-внутреннее заполнение спиц обода (100%, рисунок заполнения – концентрический), В – литая резиновая шина, Г – стягивающие шпильки, Д – стягивающее кольцо, Е – ось со ступицей, вклеенной в обод)

ния демпфирующих элементов колес на основании расчетной модели с критериями оптимизации в виде предельно допустимых перемещений отдельных элементов, предела прочности материала с учетом влияния геометрии обода (радиусов скруглений, толщин и количества спиц). Были оптимизированы параметры плотности и формы заполнения отдельных элементов методом 3D-печати. Показано, что максимальное сочетание прочности при растяжении достигается при концентрическом

рисунке заполнения. Для обеспечения жесткости во всех направлениях при сохранении минимальной массы целесообразно применять рисунок заполнения «шестигранник из треугольников».

Новые методы могут быть охарактеризованы как ускоренные по сравнению с классическим циклом инжиниринга конструкции, что позволяет трансформировать ее узлы и дизайн в соответствии с быстро изменяющимися требованиями в сфере производства электротранспорта. ■



Рис. 13. Электросамокат ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»

■ **Summary.** The article describes the process of creating prototypes of personal electric vehicles, in particular, an electric motorcycle and an electric scooter, carried out under the Fourth industrial revolution, characterized by the widespread introduction of additive manufacturing into production, nano-structured powder materials and completely virtual design and simulation.

■ **Keywords:** Industry additive technologies, soft magnetic materials, modeling, industry 4.0.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2021-1-34-41>

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Volochko A., Yankevich St., etc. 3D printing application in personal light electric transport production in Belarus// Proceedings of the conference «Transport Research Arena» (TRA-2020): Proceedings of TRA-2020, 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.
2. На 3D-принтере напечатали полностью рабочий мотоцикл // <https://3dtoday.ru/blogs/masterkit/the-3d-printer-printed-a-fully-working-motorcycle/>.
3. Распечатали. Как 3D-технологии покорили автотранспорт // <https://additiv-tech.ru/publications/raspechatali-kak-3d-tehnologii-pokorili-avtoprom.html>.
4. 3D-печать велосипедов // <https://velomesto.com/magazine/3d-pechat-velosipedov>.
5. Кулиш А.М. Использование аддитивных технологий для получения деталей машиностроения // Молодежный научно-технический вестник. 2015. №5.
6. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. – М., 2015.
7. Шеховцов А.А., Карпова Н.П. Аддитивные технологии как способ реализации бережливого производства // Научно-методический электронный журнал концепт. 2015. Т. 13. Стр. 141–145.
8. Bridgestone выпустит безвоздушные шины для велосипедов // <https://nplus1.ru/news/2017/04/21/airfree>.

Статья поступила в редакцию 06.01.2020 г.

SEE <http://innosfera.by/2021/01/industry4.0>