

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-4-10



УДК 621.923.02: 621.763

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**РАЗРАБОТКА  
ФОТОПОЛИМЕР-АБРАЗИВНОГО  
КОМПОЗИТА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ  
ИНСТРУМЕНТА**

✉<sup>1</sup>**Голобурдин Дмитрий Алексеевич**, аспирант, кафедра технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета, РФ  
e-mail: [dimagoloburdin@yandex.ru](mailto:dimagoloburdin@yandex.ru)

**Козлов Александр Михайлович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета, РФ

**Козлов Андрей Александрович**, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета, РФ

**Аннотация.**

В статье представлены разработанные композитные составы на основе фотополимерной смолы, содержащей абразивные частицы карбида кремния SiC, для 3D-печати инструмента. Исследованы разработанные фотополимер-абразивные составы, выявлена и показана зависимость вязкости составов от концентрации в них абразивных зёрен. На основе разработанного композитного состава изготовлены образцы, представлена и исследована их структура. Приведены рекомендации по использованию и возможностям применения разработанного композита.

**Ключевые слова:** КОМПОЗИТ, АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, 3D-ПЕЧАТЬ.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

**DEVELOPMENT OF A  
PHOTOPOLYMER-ABRASIVE  
COMPOSITE FOR 3D  
PRINTING TOOLS**

✉<sup>1</sup>**Goloburdin Dmitriy Alekseevich**, postgraduate student, department of machine-building technology of Lipetsk State Technical University, RF  
e-mail: [dimagoloburdin@yandex.ru](mailto:dimagoloburdin@yandex.ru)

**Kozlov Alexander Mikhailovich**, doctor of technical sciences, professor, head of the department of technology of mechanical engineering of Lipetsk State Technical University, RF

**Kozlov Andrey Aleksandrovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of machine-building technology of Lipetsk State Technical University, RF

**Annotation.**

The article presents the developed composite compounds based on a photopolymer resin containing abrasive fractions of silicon carbide SiC for 3D printing of the tool. The developed photopolymer-abrasive compositions are investigated, the dependence of the viscosity of the compositions on the concentration of abrasive grains in them is revealed and shown. Based on the developed composite compounds, samples were made, their structure was presented and studied. Recommendations on the use and application possibilities of the developed composite are given.

**Keywords:** COMPOSITE, ABRASIVE TOOLS, ADDITIVE TECHNOLOGIES, 3D PRINTING.

**1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Постоянное повышение требований к быстроходности, производительности и качеству машин неразрывно связано с разработкой новых материалов. Разрабатываются новые сплавы металлов, сочетающие в себе различные свойства, новые композитные материалы, применяемые в различных отраслях – от машиностроительной до авиакосмической и медицинской.

Для обработки новых материалов развивается, и инструментальное производство – появляются новые твёрдые сплавы, позволяющие производить высокоскоростную обработку, различные композиты для обработки труднообрабатываемых материалов. Однако, подобное развитие, по большей части, наблюдается в сфере лезвийной обработки, в то время как исследований абразивной обработке металлов значительно меньше. В большинстве случаев для обработки металлов на шлифовальных станках применяется абразивный инструмент, изготовленный традиционно из электрокорунда  $Al_2O_3$ , либо же карбида кремния  $SiC$  и связки – кремниевой, бакелитовой, либо иной, в зависимости от назначения инструмента.

На машиностроительных предприятиях имеется подавляющее большинство подобного абразивного инструмента, поскольку технология изготовления такого инструмента известна и отлажена [1]. Однако, его промышленное производство экономически целесообразно только при заказе партии от десятков до сотен штук. Быстрая смена объектов производства требует настолько же быстрой смены инструмента, причем его характеристики должны соответствовать новому обрабатываемому материалу. Рекомендуемых режимов обработки для новых конструкционных материалов в литературе, как правило, нет.

В этой связи актуальным становится исследование новых методов изготовления абразивного инструмента, например, с помощью аддитивных технологий [2, 3], позволяющих оперативно получать инструмент с необходимыми характеристиками.

## 2 Материалы и методы

Структура выпускаемых заводских образцов абразивного инструмента представлена на рисунках 1-3. Фотографии получены с помощью электронного микроскопа модели G600. На рисунках чётко видна внутренняя структура инструмента, состоящая из абразивных зёрен, имеющих острые режущие кромки, связующего материала, а также пор – пустот между абразивными зёрнами.



Рисунок 1 – Структура шлифовального круга из карбида кремния на керамической связке



Рисунок 2 – Структура шлифовальной головки из электрокорунда белого на керамической связке

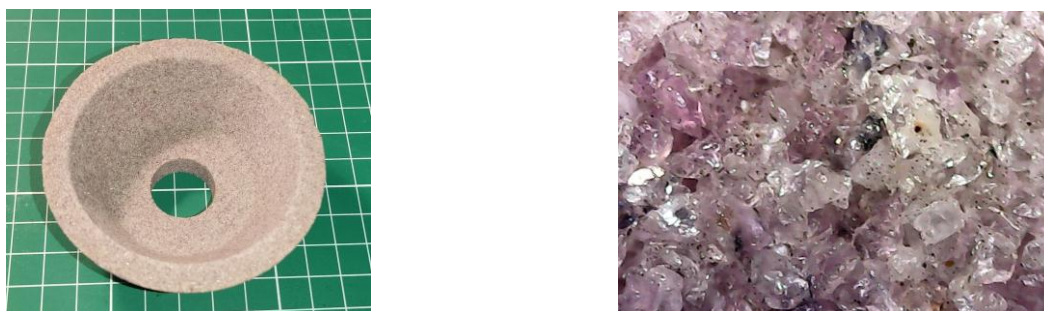
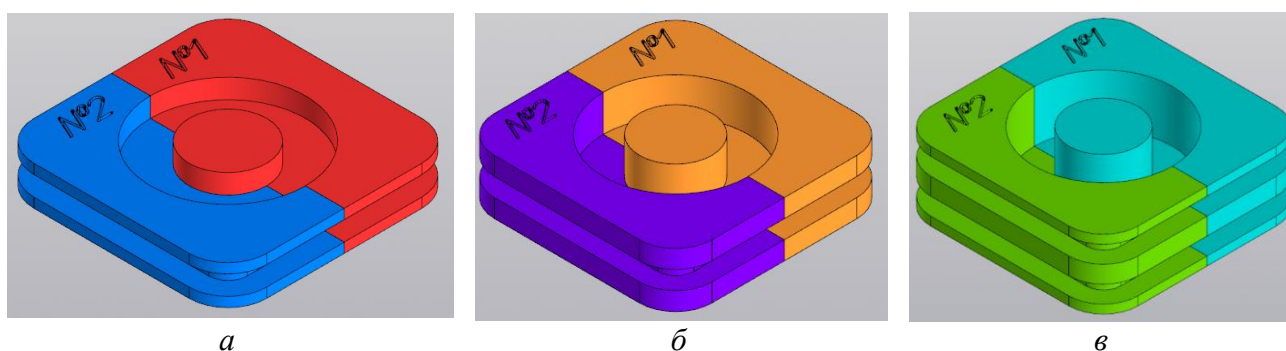


Рисунок 3 – Структура шлифовального круга из электрокорунда хромистого на керамической связке

Для исследования внутренней структуры композита, разрабатываемого для 3D-печати абразивного инструмента, были спроектированы (рис. 4), а затем изготовлены (рис. 5) наборы матриц. Матрицы представляют собой две отдельные полуформы, необходимые для последующего извлечения исследуемых образцов. Характеристики матриц представлены в таблице 1. Изготовление матриц производилось с помощью 3D-печати на принтере Creality CR-200B с областью печати  $200 \times 200 \times 200$  мм (рис. 6), Материалом служил PET-G пластик, диаметр прутка 1,75 мм. Данный материал сочетает в себе совокупность физико-механических свойств, необходимых для изготовления матриц, износостойкость, прочность, малую усадку при печати и т.д. Во избежание появления дефектов печати, вызванных гигроскопичностью филамента, проводилась дополнительная сушка прутка в специальном приспособлении Sovol 3D Filament Dryer (рис. 6) при  $50^{\circ}\text{C}$  в течение 6 часов. Для исследований был принят круг типа 1 – прямого профиля по ГОСТ Р 52781-2007.



*a* – матрица № 1; *б* – матрица № 2; *в* – матрица № 3

Рисунок 4 – 3D модели матриц



Рисунок 5 – Напечатанные матрицы

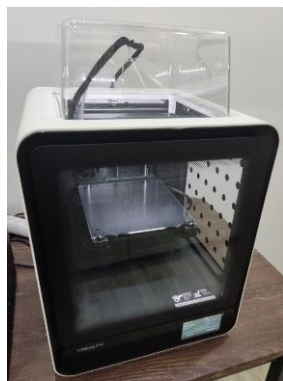


Рисунок 6 – 3D принтер Creality CR-200B (слева) и приспособление для сушки филамента Sovol 3D Filament Dryer

Таблица 1 – Характеристики матриц

Наименование параметра	Матрица		
	№ 1	№ 2	№ 3
1 Наибольший диаметр формообразующей поверхности матрицы, $D$ , мм	40	40	40
2 Диаметр внутреннего отверстия формообразующей поверхности матрицы, $d$ , мм	20	20	20
3 Высота формообразующей поверхности матрицы, $h$ , мм	5	10	15
4 Габариты матрицы, $L \times B \times H$ , мм	60 × 60 × 10	60 × 60 × 15	60 × 60 × 20
5 Масса матриц, $m$ , кг	0,025	0,034	0,041

### 3 Результаты исследований

Задачей исследований являлось определение влияния концентрации абразивного материала на вязкость итогового композитного состава. В качестве фотополимера выбрана смола производителя Anycubic, модель UV TOUGH RESIN Clear с длиной волны засветки 365-405 нм. В качестве абразивного материала использован карбид кремния 64С, зернистостью F120, что соответствует номеру 10 по ГОСТ 3647-80 (125-100 мкм). Экспериментальный расчёт вязкости композитного состава проводился с помощью метода Стокса [4].

Выражение для расчёта вязкости композита при падении шара радиусом  $r$  в трубе радиусом  $R_0$  и высотой  $h$  имеет вид:

$$\mu = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_0)}{9u \left(1 + 2,1 \frac{r}{R_0}\right) \left(1 + 1,33 \frac{r}{h}\right)}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус шара, мм (применялся шарик подшипника диаметром 4 мм по ГОСТ 3722-2014);  $\rho$  – плотность материала шара, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – плотность композита, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup> (принимается равным 9,78 м/с<sup>2</sup>);  $u$  – скорость равномерного движения шара, м/с.

Данные для расчётов представлены в таблице 2.

Были исследованы фотополимер-абразивные композитные составы, которые могут быть применены в качестве материала для аддитивного изготовления абразивного инструмента. Изменение вязкости полученных составов представлено на рисунке 7.

На основе полученных экспериментальных композитных составов изготовлены образцы, структура которых представлена на рисунках 8, 9. В отличие от инструмента заводского исполнения в структуре полученных образцов отсутствуют поры. Однако пористость

Таблица – 2 Данные для расчёта вязкости композита

Параметр	Значение
1 Радиус шара $r$ , мм	2
2 Радиус трубы $R_0$ , мм	10
3 Высота трубы $h$ , мм	50
4 Плотность материала шара $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7870
5 Плотность композита $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> при концентрации абразива	
30 %	1448
40 %	1559
50 %	1671
60 %	1782
70 %	1894
80 %	2005
6 Скорость движения шара $u$ , м/с при концентрации абразива	0,08
30 %	
40 %	0,057
50 %	0,045
60 %	0,038
70 %	0,025
80 %	0,024

инструмента можно регулировать методом, описанным в работах [3, 5, 6] и в дальнейшем использовать подходы работы [7] к моделированию обработанной поверхности. Выражение, описывающее математическую модель инструмента, имеет вид:

$$f^\Sigma = f'^{+n} \vee f_{n+1} = f'^{+n} + f_{n+1} + |f'^{+n} - f_{n+1}|, \quad (2)$$

где  $f^\Sigma$  – общая функция поверхности единичного слоя абразивного инструмента;  $f'^{+n}$  – предшествующая операция дизъюнкции;  $f_{n+1}$  – текущая функция поры.

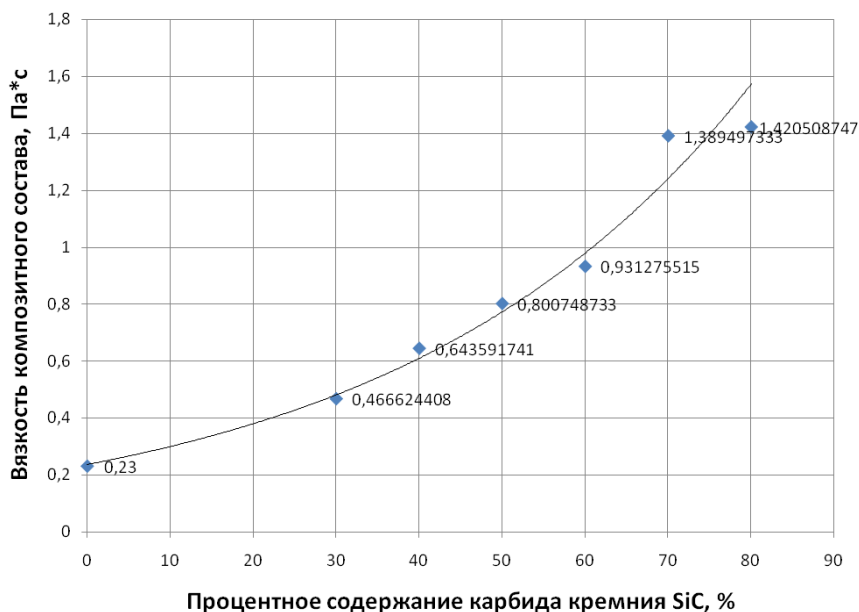


Рисунок 7 – Зависимость вязкости композитного состава от процентного содержания карбида кремния SiC



Рисунок 8 – Структура образцов с карбидом кремния SiC, полученных в матрицах



Рисунок 9 – Структура напечатанных образцов с карбида кремния SiC

При анализе полученных композитов на основе фотополимер-абразивной смеси следует отметить, что при 3D-печати инструмента SLA технологией, рекомендуется использовать составы с концентрацией абразива более 70 % от общего объёма, так как при отстаивании состава наблюдается выпадение частиц абразива в осадок, что сказывается на его распределении внутри печатаемого инструмента. При применении композитов с концентрацией абразива более 70 % этот эффект менее выражен. Применение составов с концентрацией абразива менее 70 % также возможно, но с применением иной технологии 3D-печати, например, при послойном нанесении состава на область формирования детали, с периодическим принудительным перемешиванием состава внутри бункера хранения.

#### 4 Обсуждение и заключение

Практическая значимость представленной работы заключается в разработке новых композитных составов на основе фотополимер-абразива, которые могут быть применены для изготовления абразивного инструмента методами 3D-печати, что расширяет известное [8-10] применение этих методов. Изготовленный из предложенного композита инструмент может быть использован, например, на операциях финишной обработки различных плоских, цилиндрических, как внешних, так и внутренних поверхностей. Могут быть изготовлены шлифовальные бруски со сложной геометрией рабочей поверхности, что позволит использовать такой инструмент в отделочных работах по полированию сложных формообразующих поверхностей, в частности, оснастки для литья пластмасс под давлением. Применение изготовленного 3D-печатью инструмента позволит снизить трудоёмкость выполнения подобных операций. Достоинством предложенного метода получения абразивного инструмента является экономическая целесообразность его изготовления в штучном количестве для исследования технологических возможностей с последующим запуском партии.

#### Список литературы

- 1 Ковальчук, Ю. М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного инструмента : учебное пособие для техникумов по специальности «Производство абразивного и алмазного инструмента» / Ю. М. Ковальчук, В. А. Букин, Б. А. Глаговский и др. ; Под общей редакцией Ю. М. Ковальчука – М. : Машиностроение, 1984. – 228 с.
- 2 Goloburdin D. A., Kozlov A. M., Ivanova T. N., Kozlov A. A. Research of abrasive tool manufacturing in single and small-scale production // Proceedings of the 8th International

Conference on Industrial Engineering (ICIE 2022 LNME). pp. 955-965. DOI : org 10.1007/978-3-031-14125-6\_93.

3 Голобурдин, Д. А. Моделирование единичного слоя абразивного инструмента для 3D-печати / Д. А. Голобурдин, А. М. Козлов, А. А. Козлов // *Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий. Сборник научных трудов Международного научного симпозиума технологов-машиностроителей.* – Дивноморское, 2022. С. 83-87.

4 Ерёмкина, Р. М. Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. Жидкости и твёрдые тела / сост. Р. М. Ерёмкина, А. И. Скворцова, А. А. Мутыгуллина и др. – Казань : Казан. Ун-т, 2015. – 42 с.

5 Рвачев, В. Л. Теория R-функций и некоторые её приложения / В. Л. Рвачев. – Киев : Наук. Думка, 1992. – 551с.

6 Амбросимов, С. К. Решение некоторых задач обработки резанием методами алгебры логики / С. К. Амбросимов, И. Ю. Поддубных // *Вестник ЛГТУ, № 2 (43).* 2020. С. 26-30

7 Козлов, А. М. Моделирование обработанной поверхности при шлифовании некруговым торцовым абразивным инструментом / А. М. Козлов, А. А. Козлов, Ю. В. Василенко // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»* – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 54-62.

8 Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш // *пособие для инженеров.* – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.

9 Зленко, М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Учебное пособие // Санкт-Петербург, СПбГУ, 2013 – 221 с.

10 Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. – СПб. : Университет ИТМО, 2015 – 63 с.

## References

1 Kovalchuk Yu. M. (1984) Fundamentals of design and manufacturing technology of abrasive tools : a textbook for technical schools in the specialty "Production of abrasive and diamond tools". Moscow.

2 Goloburdin D. A., Kozlov A. M., Ivanova T. N., Kozlov A. A. Research of abrasive tool manufacturing in single and small-scale production // *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2022 LNME).* pp. 955-965. DOI : org 10.1007/978-3-031-14125-6\_93.

3 Goloburdin D. A., Kozlov A. M., Kozlov A. A. (2022) Modeling of a single layer of an abrasive tool for 3D printing J. *Fundamental fundamentals of physics, chemistry and mechanics of high-tech technological systems for forming and assembling products. Collection of scientific papers of the International Scientific Symposium of Engineering Technologists.* p. 83-87.

4 Eremina R. M., Skvortsov A. I., Mutygullina A. A. (2015) Experimental problems of the general physical workshop on molecular physics and thermodynamics. Kazan.

5 Rvachev V. L. (1992) Theory of R-functions and some of its applications. Kyiv.

6 Abrosimov, S. K., some tasks machining methods of algebra of logic / S. K. Abrosimov, Poddubny, I. Yu. // *Bulletin of the LGTU, № 2 (43).* 2020. Pp. 26-30.

7 Kozlov A. M., Kozlov A. A., Vasilenko Y. V. (2016) Modeling a Cylindrical Surface Machined by a Non-Circular Face Tool. *J. Procedia Engineering* 1501081 – 1088. p. 54-62.

8 Zlenko M. A. (2015) Additive technologies in mechanical engineering. Moscow.

9 Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. (2013) Additive technologies in machine building. Study manual. Saint-Petersburg.

10 Valetov V. A. (2015) Additive technologies (current state and prospects). Study manual. Saint-Petersburg.

© Голобурдин Д.А., Козлов А.М., Козлов А.А., 2022