

УДК 655.225.6:773.92:004.925.84

**В. Б. Ходер, Е. И. Кордикова, Г. Н. Дьякова**  
Белорусский государственный технологический университет

### **НАПОЛНЕННЫЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ (ОБЗОР)**

В статье дается краткое описание технологий стереолитографии с применением оптических систем, использующих для отверждения полимерных композиций ультрафиолетовый или видимый свет. Показаны особенности, преимущества и недостатки данных технологий. Рассмотрены материалы, применяемые в процессе печати на основе лазерной стереолитографии, – фотополимерные составы на основе смол метакриловых мономеров и олигомеров, олигоэфиракрилаты, эпоксиакрилаты и др. С целью создания новых материалов с комплексом ценных эксплуатационных свойств в полимерные составы вводят наполнители.

На основе имеющейся из открытых источников информации в работе представлена классификация и анализ основных типов наполнителей, применяемых в фотополимерных составах: дисперсные наполнители – порошки мелкой фракции и микросферы; волокнистые наполнители – стеклянные, металлические, углеродные; кристаллообразные наполнители – нанодиамазы. Анализ данных по фотополимерным композитным составам, которые используются в современной трехмерной печати, показывает, что наполнители являются важнейшим элементом структуры и обладают обширным набором функций – от формирования физико-механических характеристик готовых материалов до придания специфических физических особенностей. Технические данные от производителей позволяют проанализировать физико-механические и технологические свойства имеющихся на сегодняшний день фотополимерных композиций с добавлением дисперсных частиц различного рода.

**Ключевые слова:** 3D-печать, фотополимерная смола, композиция, наполнитель, фотополимерная печать, стереолитография.

**Для цитирования:** Ходер В. Б., Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // Труды БГТУ: Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С.27–32.

**V. B. Khodzer, E. I. Kordikova, H. N. Dyakova**  
Belarusian State Technological University

### **FILLED PHOTOPOLYMER COMPOSITIONS FOR 3D PRINTING BY STEREOLITHOGRAPHY METHOD (OVERVIEW)**

The article gives a brief description of stereolithography technologies using optical systems using ultraviolet or visible light for curing polymer compositions. The features, advantages and disadvantages of these technologies are shown. The materials used in the printing process based on laser stereolithography are considered – photopolymer compositions based on resins of methacrylic monomers and oligomers, oligoesteracrylates, epoxyacrylates and others. In order to create new materials with a complex of valuable operational properties, fillers are introduced into polymer compositions.

Based on the available information from open sources, the classification and analysis of the main types of fillers used in photopolymer compositions are presented in the work: dispersed – fine fraction powders and microspheres; fibrous – glass, metallic, carbon; crystalline – nanodiamonds. Analysis of data on photopolymer composite compositions used in modern three-dimensional printing shows that fillers are the most important element of the structure and have an extensive set of functions – from a complex forming the physical and mechanical characteristics of finished materials to giving specific physical features. Technical data from manufacturers allow us to analyze the physico – mechanical and technological properties of currently available photopolymer compositions with the addition of dispersed particles of various kinds.

**Key words:** 3D printing, photopolymer resin, composition, filler, photopolymer printing, stereolithography.

**For citation:** Khoder V. B., Kordikova E. I., Dyakova H. N. Filled photopolymer compositions for 3D printing by stereolithography method (overview). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 27–32 (In Russian).

**Введение.** Трехмерная печать – быстроразвивающаяся и перспективная технология, которая на сегодняшний день используется во многих сферах: от быстрого прототипирования и создания тактильных, улучшающих восприятие моделей до функциональных или крупногабаритных объектов. Использование в производственном процессе универсальных промышленных принтеров для трехмерного изготовления позволяет повысить эффективность производственного процесса, снять ограничения со сложных геометрий, производство которых затруднительно классическими методами, увеличить ассортимент производимой продукции или переориентировать производственный процесс из одной отрасли в другую в сжатые сроки. В зависимости от выбора средств технического оснащения, вида используемого в производственном процессе материала, требований к качеству и конечным свойствам готового изделия существует множество разновидностей аддитивной печати, среди которых можно выделить высокоточные технологии отверждения фотополимерных составов [1].

До недавнего времени технологии получения трехмерных изделий отверждением фотополимерных смол не могли претендовать на актуальность в связи с высокой разницей в стоимости оборудования и процессов печати по сравнению с другими технологиями аддитивного синтеза, в частности методом послойного наплавления (FDM). Но на протяжении последнего десятилетия технологии трехмерного отверждения фотополимерных смол активно развивались и масштабно интегрировались в производственные процессы.

Преимуществами данных технологий на сегодняшний день является высокая точность и качество поверхности полученных моделей, возможность изготовления объектов с геометрией различной сложности, гибкость применяемых материалов и, как следствие, возможность применения в различных сферах: автомобильной, авиакосмической и других видах промышленности, в сфере услуг (в том числе большую часть занимает медицина), ювелирном деле, образовании, искусстве и пр. [2].

Методы трехмерного отверждения фотополимерных составов включают в себя процесс селективной или масочной полимеризации смолы под действием источника ультрафиолетового (УФ) излучения или видимого света. Выделяют три основные технологии: лазерная стереолитография (SLA – stereolithography) – луч лазера отверждает смолу постепенно, точку за точкой; проекционная масочная стереолитография (DLP – digital light processing) – проектор засвечивает сразу весь слой и целиком отверждает его;

прямая ультрафиолетовая засветка (LCD – liquid crystal display) – жидкокристаллический экран маскирует свет от проектора или использует собственное излучение для засветки / отверждения слоя.

**Основная часть.** Материалы, используемые в технологиях, связанных с отверждением, – это, как правило, термореактивные смолы, представляющие собой смесь трех основных компонентов: олигомеров, мономеров и фотоинициаторов. Кроме основных компонентов в состав смол могут вводиться добавки различного функционального назначения: красители, регуляторы, стабилизаторы, а также наполнители.

Некоторые смолы совместимы с различными моделями 3D-принтеров или подходят к использованию в нескольких технологиях (например, материалы для LCD и DLP), а некоторые предназначены только для оборудования производства одного бренда.

В зависимости от вида используемой технологии композиции могут отличаться по составу основных элементов и добавок. Смолы для DLP- и LCD-технологий более чувствительны к свету и имеют в своем составе меньшее количество олигомеров, вследствие чего обладают меньшей вязкостью по сравнению с материалами, предназначенными для SLA-технологии. Смолы для SLA-технологии, как правило, более жесткие и имеют большую точность построения контуров.

Стереолитографический процесс изготовления изделий можно разделить на два условных этапа: создание трехмерной модели и изготовление изделия.

На первом этапе трехмерная модель проектируется в файле системы автоматизированного проектирования (САПР). После чего фасетированная геометрия разрезается на слои с заданной толщиной или адаптивно, т. е. регулируется по сложности геометрии. Высота слоя определяет горизонтальные поперечные сечения модели, которая готовится к печати. Сечение тела визуально представлено в виде контуров, точно повторяющих очертания объекта. Рельеф поверхности аппроксимируется ступенями, высота которых контролируется высотой проецируемого слоя. На основе координатных контурных линий формируется файл системы САПР для расчета траектории движения оптической системы и рабочей поверхности построения, которые в комплексе воспроизводят соответствующий горизонтальный участок на поверхности жидкого фотоотверждаемого компаунда.

На втором этапе процесса происходит изготовление изделия путем послойного отверждения жидкой фотоотверждаемой смолы под действием лазерного или экранного облучения УФ или видимым светом. Излучение точечно или

потоком направляется на поверхность в соответствии с заданными кодом SLI-формата контурами, в результате чего фотоинициаторы в составе смолы, поглощая энергию излучения, генерируют свободные радикалы или другие химически активные вещества, которые в свою очередь инициируют сшивку жидкого мономера. Реактивные частицы образуются непосредственно в зоне облучения, поэтому полимеризация происходит в соответствии с локальным фазовым переходом в среде из жидкости в твердое состояние. После каждого этапа отверждения контура рабочей поверхности платформа смещается на толщину слоя и этап повторяется слой за слоем.

Фотополимерный состав для 3D-печати – многокомпонентная система, в основе которой лежат полимеризующиеся мономеры, олигомеры и фотоинициаторы. Кроме основных компонентов в состав могут вводиться добавки различного функционального назначения: красители, регуляторы, стабилизаторы, а также наполнители, обеспечивающие снижение величины усадки [3, 4].

На основании информации о составах, представляемых производителями [5–11] фотополимерных смол для трехмерной печати, можно выделить следующие комплексы: смеси метакриловых мономеров и олигомеров [12], олигомеры с мономерами гексаметилен диакрилата [13], олигоуретан-диметилакрилаты, олигоэфиракрилаты, 2-гидроксиэтил метакрилаты [14], эпоксиакрилаты [15] и пр. Стоит отметить, что состав смол, как правило, имеют в основе акрилатные группы, разнообразны даже в рамках одной линейки материалов. Есть также исключения – смолы на основе уретановых олигомеров представлены в линейках фотополимеров заменителей термопластичного полилактида [13], а также смолы не использующие в своем составе олигомеры [16].

УФ-отверждаемая дисперсия может содержать несколько материалов в составе, но необходимо сохранить как минимум два основных компонента в смоле: мономеры и фотоинициатор. Для снижения вязкости могут быть добавлены диспергаторы и другие инертные растворители [17].

Несмотря на то, что смолы с различной химической природой определяют конечные свойства изделия и позволяют получить широкий спектр различных характеристик, изменение их химического состава с использованием специальных реагентов повышает себестоимость конечного материала, а также может ограничивать диапазоны получаемых физико-механических характеристик. Кроме того, изменение состава смолы может приводить к решению одной

поставленной задачи, однако приводит к появлению новых проблем, в том числе снижению стабильности свойств.

Возможным решением задачи получения специальных материалов с комплексом ценных эксплуатационных свойств, улучшения технологических показателей и перерабатываемости, удешевления материалов, утилизации отходов и решения экологических задач, получения декоративных эффектов [18] является добавление в исходный состав фотополимера наполнителей различного происхождения. В исследуемой области активно обсуждаются вопросы разработки композиционных материалов на фотополимерной основе для трехмерной печати [17, 19–21].

Высокооднородные, стабилизированные и хорошо диспергированные суспензии смол с наполнителем в составе являются предпосылкой для повышения эффективности применения стереолитографии в аддитивном производстве.

В настоящее время компании Stratasys, 3D Systems и Formlabs предлагают наполненные суспензии для классических фотополимерных трехмерных технологий (SLA, DLP, LCD); также на рынке присутствует несколько производителей, предлагающих пасты для других технологий, основанных на вышеперечисленных.

Анализ научных публикаций, технической литературы и зарубежного опыта применения композиционных фотополимерных смол позволил систематизировать и по возможности классифицировать используемые виды наполнителя в составе суспензии. Среди них выделяют нанодисперсные, волокнистые и кристаллические.

**Нанодисперсные наполнители.** К данному типу наполнителей можно отнести порошки мелкой фракции или микросферы – мел, асбест, керамические составы, металлические сплавы, углеродные и стеклянные порошки и сферы, кевлар и другие специфические наполнители.

Рассмотрим примеры использования нанодисперсных наполнителей в современном производстве материалов для трехмерной фотополимерной печати:

– *керамически армированные композитные фотополимеры Accura* от Stratasys: Accura Peak, Accura HPC, Accura CeraMAX Composite и Accura Bluestone. Материалы Accura обладают повышенными термостойкостью, влагостойкостью и стойкостью к истиранию. Используются в изготовлении моделей аэродинамических труб; прототипов, приспособлений, датчиков; элементов, контактирующих с жидкой средой и других высокопрочных соединений [22];

– *керамическая фотополимерная смола Ceramic*, выпускаемая брендом Formlabs. Ceramic – первый доступный керамический

материал для 3D-печати методом настольной стереолитографии, наполненный частицами кремния с содержанием до 80 мас. %. После обжига фотополимерная система выгорает, оставляя керамическую структуру. Данный материал после обжига обладает высокой термостойкостью (до 1000°C), высокой тепловой и электрической изоляцией, высокой устойчивостью к коррозии, химическим составам и износу [5];

– *фотополимерная смола, наполненная стеклянными сферами, Regid Resin* от Formlabs. Содержание стеклянных микросфер с размером около 1 мкм составляет до 25 мас. %. Подобное содержание наполнителя позволяет обеспечивать в конечном изделии высокую жесткость и высокое качество поверхности. Материал обладает повышенной устойчивостью к деформациям и используется в высокоточной печати [5];

– *кремниевый фотополимер на водной основе*. Материал, в котором использованы порошки диоксида кремния со средним размером частиц 1,5 и 9,3 нм с объемным содержанием твердого наполнителя около 50%, разработан в рамках научных исследований в Сианьском университете Цзяотун. Полученные композиционные материалы обладают необходимым сцеплением наполнителя и матрицы, без образования излишнего напряжения в структуре, позволяют достигать глубины отверждения более 200 нм и демонстрировать печать с разрешением около 0,1 мм. Наполнитель позволяет повысить физико-механические характеристики, что говорит о функциональном использовании керамических компонентов в составе смолы [17];

– *металлонаполненные смолы AdmaPrint* разработаны для DLP-технологии. В качестве наполнителя используют нержавеющие стали, инконель и медь с размером частиц от 200 до 10 нм. Полученные композиции имеют повышенную по сравнению с чистыми смолами жесткость, материалы обладают схожей с металлической шероховатостью, а после обработки позволяют получать гладкую блестящую металлизированную поверхность и ограниченную электропроводность [9].

**Волокнистые наполнители.** К ним относятся *фотополимеры, наполненные металлическими волокнами*. Примером применения композиционных материалов с использованием металлических волокон является печать методом магнитной ориентирующей фотополимерной стереолитографии. Однако стоит отметить, что данные материалы обладают невысокой стабильностью и требуют введения стабилизирующих добавок [10].

### **Нанотрубки и кристаллообразные частицы.**

Они включают:

– *наноалмазный кристаллический порошок в фотополимерных смолах*, который используется для получения смол, способных поглощать свет в широком спектре волн, в том числе отверждаться при дневном свете. На примере исследования [23] видно, что наличие в составе смол наноалмазного кристаллического порошка в небольшом объеме (порядка 1–2%) позволяет повысить пропускание света через материал на 86%;

– *фотополимерная композиция, наполненная многослойными углеродными нанотрубками*. В разработке Сианьского университета Цзяотун проводилось внедрение многослойных углеродных нанотрубок в фотоотверждаемую смолу, направленное на четырехмерную печать. Результат показал, что наполнение смолы всего на 0,3% позволяет обеспечить изделию электропроводность в 0,027 Ом. Данные композиции также можно использовать в качестве интеллектуальных материалов со свойствами памяти формы без снижения физико-механических характеристик изделия [24].

Анализ композитных составов, применяемых в современной трехмерной печати методом отверждения, показал, что важнейшим элементом структуры фотополимерных композиционных материалов являются наполнители, которые обладают обширным набором функций – от формирования физико-механических характеристик готовых материалов до придания специфических физических особенностей (блеск, шероховатость, пропускание света, электропроводность и т. п.).

**Заключение.** Изучая опыт зарубежных стран, можно говорить о возможности смешения композитных составов на основе стандартных смол с добавлением различного типа наполнителя, что позволяет получать фотополимерные композиционные материалы различной структуры с требуемым набором эксплуатационных свойств, что в свою очередь расширяет области применения аддитивных технологий в различных отраслях промышленности.

При разработке новых наполненных материалов необходимо использовать комплексный подход к подбору компонентов состава, исходя из теоретической оценки характеристик целевого материала и конечного продукта.

Наиболее перспективными и стабильными считаются мелкодисперсные порошки низкой плотности в составе композиции.

### **Список литературы**

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: Техносфера, 2016. 656 с.

2. Дожделев А. М., Лаврентьев А. Ю. Обзор фотополимерных материалов для 3D-печати методом стереолитографии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 9-2 (48). С. 99–101.
3. Шкуро А. Е., Кривоногов П. С. Технологии и материалы 3D-печати. Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 101 с.
4. Industrial 3D-printing materials and resin // 3D System. URL: <https://www.3dsystems.com/materials> (date of access: 10.10.2021).
5. 3D-printing Materials Library // Formlabs. URL: <https://formlabs.com/materials> (date of access: 10.10.2021).
6. Ceramic Materials // Tethon 3D. URL: <https://tethon3d.com> (date of access: 10.10.2021).
7. Matériaux d'impression 3d pour applications industrielles // ProdwaysTech. URL: <https://www.prodways.com/fr/material> (date of access: 10.10.2021).
8. Ceramic materials // Lithoz. URL: <https://www.lithoz.com/produkte/material> (date of access: 10.10.2021).
9. Керамика // Admatec. URL: <https://admatec.ru/keramika> (дата обращения: 10.10.2021).
10. Ceramics // 3D Cream. URL: <https://3dceram.com/ceramics> (date of access: 10.10.2021).
11. Stereolithography // Convestro. URL: [https://am.covestro.com/en\\_US/products/stereolithography.html](https://am.covestro.com/en_US/products/stereolithography.html) (date of access: 10.10.2021).
12. Resins // Monocure3D. URL: <https://monocure3d.com.au/product-category/resins> (date of access: 10.10.2021).
13. Resins // eSUN. URL: <https://www.esun3d.net/products/resins> (date of access: 10.10.2021).
14. Продукция. Материалы для 3D-печати // Harz Labs. URL: <https://harzlabs.com> (дата обращения: 10.10.2021).
15. LCD-resin // Elegoo. URL: <https://www.elegoo.com/collections/resin> (date of access: 10.10.2021).
16. Продукты // FunToDo. URL: <https://funtodo.ru/#products> (дата обращения: 10.10.2021).
17. Curing characteristics of ceramic stereolithography for an aqueous-based silica suspension / Z. Chen [et al.] // Journal of Engineering Manufacture. 2010. Part B. P. 641–651.
18. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1). Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. 118 с.
19. Griffith M. L. Stereolithography of ceramics: Cand. Thesis. Candidate of those. sciences. Ann Arbor, Michigan, 1995. 86 p.
20. Miao W., Holloran J. W., Bray D. I. Suspension Polymerization, Casting, Zirconate, Lead, Titanate. Part I: Acrylamide Hydrogel System // Journal of Materials Science. 2003. June. P. 2571–2579.
21. Dufo O., Belt S. Stereolithography of PZT ceramic suspensions // Rapid Prototyping Journal. 2002. Vol. 8, issue 2. P. 83–90.
22. Neo 3D printer series materials // Stratasys. URL: <https://www.stratasys.com/materials/search/neo-3d-printer-series-materials> (date of access: 10.10.2021).
23. Optical properties of daylight curable resin doped with nanodiamond powder / K. Krolewski [et al.] // Photonics letters of Poland. 2019. Vol. 11 (3). P. 81–83.
24. Quanyi M., Lei W., Conner K. D. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 18. P. 74–83.

## References

1. Gibson Ya., Rosen D., Stucker B. *Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat', bystroye prototipirovaniye i pryamoye tsifrovoye proizvodstvo* [Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing]. Moscow, Tekhnologiya Publ., 2016. 656 p. (In Russian).
2. Dozhdelev A. M., Lavrentiev A. Yu. Overview of photopolymer materials for 3d printing by stereolithography. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2020, no. 9-2 (48), pp. 99–101 (In Russian).
3. Shkuro A. E., Krivonogov P. S. *Tekhnologii i materialy 3D-pechati* [Technologies and materials for 3D printing]. Ekaterinburg, Uralsk State Forestry Engineering University Publ., 2017. 101 p. (In Russian).
4. Industrial 3D-printing materials and resin. Available at: <https://www.3dsystems.com/materials> (accessed 10.10.2021).
5. 3D-printing Materials Library. Available at: <https://formlabs.com/materials> (accessed 10.10.2021).
6. Ceramic Materials. Available at: <https://tethon3d.com> (accessed 10.10.2021).
7. Matériaux d'impression 3d pour applications industrielles. Available at: <https://www.prodways.com/fr/material> (accessed 10.10.2021).
8. Ceramic materials. Available at: <https://www.lithoz.com/produkte/material> (accessed 10.10.2021).
9. *Keramika* [Ceramics]. Available at: <https://admatec.ru/keramika> (accessed 10.10.2021).

10. Ceramics. Available at: <https://3dceram.com/ceramics> (accessed 10.10.2021).
11. Stereolithography. Available at: [https://am.covestro.com/en\\_US/products/stereolithography.html](https://am.covestro.com/en_US/products/stereolithography.html) (accessed 10.10.2021).
12. Resins. Available at: <https://monocure3d.com.au/product-category/resins> (accessed 10.10.2021).
13. Resins. Available at: <https://www.esun3d.net/products/resins> (accessed 10.10.2021).
14. *Produktsiya. Materialy dlya 3D-pechati* [Products. Materials for 3D-printing]. Available at: <https://harzlabs.com> (accessed 10.10.2021).
15. LCD-resin. Available at: <https://www.elegoo.com/collections/resin> (accessed 10.10.2021).
16. *Produkty* [Pruducts]. Available at: <https://funtodo.ru/#products> (accessed 10.10.2021).
17. Chen Z., Li D., Zhou W., Wang L. Curing characteristics of ceramic stereolithography for an aqueous-based silica suspension. *Journal of Engineering Manufacture*, 2010, Part B, pp. 641–651.
18. Bondaletova L. I., Bondaletov V. G. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy (chast' 1)* [Polymer composite materials (part 1)]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2013. 118 p. (In Russian).
19. Griffith M. L. Stereolithography of ceramics: Cand. Thesis. Candidate of those. sciences. Ann Arbor, Michigan, 1995. 86 p.
20. Miao W., Holloran J. W., Bray D. I. Suspension Polymerization, Casting, Zirconate, Lead, Titanate. Part I: Acrylamide Hydrogel System. *Journal of Materials Science*, 2003, June, pp. 2571–2579.
21. Duflo O., Belt S. Stereolithography of PZT ceramic suspensions. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, vol. 8, issue 2, pp. 83–90.
22. Neo 3D printer series materials. Available at: <https://www.stratasys.com/materials/search/neo-3d-printer-series-materials> (accessed 10.10.2021).
23. Krolewski K., Wieloszynska A., Kaminska A., Kardaez K. Optical properties of daylight curable resin doped with nanodiamond powder. *Photonics letters of Poland*, 2019, vol. 11 (3), pp. 81–83.
24. Quanyi M., Lei W., Conner K. D. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 18, pp. 74–83.

#### Информация об авторах

**Ходер Виктория Богуславовна** – магистрант кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [vh58998673194@gmail.com](mailto:vh58998673194@gmail.com)

**Кордикова Елена Ивановна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [kordikova@tut.by](mailto:kordikova@tut.by)

**Дьякова Галина Николаевна** – ассистент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [kravchenyagn1994@gmail.com](mailto:kravchenyagn1994@gmail.com)

#### Information about the authors

**Khodzer Viktoryia Baguslavauna** – Master's degree student, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [vh58998673194@gmail.com](mailto:vh58998673194@gmail.com)

**Kordikova Elena Ivanovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [kordikova@tut.by](mailto:kordikova@tut.by)

**Dyakova Halina Nikolaevna** – Assistant, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [kravchenyagn1994@gmail.com](mailto:kravchenyagn1994@gmail.com)

Поступила 10.11.2021