

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-8-20>



Исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металлополимерной проволоки

Р. А. Латыпов¹, Е. В. Агеев² ✉, В. А. Стрижеус¹, К. Бугеррума¹

¹ Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью настоящего исследования являлось исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металлополимерной проволоки.

Методы. Для печати и исследований использовали филамент Bronze Fill от производителя Color Fabb, в состав которого входит 80% бронзы и 20% полилактида. Для создания модели втулки экскаватора CAT-434 с учетом свойств филамента BronzeFill была использована программа Autodesk Inventor. Печать модели была проведена на 3D-принтере Anycubic Mega S. Химический состав образцов определяли с помощью спектрометра Niton Xl3t GOLDD. Микроструктуру материала изучали с помощью микроскопа Olympus GX53 при различных увеличениях. Шероховатость поверхности детали изучали с помощью профилометра Time Group TR300.

Результаты. На основании проведенных исследований установлено, что втулка, изготовленная методом 3D-печати, способна выдерживать массу полуоси с высоким запасом прочности. Бронза, полученная таким способом, может выполнять антифрикционную функцию при работе в условиях трения.

Существует возможность снижения себестоимости исходного материала для изделий, изготовленных методом 3D-печати послойной наплавкой металлопластиковой проволоки, путем использования в качестве наполнителя порошка, полученного из отходов промышленного производства. Это позволяет использовать экологически чистые материалы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Заключение. Использование метода 3D-печати для изготовления металлических изделий имеет большой потенциал для промышленности и научных исследований. Это позволяет создавать высококачественные, прочные и точные изделия со снижением затрат на производство. Использование метода 3D-печати для изготовления металлических изделий, таких как втулки, позволяет получать изделия с высокой точностью и качеством. Бронза, полученная 3D-печатью, имеет аналогичный химический состав и высокую прочность, что делает ее пригодной для использования в машиностроении.

Ключевые слова: 3D-печать; аддитивные технологии; многослойная наплавка; металлопластиковая проволока; бронзовая втулка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металло-полимерной проволоки / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, В. А. Стрижеус, К. Бугеррума // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-8-20>.

Поступила в редакцию 18.07.2023

Подписана в печать 21.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Investigation of the Material of the Bronze Sleeve Obtained by 3D Printing from Metal Polymer Wire

Rashit A. Latypov¹, Evgeniy V. Ageev² ✉, Valery A. Strizheus¹, Kahina Bugerruma¹

¹Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@yandex.ru

Abstract

The purpose of this study was to study the material of a bronze sleeve obtained by 3D printing from metal polymer wire.

Methods. For printing and research, the Bronze Fill filament from the manufacturer Color Fabb was used, which includes 80% bronze and 20% polylactide. To create a model of the CAT-434 excavator bushing, taking into account the properties of the Bronze Fill filament, the Autodesk Inventor program was used. The model was printed on an Anycubic Mega S 3D printer. The chemical composition of the samples was determined using a Niton XI3t GOLDD spectrometer. The microstructure of the material was studied using an Olympus GX53 microscope at various magnifications. The surface roughness of the part was studied using a Time Group TR300 profilometer.

Results. Based on the conducted research, it was found that the sleeve made by 3D printing is able to withstand the mass of the semi-axis with a high margin of safety. Bronze obtained in this way can perform an antifriction function when working in friction conditions.

It is possible to reduce the cost of the starting material for products made by 3D printing by layer-by-layer surfacing of metal-plastic wire by using powder obtained from industrial waste as a filler. This allows the use of environmentally friendly materials and reduces the negative impact on the environment.

Conclusion. The use of 3D printing for the manufacture of metal products has great potential for industry and scientific research. This allows you to create high-quality, durable and precise products with reduced production costs. Using the 3D printing method for the manufacture of metal products, such as bushings, allows you to obtain products with high accuracy and quality. The bronze obtained by 3D printing has a similar chemical composition and high strength, which makes it suitable for use in mechanical engineering.

Keywords: 3D printing; additive technologies; multilayer surfacing; metal-plastic wire; bronze sleeve.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Latypov R. A., Ageev E. V., Strizheus V. A., Bugerruma K. Investigation of the Material of the Bronze Sleeve Obtained by 3D Printing from Metal Polymer Wire. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023; 13(3): 8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-8-20>

Received 18.07.2023

Accepted 21.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

3D-печать – это инновационная технология, которая находит широкое применение в различных отраслях промышленности. С ее помощью можно быстро и эффективно создавать сложные и уникальные объекты, начиная от макетов и прототипов и заканчивая конечными изделиями.

Современные технологии аддитивного производства используются не только для производства прототипов, но и для создания индивидуальных решений в промышленности, машиностроении, медицине и архитектуре. В связи с этим к изделиям предъявляются высокие требования в отношении материала и качества изделия.

Один из перспективных методов 3D-печати – это выращивание изделий многослойной наплавкой из неметаллических материалов и металла. Этот метод позволяет производить изделия с высокой точностью и качеством. Установки для прямой печати металлом имеют значительно более высокую стоимость по сравнению с 3D-принтерами для печати методом послойной наплавки филамента (FFF), поэтому разработка способа печати изделий из металла на FFF 3D-принтере является актуальной задачей.

Для печати металлических изделий на FFF 3D-принтере необходимо использовать специальный металлополимерный филамент, который обычно состоит из металлического порошка и связующего пластика. Важно контролировать температуру и скорость печати, чтобы избежать деформации и дефектов в изделии. Однако металлические изделия, полученные на FFF 3D-принтере, могут иметь некоторые ограничения по механическим свойствам и точности, поэтому необходимо проводить дополнительную обработку.

В любом случае разработка способа печати изделий из металла на FFF 3D-

принтере является перспективной задачей, которая может привести к созданию новых возможностей для промышленности и других отраслей.

Одним из ближайших аналогов бронзы, входящих в состав филамента, является бронза БрО10Ф1. Это сплав, который часто используется в машиностроении и других отраслях промышленности. Изучение свойств филамента Bronze Fill может помочь улучшить производство и качество изделий, которые могут быть созданы с его помощью.

Целью работы являлось исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металлополимерной проволоки.

Материалы и методы

Для печати и исследований использовали филамент BronzeFill от производителя Color Fabb, в состав которого входит 80% бронзы и 20% полилактида [1]. Этот материал является одним из самых популярных материалов для 3D-печати металлополимерных изделий на FFF 3D-принтерах.

Для создания модели втулки экскаватора CAT-434 с учетом свойств филамента BronzeFill была использована программа Autodesk Inventor. Эта программа предоставляет широкий спектр инструментов для создания трехмерных моделей, которые могут быть использованы в том числе для 3D-печати.

Для подготовки модели к 3D-печати использовали программу Ultimaker Cura. В этой программе установили следующие параметры: заполнение 100%; слой 0,2 мм; скорость печати 40 мм/с; обдув 100%; температура сопла 210°C. Эти параметры были выбраны с учетом свойств филамента BronzeFill, который требует определенной температуры и скорости печати для достижения оптимальных результатов.

Печать модели была проведена на 3D-принтере Anycubic Mega S. Это устройство имеет достаточную точность и производительность, что позволяет получать ка-

чественные и точные изделия. Схема 3D-принтера Anycubic Mega S представлена на рисунке 1.

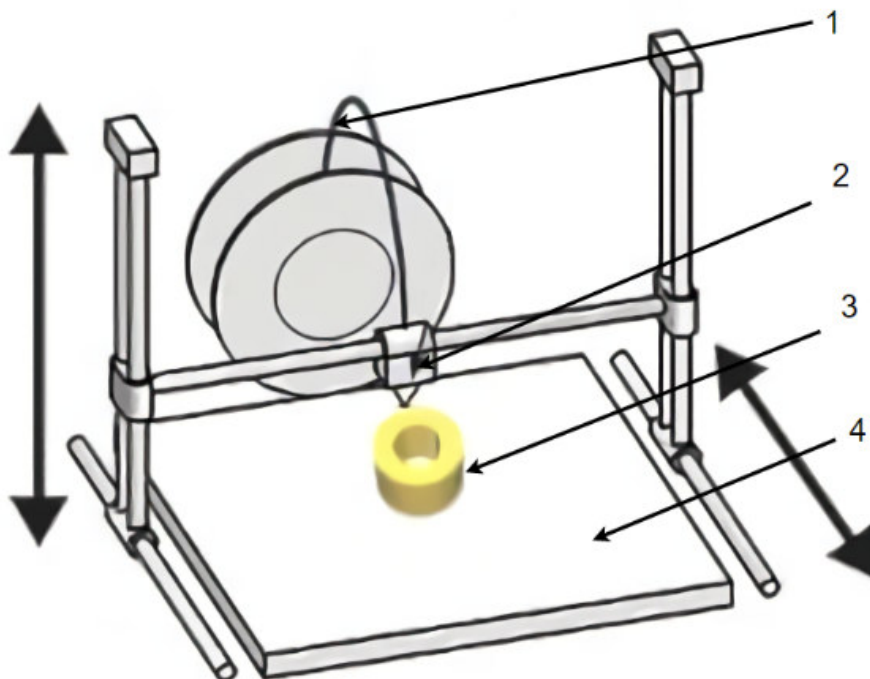


Рис. 1. Схема 3D-принтера Anycubic Mega S: 1 – металлополимерная нить; 2 – сопло и нагревательный элемент; 3 – печатаемая втулка; 4 – платформа для печати

Fig. 1. Diagram of Anycubic MegaS 3D printer: 1 – metal polymer filament; 2 – nozzle and heating element; 3 – printable sleeve; 4 – printing platform

В процессе использования филамента BronzeFill было обнаружено, что он содержит большое количество твердых частиц бронзы, которые приводят к повышенному износу сопла, изготовленного из латуни. Чтобы решить эту проблему, было принято решение заменить сопло на стальное с большим диаметром выходного отверстия.

Эскиз нового сопла представлен на рисунке 2. Предложенное сопло имеет более широкое выходное отверстие, что позволяет более эффективно экструдировать материал. Кроме того, оно выполнено из более прочного материала – стали, что позволяет снизить износ и увеличить срок службы сопла.

Важно отметить, что замена сопла может потребовать дополнительной калибровки 3D-принтера, т. к. новое сопло имеет другие характеристики. Для обеспечения точного позиционирования печатающей головки на 3D-принтере было изменено положение датчика и позиция его ответной части. Кроме того, модернизировали фиксирующую пружину, предназначенную для удержания головки в нужной позиции. Все эти изменения позволили точнее определять «домашнее» положение печатающей головки и, следовательно, повысить точность и качество печати деталей.

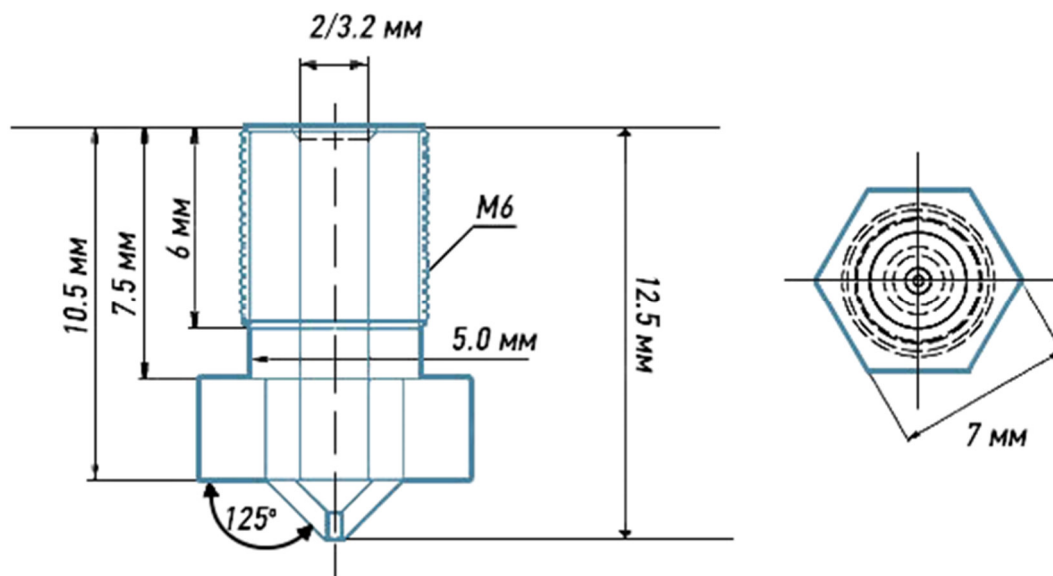


Рис. 2. Эскиз сопла для принтера

Fig. 2. Sketch of the nozzle for the printer

Для выращивания модели использовали керамическую плиту, предназначенную для исключения температурной деформации комплектной платформы 3D-принтера. Это позволяет улучшить точность и качество печати, т. к. платформа не деформируется при изменении температуры. Кроме того, керамическая плита обладает высокой прочностью и долговечностью, что позволяет использовать ее на протяжении длительного времени без необходимости замены.

Таким образом, изменения в механизме определения «домашнего» положения печатающей головки и использование керамической плиты для печати деталей на 3D-принтере позволяют улучшить точность и качество печати, что является важным фактором для производства деталей типа «втулка».

Для обеспечения возможности выжигания полимера во время печати металлических изделий модернизировали управляющую программу для движения печатающей головки. Это позволило отводить головку в сторону и останавливать ее в нужном месте для выжигания скрепляющего полимера между слоями. После

нанесения каждого слоя, печатающая головка перемещалась в сторону, чтобы обеспечить возможность выжигания полимера. Печать останавливалась на две минуты, чтобы позволить полностью удалить полимер.

Выжигание связующего полимера происходило пламенем газовой горелки при температуре горения полимера (~400°C). Затем оставшийся слой бронзы нагревался до температуры 900°C пламенем той же горелки. Это позволяло соединять частицы бронзы между собой и создавать цельный слой материала. После этого на полученный слой бронзы наносили новый слой металлополимера. Операции выжигания полимера и получения слоя бронзы повторялись.

Такой процесс печати металлических изделий позволяет получить методом послойной FFF 3D-печати различные детали с низкой стоимостью и достаточными характеристиками прочности. Однако он требует специального оборудования и опыта для правильного выжигания полимера и получения качественного металлического слоя.

Для изучения структуры материала, полученного 3D-печатью, были проведены металлографические исследования по стандартной методике [2]. Образцы травили в 10%-ном растворе азотной кислоты в спирте. Этот процесс позволяет удалить поверхностный слой материала и выявить его внутреннюю структуру.

Химический состав образцов определяли с помощью спектрометра Niton Xl3t GOLDD. Микроструктуру материала изучали с помощью микроскопа Olympus GX53 при различных увеличениях. Шероховатость поверхности детали изучали с помощью профилометра Time Group TR300.

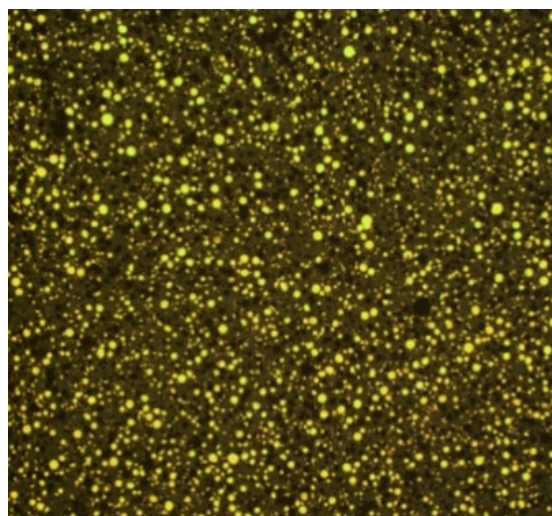
Таким образом, проведенные металлографические исследования, изучение химического состава и микроструктуры материала, а также измерение шероховатости поверхности детали позволяют оценить качество и свойства материала, полученного 3D-печатью из металлополимер-

ного материала с последующим выжиганием связующего полимера.

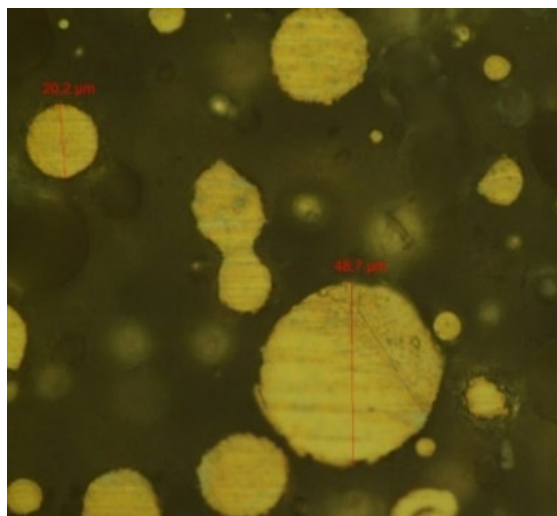
Результаты и их обсуждение

В результате экспериментов показана возможность удаления связующего полимера из детали в процессе её печати. Это позволяет получать металлические изделия с более высокой точностью и качеством. При этом установлено, что после выжигания каждого слоя имеет место их усадка, равная 20%. Эта усадка соответствует характеристикам производителя материала [3–5] и должна учитываться при разработке модели.

На рисунке 3 представлена микроструктура филамента BronzeFill. Видно, что филамент BronzeFill состоит из частиц бронзового порошка в матрице из полимера. Размер частиц порошка бронзы находится в пределах от 3,3 до 48,7 мкм, а среднее значение составляет 20,2 мкм.



а



б

Рис. 3. Микроструктура филамента Bronze Fill: а – х50; б – х1000

Fig. 3. Microstructure of the Bronze Fill filament: а – х50; б – х1000

В целом, результаты проведенных экспериментов позволяют модифицировать процесс FFF 3D-печати для создания металлических изделий и повысить их точность и качество [6–10]. Важно учиты-

вать усадку при разработке модели и использовать качественный материал, такой как Bronze Fill, для достижения наилучших результатов.

На рисунке 4 представлены заводская и полученная на 3D-принтере втулки. Заводская втулка экскаватора Cat-434 является биметаллической и состоит из слоя

бронзы и стали толщиной 0,4 мм и 2,4 мм соответственно, в то время как втулка, изготовленная методом 3D-печати, состоит из бронзы полностью.



а



б

Рис. 4. Внешний вид бронзовой втулки, полученной: а – 3D-печатью; б – заводским способом

Fig. 4. The appearance of the bronze sleeve obtained by: а – 3D printing; б – factory method

В таблице 1 представлен химический состав бронзы, входящей в заводскую втулку, химический состав бронзы, полу-

ченной 3D-печатью послойной наплавкой материала BronzeFill, а также химический состав бронзы БрОФ10-1.

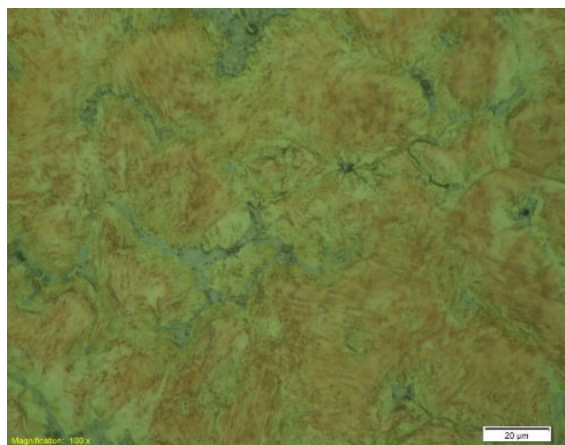
Таблица 1. Химический состав проверенных образцов

Table 1. Chemical composition of the tested samples

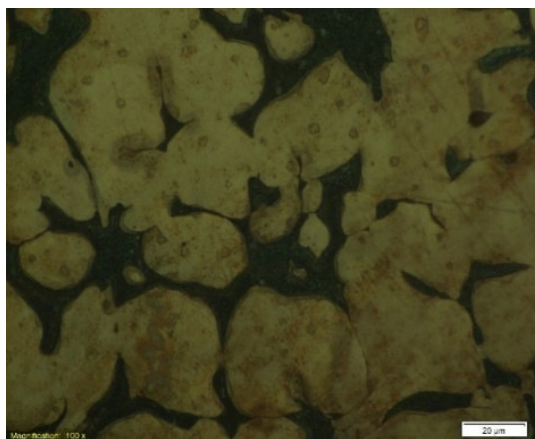
Материал	Cu, %	Sn, %	Zn, %	Pb, %	Fe, %	Ni, %
Bronze Fill	90,892	8,962	0,04	–	0,025	–
Бронза заводской втулки	86,308	0,538	0,046	12,72	0,173	0,164
БрОФ10-1	87–91	9–11	–	–	–	–

Анализ химического состава показал, что бронза, полученная способом 3D-печати, отличается от бронзы, используемой при изготовлении заводской втулки, на 4% по содержанию меди. Тем не менее химический состав бронзы, полученной 3D-печатью, аналогичен химическому составу бронзы БрОФ10-1, которая широко применяется для создания подшипников, втулок, шестерней в машиностроении. Это свидетельствует о высоком качестве и пригодности бронзы, полученной методом 3D-печати, для изготовления металлических изделий, в том числе втулок.

На рисунке 5 представлена микроструктура бронзы заводской втулки экскаватора Cat-434 и бронзовой втулки, полученной 3D-печатью методом послойной наплавки материала BronzeFill после удаления связующего полимера. Видно, что структура напечатанной на 3D-принтере бронзы (рис. 5, а) имеет более мелкозернистую структуру по сравнению с бронзой заводской втулки (рис. 5, б). Также стоит отметить, что микроструктура бронзы, полученной 3D-печатью, не имеет дефектов, таких как трещины или поры, что свидетельствует о ее высоком качестве.



а



б

Рис. 5. Микроструктура бронзовой втулки, полученной (x1000): а – 3D-печатью; б – заводским способом

Fig. 5. Microstructure of the bronze sleeve obtained (x 1000): а – 3D printing; б – factory method

На рисунке 6 представлены профилограммы поверхности напечатанной втулки. Видно, что волнистость поверхности находится в пределах 60 мкм, при этом впадины и высоты составляют от –30 до

30 мкм соответственно. Среднее значение шероховатости поверхности детали, полученной после 3D-печати, составило 10,9 мкм.

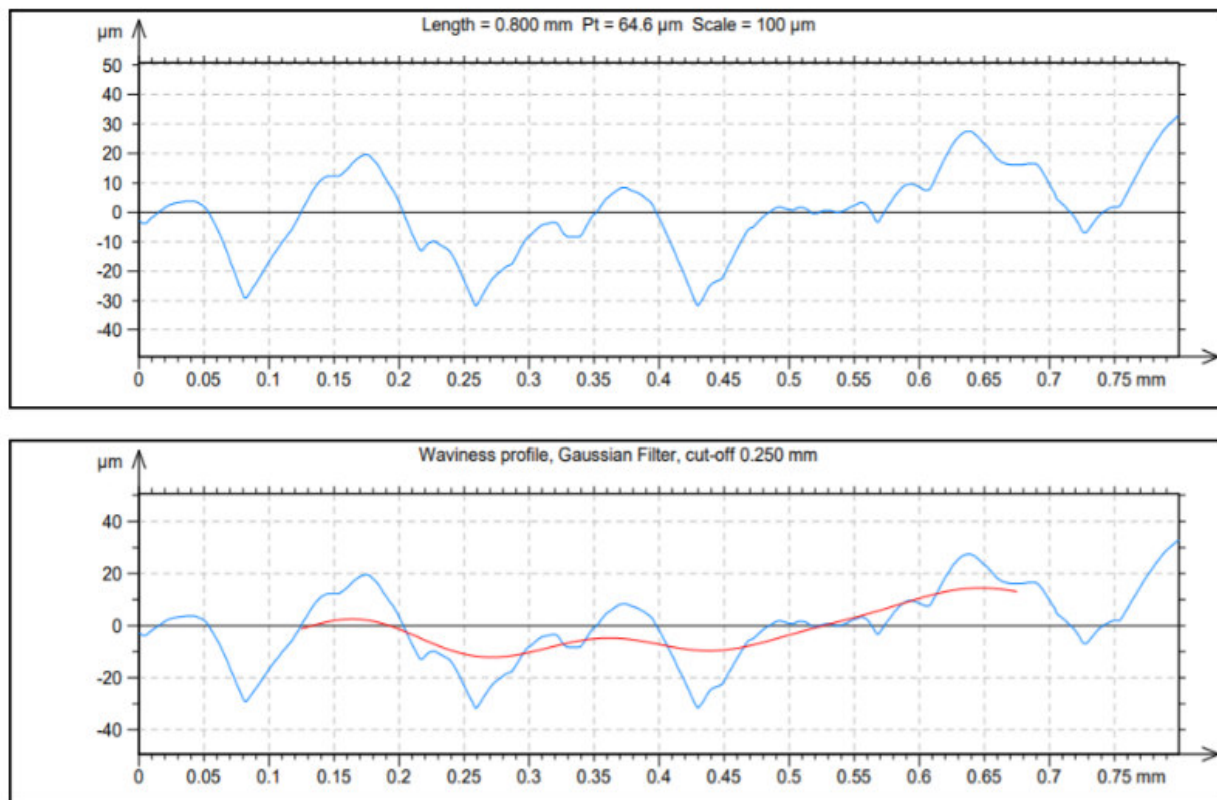
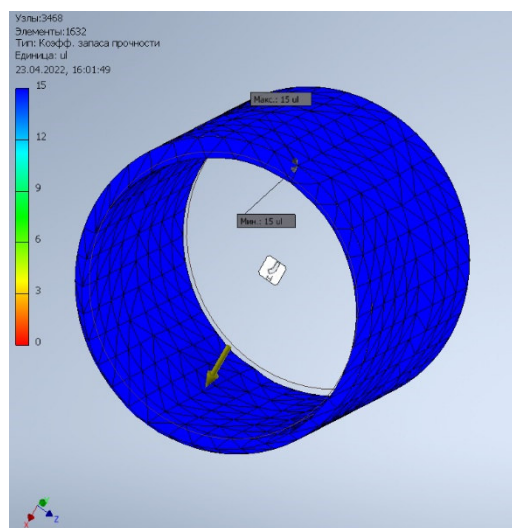


Рис. 6. Профилограмма поверхности напечатанной детали

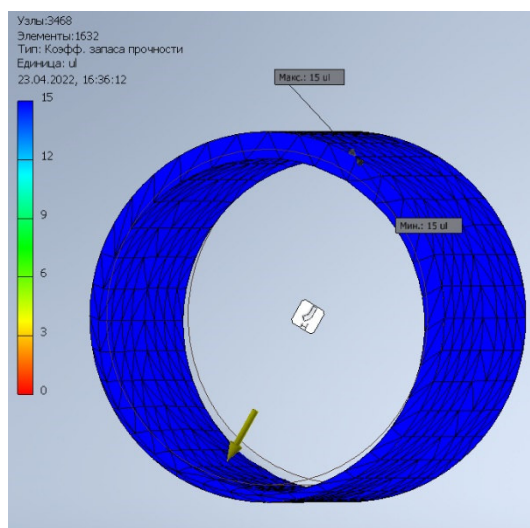
Fig. 6. Profilogram of the surface of the printed part

Компьютерное моделирование прочностных характеристик втулок из заводского материала и материала, полученного методом 3D-печати после удаления полимера, проводили в программном комплексе Autodesk Inventor с использова-

нием модуля МКЭ Autodesk Nastran. Было установлено, что на стенки втулок действует нагрузка от веса приводного вала экскаватора массой 17 кг. Расчет был проведен для обоих материалов.



а



б

Рис. 7. Результаты расчета втулок на прочность: а – заводской материал; б – полученный в результате 3D-печати после выжигания полимера

Fig. 7. Results of calculation of bushings for strength: а – factory material; б – obtained as a result of 3D printing after polymer burning

На изображениях, представленных в результате расчета, можно увидеть значения прочности и коэффициента запаса прочности для обоих материалов. Исследования показали, что втулка, изготовленная методом 3D-печати, имеет прочностные характеристики, аналогичные заводской втулке, что говорит о высоком качестве и прочности напечатанной детали. Таким образом, результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о пригодности материала, полученного методом 3D-печати, для изготовления втулок.

Представленные в работе результаты будут способствовать ресурсосбережению и импортозамещению при разработке новых порошковых материалов и изделий из них [11–20].

Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что втулка, изготовленная методом 3D-печати, способна выдерживать массу полуоси с высоким запасом прочности. Бронза, полученная таким способом, может выполнять антифрикционную функцию при работе в условиях трения.

Развитие подобной технологии позволяет значительно удешевить производство металлических изделий на 3D-принтерах, используя метод послойной наплавки металлополимера. Это особенно актуально для создания прототипов и малых серий изделий, т. к. это позволяет сократить затраты на производство и ускорить процесс разработки.

Важно отметить, что существует возможность снижения себестоимости исходного материала для изделий, изготовленных методом 3D-печати послойной наплавкой металлопластиковой проволоки путем использования в качестве наполнителя порошка, полученного из отходов промышленного производства. Это позволяет использовать экологически чистые материалы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, использование метода 3D-печати для изготовления метал-

лических изделий имеет большой потенциал для промышленности и научных исследований. Это позволяет создавать высококачественные, прочные и точные изделия со снижением затрат на производство. Использование метода 3D-печати для изготовления металлических изделий, таких как втулки, позволяет получать изделия с высокой точностью и качеством. Бронза, полученная 3D-печатью, имеет аналогичный химический состав и высокую прочность, что делает ее пригодной для использования в машиностроении.

Список литературы

1. Латыпов Р. А., Стрижеус В. А. Изготовление детали типа «втулка» методом 3D-печати послойной наплавкой металлопластиковой проволоки с бронзовым наполнителем // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции / редколл.: М. С. Разумов (отв. ред.). Курск: Университетская книга, 2022. С. 232–236.
2. Практическое руководство по металлографии судостроительных материалов / А. И. Балусев, Л. А. Бозина, Г. И. Николаев [и др.] // под ред. чл.-кор. АН СССР И. В. Горынина. Л.: Судостроение, 1982. 136 с.
3. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Получение и исследование композиционных медных гальванических покрытий, модифицированных медными электроэрозионными порошками микро- и нанодисперсий: монография. Курск: Университетская книга, 2016. 131 с.
4. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Н. М. Хорьякова // Электрометаллургия. 2017. № 4. С. 36–39.
5. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий / Н. М. Хорьякова, Е. В. Агеев, Е. В. Агеева // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 18–20.
6. Электроэрозионные порошки микро- и нанометрических фракций для производства твердых сплавов / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеева, О. В. Кругляков, Г. Р. Латыпова // Электрометаллургия. 2016. № 1. С. 16–20.
7. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Карпенко В. Ю. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 14–17.
8. Получение и исследование порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов электроэрозионным диспергированием: монография / Е. В. Агеев, Р. А. Латыпов, Е. В. Агеева, А. А. Давыдов. Курск: ИП Горохов А. А., 2013. 200 с.
9. Агеева Е. В., Хорьякова Н. М., Агеев Е. В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 66–68.
10. Агеева Е. В., Хардилов С. В., Агеева А. Е. Структура и свойства спеченных образцов из электроэрозионных хромсодержащих порошков, полученных в бутиловом спирте // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 4–11.
11. Хардилов С. В., Агеева Е. В., Агеева А. Е. Анализ характеристик износостойкости спеченных изделий из электроэрозионного порошка стали X13, полученного в бутиловом спирте // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 58–64.
12. Латыпов Р. А., Агеев Е. В., Агеева Е. В., Хорьякова Н. М. Сравнительный рентгеноспектральный микроанализ медного порошка, полученного электроэрозионным диспергированием, и медного порошка ПМС-1 // Электрометаллургия. 2017. № 4. С. 36–39.

13. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Е. П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19–22.
14. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е. В. Агеева, Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев, А. Ю. Алтухов, В. Ю. Карпенко // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 71–76.
15. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy / R. A. Latypov, G. R. Latypova, E. V. Ageev, A. Y. Altukhov, E. V. Ageeva // Russian Metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017, no. 12. P. 1083–1085.
16. Агеев Е. В., Поданов В. О., Агеева А. Е. Микроструктура и элементный состав порошков, полученных в условиях электроэрозионной металлургии отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде // Металлург. 2022. № 5. С. 72–77.
17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, А. С. Чернов, Г. С. Маслов, Е. И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85–90.
18. Разработка установки для получения порошков из токопроводящих материалов / Е. В. Агеев, Б. А. Семенихин, Р. А. Латыпов, Р. В. Бобрышев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 5-2. С. 234–237.
19. Агеев Е. В., Семенихин Б. А., Латыпов Р. А. Исследование влияния электрических параметров установки на процесс порошкообразования при электроэрозионном диспергировании отходов твердого сплава // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 5-2. С. 238–240.
20. Физико-механический подход к анализу процессов вытяжки с утонением цилиндрических изделий с прогнозированием деформационной повреждаемости материала / Г. М. Журавлев, Н. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, Е. В. Агеева, Д. В. Малий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 4 (67). С. 39–56.

References

1. Latypov R. A., Strizheus V. A. Izgotovlenie detali tipa "vtulka" metodom 3D-pechati posloinoi naplavkoi metallopla-stikovo provoloki s bronzovym napolnitelem [Production of a "sleeve" type part by 3d printing by layer-by-layer welding of metal-plastic wire with bronze filler]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern tool systems, information technologies and innovations. Collection of scientific papers of the XVII International Scientific and Practical Conference]; ed. by M. S. Razumov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2022, pp. 232–236.
2. Baluyev A. I., Bozina L. A., Nikolaev G. I., etc. Prakticheskoe rukovodstvo po metallografii sudostroitel'nykh materialov [Practical guide to metallography of shipbuilding materials]; ed. by I. V. Gorynin. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 136 p.
3. Ageeva E. V., Horyakova N. M., Ageev E. V. Poluchenie i issledovanie kompozitsionnykh mednykh gal'vanicheskikh pokrytii, modifitsirovannykh mednymi elektroerozionnymi poroshkami mikro- i nanofraktsii [Preparation and study of composite copper electroplating coatings modified with copper electroerosion powders of micro- and nanofractions]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2016. 131 p.
4. Latypov R. A., Ageev E. V., Ageeva E. V., Horyakova N. M. Sravnitel'nyi rentgenospektral'nyi mikroanaliz mednogo poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem, i mednogo poroshka PMS-1 [Comparative X-ray spectral microanalysis of copper powder obtained by electroerosive dispersion and PMS-1 copper powder]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2017, no. 4, pp. 36–39.
5. Horyakova N. M., Ageev E. V., Ageeva E. V. Elektroerozionnye mednye poroshki dlya gal'vanicheskikh pokrytii [Electroerosive copper powders for electroplating coatings]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2014, no. 4 (112), pp. 18–20.
6. Latypov R. A., Ageeva E. V., Kruglyakov O. V., Latypova G. R. Elektroerozionnye poroshki mikro- i nanometricheskikh fraktsii dlya proizvodstva tverdykh splavov [Electroerosive powders of micro- and

nanometric fractions for the production of hard alloys]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2016, no. 1, pp. 16–20.

7. Ageeva E. V., Ageev E. V., Karpenko V. Yu. Izuchenie formy i elementnogo sostava poroshka, poluchennogo iz vol'framsoderzhashchikh otkhodov instrumental'nykh materialov elektroerozionnym dispergirovaniem v vodnoi srede [Study of the form and elemental composition of powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosive dispersion in an aqueous medium]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*, 2014, no. 4 (112), pp. 14–17.

8. Ageev E. V., Latypov R. A., Ageeva E. V., Davydov A. A. Poluchenie i issledovanie poroshkov iz otkhodov vol'framsoderzhashchikh tverdykh splavov elektroerozionnym dispergirovaniem [Preparation and research of powders from waste of tungsten-containing hard alloys by electroerosive dispersion]. Kursk, IP Gorokhov A. A. Publ., 2013. 200 p.

9. Ageeva E. V., Horyakova N. M., Ageev E. V. Morfologiya i elementnyi sostav mednykh elektroerozionnykh poroshkov, prigodnykh k spekaniyu [Morphology and elemental composition of copper electroerosive powders suitable for sintering]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of mechanical engineering*, 2014, no. 10, pp. 66–68.

10. Ageeva E. V., Hardikov S. V., Ageeva A. E. Struktura i svoystva spechennykh obraztsov iz elektroerozionnykh khromsoderzhashchikh poroshkov, poluchennykh v butilovom spirte [Structure and properties of sintered samples from electroerosive chromium-containing powders obtained in butyl alcohol]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, techniques and technologies*, 2021, no. 6 (39), pp. 4–11.

11. Hardikov S. V., Ageeva E. V., Ageeva A. E. Analiz kharakteristik iznosostoikosti spechennykh izdelii iz elektroerozionnogo poroshka stali Kh13, poluchennogo v butilovom spirte [Analysis of wear resistance characteristics of sintered products made of electroerosion powder of steel X13 obtained in butyl alcohol]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2021, no. 6 (39), pp. 58–64.

12. Latypov R. A., Ageev E. V., Ageeva E. V., Horyakova N. M. Sravnitel'nyi rentgenospektral'nyi mikroanaliz mednogo poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem, i mednogo poroshka PMS-1 [Comparative X-ray spectral microanalysis of copper powder obtained by electroerosive dispersion and copper powder PMS-1]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2017, no. 4, pp. 36–39.

13. Latypov R. A., Ageev E. V., Ageeva E. V., Novikov E. P. Issledovanie alyuminievogo poroshka, poluchennogo metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya v distillirovannoi vode [Investigation of aluminum powder obtained by electroerosive dispersion in distilled water]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference*, 2016, no. 4, pp. 19–22.

14. Ageeva E. V., Latypov R. A., Ageev E. V., Altukhov A. Yu., Karpenko V. Yu. Otsenka iznosostoikosti elektroiskrovykh pokrytii, poluchennykh s ispol'zovaniem elektroerozionnykh poroshkov bystrorezhushchei stali [Assessment of the wear resistance of electric spark coatings obtained using high-speed steel electroerosion powders]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Proceedings of Higher Educational Institutions. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2015, no. 1, pp. 71–76.

15. Latypov R. A., Latypova G. R., Ageev E. V., Altukhov A. Y., Ageeva E. V. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017, vol. 2017, no. 12, pp. 1083–1085.

16. Ageev E. V., Podanov V. O., Ageeva A. E. Mikrostruktura i elementnyi sostav poroshkov, poluchennykh v usloviyakh elektroerozionnoi metallurgii otkhodov zharoprochnogo nikel'evogo splava ZhS6U v vode [Microstructure and elemental composition of powders obtained under conditions of electroerosive metallurgy of waste heat-resistant nickel alloy ZhS6U in water]. *Metallurg = Metallurgist*, 2022, no. 5, pp. 72–77.

17. Ageev E. V., Ageeva E. V., Chernov A. S., Maslov G. S., Parshina E. I. Opredelenie osnovnykh zakonornostei protsessa polucheniya poroshkov metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya [Determination of the basic laws of the process of obtaining powders by the method of electroerosive dispersion]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 1 (46), pp. 85–90.

18. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Latypov R. A., Bobryshev R. V. Razrabotka ustanovki dlya polucheniya poroshkov iz tokoprovodyashchikh materialov [Development of an installation for obtaining powders from conductive materials]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 5-2, pp. 234–237.

19. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Latypov R. A. Issledovanie vliyaniya elektricheskikh parametrov ustanovki na protsess poroshkoobrazovaniya pri elektroerozionnom dispergirovanii otkhodov tverdogo splava [Investigation of the influence of electrical parameters of the installation on the process of powder formation during electroerosive dispersion of solid alloy waste]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 5-2, pp. 238–240.

20. Zhuravlev G. M., Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Ageeva E. V., Maliy D. V. Fiziko-mekhanicheskii podkhod k analizu protsessov vytyazhki s utoneniem tsilindricheskikh izdelii s prognozirovaniem deformatsionnoi povrezhdaemosti materiala [Physico-mechanical approach to the analysis of drawing processes with thinning of cylindrical products with the prediction of deformation damage of the material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 4 (67), pp. 39–56.

Информация об авторах / Information about the Authors

Латыпов Рашит Абдулхакович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: latipov46@mail.ru, ORCID 0000-0002-9988-2765

Rashit A. Latypov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: latipov46@mail.ru, ORCID 0000-0002-9988-2765

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624

Evgeny V. Ageev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624

Стрижеус Валерий Александрович, студент кафедры технологии оборудования и сварочного производства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: valery.strizheus@gmail.com

Valery A. Strizheus, Student of the Department of Equipment Technology and Welding Production, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: valery.strizheus@gmail.com

Бугеррума Кахина, студент кафедры технологии оборудования и сварочного производства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kahina503@gmail.com

Kahina Bugerruma, Student of the Department of Equipment Technology and Welding Production, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: kahina503@gmail.com