

Научная статья

УДК 621.7.011

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180660>

## 3D-ПЕЧАТЬ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВАКУУМ-ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ

Максим Сергеевич Шатов<sup>1</sup>, Любовь Александровна Бохоева<sup>2</sup>✉, Вадим Андреевич Титов<sup>3</sup>,  
Виталий Евдокимович Рогов<sup>4</sup>, Цырен Александрович Батуев<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 5</sup> Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,  
Улан-Удэ, респ. Бурятия, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова,  
Улан-Удэ, респ. Бурятия, Россия

<sup>4</sup> Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,  
Улан-Удэ, респ. Бурятия, Россия

<sup>1</sup> [maksim.shatov.97@mail.ru](mailto:maksim.shatov.97@mail.ru)

<sup>2</sup> [bohoeva@yandex.ru](mailto:bohoeva@yandex.ru) ✉

<sup>3</sup> [titov\\_vadim\\_wp@mail.ru](mailto:titov_vadim_wp@mail.ru)

<sup>4</sup> [vadya97@gmail.com](mailto:vadya97@gmail.com)

<sup>5</sup> [batuevc@mail.ru](mailto:batuevc@mail.ru)

**Аннотация.** При производстве авиационной техники требуется большое количество формообразующей оснастки, в том числе и для изделий остекления, поскольку они имеют сложные формы. Для изготовления металлической оснастки из сплавов алюминия необходима длительная механическая обработка на современных станках. Применение ЧПУ-станков требует значительных капиталовложений, что повышает конечную стоимость потребительского продукта. В современном машиностроении для изготовления формообразующей оснастки начали использовать аддитивные технологии. Применение 3D-печати (FDM) в изготовлении оснастки позволяет сократить затраты на оснастку в 8 раз, а время ее изготовления в 2,5–3 раза.

В статье представлена технология изготовления оснастки для вакуум-формования изделий авиационного остекления, полученной с помощью 3D-печати из ABS-пластика. Выбор ABS-пластика объясняется не только его высокими эксплуатационными свойствами, но и сравнительно низкой стоимости, а также высокой технологичностью. Для экономии ABS-пластика были напечатаны только рабочая область матрицы, каналы для выкачивания воздуха и выходы под крепления. Печать матрицы осуществляли на 3D-принтере ENDER 3, с высокой плотностью заполнения (до 100%).

Установлено, что для долговременной работы разработанной оснастки для изготовления формовок из органического стекла необходимы пластики, способные выдерживать высокие температуры эксплуатации.

**Ключевые слова:** оснастка, 3D-печать, ABS-пластик, аддитивные технологии, химическое полирование, вакуум-формование, формовка, изделия авиационного остекления

**Финансирование:** работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» ФГБОУ ВО ИРНИТУ «i.DIT», государственное задание Байкальского института природопользования СО РАН № 0273-2021-0007. Грант в форме субсидий РБ № 412 от 21.12.2023.

**Для цитирования:** Шатов М.С., Бохоева Л.А., Титов В.А., Рогов В.Е., Батуев Ц.А. 3D-печать формообразующей оснастки для вакуум-формования изделий авиационного остекления // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 174–182. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180660>

Original article

## 3D PRINTING OF SHAPING TOOLING FOR VACUUM MOLDING OF THE AIRCRAFT GLAZING PRODUCTS

**Maksim S. Shatov<sup>1</sup>, Lyubov' A. Bokhoeva<sup>2</sup>✉, Vadim A. Titov<sup>3</sup>, Vitalii E. Rogov<sup>4</sup>, Tsyren A. Batuev<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 5</sup> East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Buryatia, Russia<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>3</sup> Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, Ulan-Ude, Buryatia, Russia<sup>4</sup> Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Buryatia, Russia<sup>1</sup> maksim.shatov.97@mail.ru<sup>2</sup> bohoeva@yandex.ru ✉<sup>3</sup> titov\_vadim\_wp@mail.ru<sup>4</sup> vadya97@gmail.com<sup>5</sup> batuevc@mail.ru

### **Abstract**

The aviation equipment production requires a large amount of form-building equipment, the glazing products among them as well. Aircraft glazing requires materials that can be operated at temperatures from  $-62^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ . Aviation glazing products are made from various materials, thus, windshields and vents consist of four layers of silicate glass glued together with three layers of polymer film. This structure is able to withstand bird collisions at speeds above 570 km/h without depressurization. The side windows of the cabin are made of two glasses and an adhesive layer, while the lighting equipment protection on the wings, fuselage and tail is being ensured by the organic glass. Organic glass sheet blanks complex fashioning requires manufacturing of costly metal rigging from aluminum alloys, which are being subjected to long-term mechanical treatment on modern machine-tools. The CNC machines application requires significant capital expenditures, besides, fine milling of curved surfaces needs significant machine operating time to achieve a given roughness, which affects the final cost of the consumer product. Additive technologies are widely employed in modern mechanical engineering for the forming equipment manufacturing. The 3D printing difference from conventional methods of product processing consists in the fact that the part is created by the layer-by-layer building of its body with accurate reproduction of the shape, irrespective of its surfaces complexity. This technology is becoming nowadays a powerful means for the time reduction of technological preparation of production, manufacturing and quality improving of newly created products, including forming mandrels. It has been revealed that the FDM 3D printing technology application in the form-building equipment manufacturing can reduce the cost of equipment by eight times and the time for its production by 2.5–3 times.

Among the well-known 3D printing technologies, extrusion, i.e. fusing material in layers, is the most widely used method. Metal or plastic filaments flow from the cartridge into the extruder, where they are heated to a viscous-fluid state and extruded through a nozzle layer by layer onto the object being created. Thermoplastic materials are the most often used as consumables.

The article presents the technology for manufacturing technological equipment for vacuum forming of the aircraft glazing products, obtained by 3D printing from the ABS-plastic. The ABS-plastic was selected not only due to its high operation properties, but for its relatively low cost as well as high manufacturability. To save the ABS plastic, only the working area of the matrix, channels for air pumping out and outlets for fasteners were printed. The matrix was printed on an ENDER3 3D printer, with a high filling density (up to 100%) for the lowest shrinkage and strength of the matrix. After the 3D printing, the working surface of the matrix was processed (grinding, chemical polishing) to obtain the specified surface cleanliness (roughness). Organic glass with a thickness of 3 mm was molded at a temperature of  $95-105^{\circ}\text{C}$  (sensor on top of the glass), while the temperature on the matrix surface corresponded to  $87-93^{\circ}\text{C}$ . The first samples obtained on an ABS-plastic rig corresponded to all parameters. In the subsequent molds manufacturing, deviations in dimensional accuracy were observed, while the roughness of the working surface of the tooling did not change. Deformation of the forming tooling made from the ABS-plastic can be explained by

its operation under conditions of the maximum operating temperature for this material.

Thus, plastics with higher operating temperatures are needed for the long-term operation of the developed tooling for molds production from the organic glass.

The most prospective material for forming equipment for the aviation glazing products vacuum forming may be polycarbonate with the operating temperature of 1200°C and perfectly mechanically processable (grinding, polishing).

**Keywords:** tooling, 3D printing, ABS-plastic, additive technologies, chemical polishing, vacuum molding, molding, aircraft glazing products

**Funding:** the work was accomplished within the framework of the “Priority-2030” Program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research University “i.DIT”, State Assignment of the Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 0273-2021-0007, Grant RB No. 412 dated 21.12.2023.

**For citation:** Shatov M.S., Bokhоеva L.A., Titov V.A., Rogov V.E. 3D Printing of Shaping Tooling for Vacuum Molding of the Aircraft Glazing Products. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 174–182. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180660>

## Введение

Авиационное остекление является одним из важнейших элементов внешнего контура летательного аппарата, от которого зависит безопасность полета [1, 2]. В настоящее время лобовые стекла и форточки летательных аппаратов изготавливают из четырех слоев силикатного стекла, склеенных тремя слоями полимерной пленки. Такая конструкция выдерживает столкновение с птицей на скорости свыше 570 км/ч, не допуская разгерметизации. Боковые стекла кабины выполнены из двух стекол и склеивающего слоя, а защиту светового оборудования на крыльях, фюзеляже и хвостовом оперении обеспечивает либо органическое стекло, либо поликарбонат. Для изготовления сложнопрофильных габаритных изделий из листовых полимерных материалов, в том числе и из органического стекла, применяется технология вакуумного формования, превосходящая по своей эффективности технологию литья под давлением. Процесс формования изделий происходит за счет вакуума на соответствующей металлической оснастке.

В настоящее время формообразующая оснастка для получения изделий двойной и одинарной кривизны изготавливается на фрезерных станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Применение ЧПУ-станков требует значительных капиталовложений, кроме этого, для чистового фрезерования криволинейных поверхностей необходимо значительное время работы станка для достижения заданной шероховатости, что влияет на конечную стоимость потребительского продукта. Формирующая оснастка (формирующий инструмент) изготавливается чаще всего из дельта-древесины, алюминия, композиционных материалов из слоистых пластиков.

В мире активно разрабатываются технологии для производства деталей и формообразующих инструментов: матриц, форм-блоков, пуансонов — из пластика [3–9]. Применение методов 3D-печати позволяет заменить цельнометаллические изделия пластиковыми, которые, несмотря на то что уступают в механических характеристиках металлам, обладают достаточными прочностными свойствами и жесткостью для использования в процессах формования.

Отличие 3D-печати от традиционных методов обработки изделий заключается в том, что деталь создается послойным наращиванием тела детали при точном воспроизведении формы, независимо от сложности ее поверхностей. Данная технология сегодня становится мощным средством сокращения времени технологической подготовки производства, изготовления и повышения качества вновь создаваемых изделий [10], в том числе и формообразующих оправок [11, 12]. В работе [13] выявлено, что применение 3D-печати (FDM) в изготовлении формообразующей оснастки позволяет сократить затраты на оснастку в 8 раз и время на ее изготовление в 2,5–3 раза. Среди известных технологий 3D-печати наибольшее распространение получил метод экструзии FDM (Fused Deposition Modeling), которая создает трехмерные объекты последовательным нанесением слоев расплавленного пластика, повторяя при этом контуры цифровой модели. Металлические или пластиковые нити поступают из картриджа в экструдер, где нагреваются до вязкотекучего состояния и выдавливаются через сопло на создаваемый объект слой за слоем [2–5, 8, 12]. В качестве расходного материала наиболее часто используются термопластичные материалы (поликарбонат, нейлон, ABS-пластик) [13–17].

Работы по исследованию пластиковых оснасток многочисленны, среди них выделяются публикации [17, 18] о штамповочных инструментах для гибки, а также об оснастке для вакуум-формования [19, 20], изготовленных методом 3D-печати из пластика. В работе [17] показана возможность использования пластиковых штамповочных инструментов, полученных методом 3D-печати из пропилена, в заготовительно-штамповочном производстве, в частности для формоизменения тонкостенных листовых заготовок до 0,5 мм. В работе [19] представлена конструкция установки для горячего формования из органического стекла, в которой формообразующая матрица выполнена методом 3D-печати. В работе [19] не определены параметры нагрева полимерных деталей из ABS-пластика и не выбран материал матрицы, позволяющий длительно формовать детали из органического стекла.

Целью настоящей работы является определение параметров нагрева пластиковых элементов формообразующей оснастки, полученной методом 3D-печати из ABS-пластика, при изготовлении деталей из органического стекла по технологии вакуумного формования и выбор оптимального материала, подходящего для данного производства.

Рассмотрим возможность применения ABS-пластика в качестве материала для формообразующей оправки исходя из того, что он имеет высокие механические свойства и приемлемую цену. Несмотря на то что ABS-пластик сохраняет высокие эксплуатационные свойства в диапазоне температур от  $-40$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , температура тепловой деформации под нагрузкой 1,85 МПа ABS-пластика составляет  $90-100^{\circ}\text{C}$ . [20–23]. При технологии FDM шероховатость напечатанных деталей может достигать значения  $Ra = 12$  мкм, а при высокопроизводительных режимах она может быть еще выше [24].

По мнению авторов [25], поверхность напечатанных деталей можно дорабатывать чистовым фрезерованием, последующим шлифованием и шпатлеванием. Однако ручное шпатлевание и шлифование являются трудоемкими процессами и сильно зависят от квалификации рабочего, а чистовое фрезерование значительно увеличивает время на изготовление и стоимость готовой оснастки.

Для получения гладких поверхностей применяется постобработка в виде химического оплавления рабочих поверхностей детали парами растворителя. В работе [26] исследованы образцы размером  $20 \times 20 \times 5$  мм из ABS-пластика и определено время оптимального нахождения изделий из пластика ABS в парах ацетона.

### Процесс изготовления формообразующей оснастки

Оснастка для вакуумной формовки (пластиковая матрица) была получена из ABS-пластика марки Polylac PA-747 (температура тепловой деформации –  $97^{\circ}\text{C}$ ) на 3D-принтере ENDER 3 (рис. 1). Технические характеристики принтера представлены в табл. 1. Условия получения формообразующей оправки описаны в табл. 2. Физико-механические свойства ABS-пластика представлены в табл. 3.

Для экономии ABS-пластика была напечатана только рабочая область матрицы с каналами для выкачивания воздуха и выходами под крепления. 3D-модель рабочей области матрицы показана на рис. 2. Для уменьшения усадки после печати и увеличения прочности матрицы использовали высокую плотность заполнения (до 100%), поскольку установлено, что 100%-е заполнение материалом объема образца устраняет дефекты типа смятия граней, рыхлоты [27].

После изготовления матрицы выявлено, что на рабочей поверхности матрицы видны линии со-



Рис. 1. 3D-принтер ENDER 3

Таблица 1

Технические характеристики принтера ENDER 3

Номинальная мощность, Вт	Технология формования	Размер печати, мм	Точность печати, мм	Рекомендуемая скорость печати, мм/с	Диаметр сопла, мм	Толщина слоя, мм
350	FDM	$300 \times 300 \times 340$	$\pm 0,1$	$30-80$ (рекомендуется) $\leq 100$	0,4	0,1–0,4



Таблица 2

Режимы получения формообразующей оправки из ABS-пластика

Скорость печати, мм/с	Высота слоя, мм	Процент заполнения, %	Толщина стенки, мм	Температура плавления стенки, °С	Температура рабочего стола, °С
80	0,25	100	2	230	115

Таблица 3

Физико-механические свойства ABS-пластика

Температура размягчения, °С	Прочность на изгиб, МПа	Предел прочности на разрыв, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Усадка при охлаждении, %	Плотность материала, г/см³	Теплостойкость, °С
100	41	22	1627	6	до 0,8	1,05	103–113

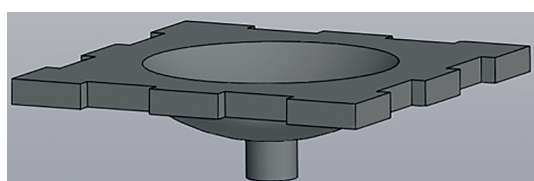


Рис. 2. 3D-модель рабочей области матрицы

единения слоев, пустоты на поверхности матрицы и припуск (поддержки при печати) (рис. 3).

Главным условием изготовления качественных изделий авиационного остекления, с требуемыми оптическими свойствами и минимальными отклонениями от формы, является гладкая рабочая поверхность матрицы с шероховатостью не более  $Ra = 0,4$  мкм [21]. Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  и высота неровностей профиля  $Rz$ , определяющие возможную ориентацию неровностей поверхностей с определенными значениями и их характеристикой, задаются в нормативных документах ГОСТ 2789-73, ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2.309-73. Шероховатость  $Ra$  (среднее арифметическое отклонение профиля)



Рис. 3. Снимок поверхности матрицы после 3D-печати

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \tag{1}$$

где  $l$  – базовая длина;  $y$  – отклонение профиля (расстояние между любой точкой профиля и базовой линией  $m-m$ ).

Высоту неровности профиля определяли по десяти точкам  $Rz$ :

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}, \tag{2}$$

где  $y_{pi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  $y_{vi}$  – глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля.

Поверхность матрицы после печати измеряли на профилограф-профилометре Арбис ПМ-7. Снимок профилограммы поверхности матрицы после 3D-печати представлен на рис. 4.

Среднее арифметическое отклонение профиля и высота неровностей профиля по десяти точкам измерений равны  $Ra = 11,672$  мкм,  $Rz = 57,829$  мкм. Полученные данные по шероховатости не соответствуют требованиям к качеству поверхности

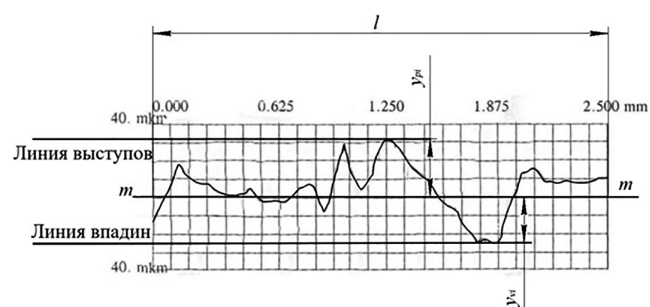


Рис. 4. Снимок профилограммы поверхности матрицы после 3D-печати:  $y_{pi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  $y_{vi}$  – глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля,  $l$  – базовая длина



Рис. 5. Настольный фрезерный станок Roland MDX-40a

формообразующей оснастки, поэтому была проведена постобработка. Рабочую поверхность матрицы обрабатывали на фрезерном станке Roland MDX-40a (рис. 5) при высокой частоте вращения, без использования смазочно-охлаждающей жидкости и подачи сжатого воздуха для отвода стружки.

Были подобраны оптимальные режимы резания: частота вращения шпинделя  $N = 15000$  об/мин; подача  $s = 2$  мм/с; глубина срезаемого слоя  $t = 0,1$  мм; число проходов  $I = 3$ .

Фотография матрицы после фрезерования представлена на рис. 6.

На рис. 7 представлен снимок профилограммы рабочей поверхности после фрезерования.

Среднее арифметическое отклонение профиля после фрезерования  $Ra = 0,865$  мкм, а высота неровностей профиля  $Rz$ , измеренная по десяти точкам, достигает 2,273 мкм. Фрезерование не по-



Рис.6. Фотография матрицы после фрезерования

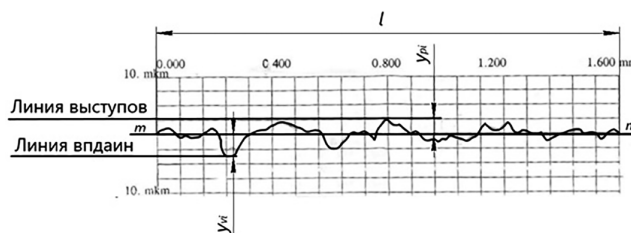


Рис. 4. Снимок профилограммы поверхности матрицы после фрезерования:

$y_{pi}$  – высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;

$y_{vi}$  – глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля,

$l$  – базовая длина

зволило получить требуемые значения по шероховатости на поверхности заготовки, что согласуется с работами [28].

После шлифования рабочей поверхности на шлифовальном станке и доводки ее шероховатость была снижена до  $Ra = 0,6$  мкм, при этом наблюдались пустоты на поверхности.

После химического полирования (заготовку обработали парами ацетона в замкнутом контуре – «ацетоновая баня» по методике [26]) шероховатость поверхности равна  $Ra = 0,4$  мкм, а переходы и пустоты отсутствуют.

На рис. 8 представлены снимки рабочей поверхности матрицы после разных видов обработки.

Таким образом, можно заключить, что использование 3D-печати позволяет получить формообразующие оправки из ABS-пластика различных форм с требуемой шероховатостью.

#### Получение изделий на формообразующей оправке

На формообразующей матрице [19] было получено семь формовок соответствующего качества из плоского органического стекла толщиной 3 мм при температуре горячего воздуха  $120^\circ\text{C}$  вакуумформованием. Температуру определяли датчиками DS18B20, установленными в оснастке, на формуемом стекле и на выходе горячего воздуха из камеры. Температуру в камеру поднимали равномерно, при достижении  $120^\circ\text{C}$  нагреватель отключался, при понижении температуры в камере ниже  $120^\circ\text{C}$  нагреватель включался. Органическое стекло толщиной 3 мм формовали при температуре  $95-105^\circ\text{C}$  (датчик на стекле сверху), при этом температура на поверхности матрицы была равна  $87-93^\circ\text{C}$ . Первые образцы, полученные на оснастке из ABS-пластика, соответствовали всем требуемым параметрам. При изготовлении последующих формовок наблюдались отклонения по точности размеров, при этом шероховатость рабочей поверхности оснастки не изменилась. Деформацию формообразующей оснастки из ABS-пластика можно объяснить ее ра-

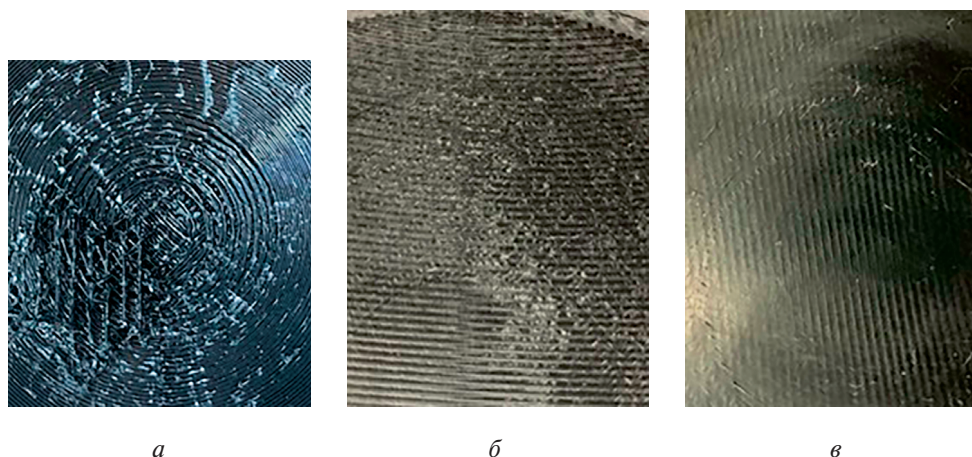


Рис. 8. Снимки рабочей поверхности матрицы: *a* – после 3D-печати; *б* – после фрезерования; *в* – после химического полирования

ботой в условиях предельной для данного материала температуры эксплуатации.

В связи с этим необходим такой материал, который бы соответствовал следующим требованиям. Пластик должен быть термостойким (температура изготовления изделий из оргстекла 120°С.) [21], температура его тепловой деформации под нагрузкой должна быть достаточно высокой, шероховатость рабочей поверхности не должна превышать  $Ra = 0,4$  мкм [22]. По мнению авторов, из перечня представленных на рынке материалов для 3D-печати для изготовления формообразующих оправок для органического стекла могут быть использованы пластики поликарбонат и нейлон, температура эксплуатации которых 120°С. Исходя из того, что качество поверхности изделия из поликарбоната можно улучшить полировкой, в следующей публикации будет рассмотрена возможность применения данного материала для изготовления формообразующей оснастки для вакуум-формования изделий из органического стекла.

### Выводы

Методом 3D-печати из ABS-пластика изготовлена формообразующая оснастка для вакуум-формования изделий из органического стекла. Добиться непревышения требуемого уровня шероховатости на рабочей поверхности матрицы из ABS-пластика можно только после постобработки (фрезерования и химического полирования). Установлено, что режимы вакуум-формования изделий из органического стекла не позволяют использовать ABS-пластик в качестве конструкционного материала для оснастки. В процессе изготовления формовок из органического стекла (температура 95–105°С, давление 0,1 МПа) наблюдается пластическая деформация полимерной матрицы. Деформация деталей из ABS-пластика происходит из-за работы

в условиях предельной температуры эксплуатации и под действием приложенного давления. Наиболее перспективным материалом для формообразующей оснастки для вакуум-формования изделий авиационного остекления может быть поликарбонат, температура эксплуатации которого 120°С и который прекрасно обрабатывается механически (шлифование, полировка).

### Список источников

1. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Кричевский Д.Д., Попов А.А. Авиационные ориентированные органические стекла (вчера, сегодня, завтра) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 2. С. 42–47. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-2-42-47
2. Ша М., Сунь И. Исследование повреждений оргстекла летательных аппаратов в условиях высокоскоростного дождевого каплеудара // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 65–76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76
3. Raut S., Jatti V.S., Khedkar N.K., Singh T.P. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts // Procedia materials science. 2014. Vol. 6, pp. 1625-1630. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.146
4. Nováková-Marcinčinová E., Novak-Marcincin J. Verification of mechanical Properties of ABS materials used in FDM rapid prototyping technology // Proceedings in manufacturing systems. 2013. Vol. 8. No. 2, pp. 87-92.
5. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58. No. 4, pp. 1415-1418. DOI: 10.2478/amm-2013-0186
6. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб.: Изд-во политехнического университета, 2013. – 222 с.
7. Barnatt C. 3D Printing: The Next Industrial Revolution. - USA: CreateSpace Independent Publishing Platform. 2013, pp. 8-20.



8. *Canessa E., Fonda C., Zennaro M.* (eds) *Low-Cost 3d Printing For Science, Education & Sustainable Development*. 2013, pp. 75-78.
9. *Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Чермошенцева А.С.* Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 1. С. 65–75. DOI: 10.34759/vst-2020-1-65-75
10. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
11. *Белов О.А., Бердникова Н.А., Бабкин А.В., Козлов М.В., Белов Д.А.* Композитная формообразующая оснастка // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 2. С. 115–122.
12. *Лопатин А.Н., Рынгач Н.А.* Применение аддитивных технологий в подготовке производства композитных самолетов // XXV Туполевские чтения, школа молодых ученых (10–11 ноября 2021; Казань): Сборник докладов В 6 томах. Казань: ИП Сагиева А.Р., 2021. Т. 1. С. 472–476.
13. *Лопатин А.Н., Зверков И.Д.* Изготовление формообразующей оснастки аддитивными методами для композитных деталей // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2(55). С. 53–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59
14. *Михайлин Ю.А.* Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе. – СПб.: Профессия, 2006. С. 33–346.
15. *Петрова Г.Н., Платонов М.М., Большаков В.А., Пономаренко С.А.* Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // *Пластические массы*. 2016. № 5–6. С. 53–58. DOI: 10.35164/0554-2901-2016-5-6-53-58
16. *Аксенов Л.Б., Кононов И.Ю., Колбасников Н.Г.* Напряженное состояние пластиковых штампов, изготовленных 3D-печатью, при гибке тонколистового алюминия // *Пром-Инжиниринг: сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции (18–22 мая 2020; Челябинск)*. – Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2020. С. 203–206.
17. *Бохоева Л.А., Курохтин В.Ю., Первалов А.В., Рогов В.Е., Покровский А.М., Чермошенцева А.С.* Испытания элементов конструкций и узлов вертолета на усталостную прочность // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 1. С. 7–16.
18. *Андрианов И.К., Попов А.В., Чепурнова Е.К.* Формообразующие детали штампа оптимизированного объема, изготовленные методом 3D-печати // *Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Сб. трудов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых (05–11 декабря 2022; Комсомольск-на-Амуре)*. В 2 частях. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2023. С. 10–13.
19. *Шатов М.С., Батуев Ц.А., Грешилов А.Д., Митрюшкин И.С.* Разработка оснастки и оборудования для вакуумформования авиационного остекления из органического стекла // *Проблемы механики современных машин: Сб. трудов VIII Международной конференции (04–09 июля 2022; оз. Байкал)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2022. С. 266–271. DOI: 10.53980/9785907599055\_266
20. *Батуев Ц.А., Шатов М.С., Лисов К.Д., Семенов Е.Д.* Разработка установки для горячего формования авиационного остекления из органического стекла с применением аддитивных технологий // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 8(255). С. 14–16. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-14-16
21. *Шварцманн П., Иллиг А.* Термоформование (материалы, процессы, инструменты): Практическое руководство / Пер. с англ. яз. под ред. М.А. Шерышева. – СПб.: Профессия. 2007. – 288 с.
22. ПИ-1.2.315-89 Производственная инструкция. Изготовление деталей остекления из органических стекол. – М.: ВИАМ, 1990. – 102 с.
23. *Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А.* Пластические массы. Свойства и применения. Справочник. – Л.: Химия, 1978. – 384 с.
24. *Ahn D., Kweon J.-H., Kwon S.* et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. No. 15-16, pp. 5593-5600. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016
25. *Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В., Шевчук Е.О.* Улучшение шероховатости поверхностей деталей из полимерных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 7(104). С. 12–18. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-7-12-18
26. *Якубович Д.И., Васеничева А.В.* Снижение шероховатости поверхности изделий из пластика ABS, полученных методом аддитивных технологий // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2021. № 3(72). С. 99–107. DOI: 10.53078/20778481\_2021\_3\_99
27. *Костина Е.С., Чубуков А.И., Ильинкова Т.А., Клабуков М.А.* Механические свойства ABS-пластика, полученного по FDM-технологии // *Современный взгляд на проблемы технических наук: Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции*. Уфа: Изд-во ИЦРОН, 2017. С. 42–47.
28. *Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В., Шевчук Е.О.* Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 12(97). С. 4–10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-4-10



## References

- Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Krichevskii D.D., Popov A.A. Vse materialy. *Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2021, no. 2, pp. 42-47. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-2-42-47
- Sha M., Sun Y. Studying aircraft organic glass damages under conditions of high-speed raindrops shock. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 65-76. DOI: 10.34759/vst-2022-3-65-76
- Rauta S., Jatti V.S., Khedkar N.K., Singhd T.P. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts. *Procedia materials science*, 2014, vol. 6, pp. 1625-1630. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.146
- Nováková-Marcinčinová L., Novak-Marcincin J. Verification of mechanical Properties of ABS materials used in FDM rapid prototyping technology. *Proceedings in manufacturing systems*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 87-92.
- Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 1415-1418. DOI: 10.2478/amm-2013-0186
- Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.N. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* (Additive technologies in mechanical engineering). St. Petersburg, Politekhicheskii universitet, 2013, 222 p.
- Barnatt C. *3D Printing: The Next Industrial Revolution*. USA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013, pp. 8-20.
- Canessa E., Fonda C., Zennaro M. (eds) *Low-Cost 3d Printing For Science, Education & Sustainable Development*, 2013, pp. 75-78.
- Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Chermoshentseva A.S. Optimal structure of multi-layer wing console of unmanned aerial vehicle with experimental validation. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 65-75. DOI: 10.34759/vst-2020-1-65-75
- Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7-17.
- Belov O.A., Berdnikova N.A., Babkin A.V., Kozlov M.V., Belov D.A. Composite shape-generating tool set for spacecraft antennae reflector manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 115-122.
- Lopatin A.N., Ryngach N.A. *XXV Tupolevskie chteniya, shkola molodykh uchenykh (10-11 November 2021; Kazan)*. Sbornik statei v 6 tomakh. Kazan, Sagieva A.P., 2021, vol. 1, pp. 472-476.
- Lopatin A.N., Zverkov I.D. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 2(55), pp. 53-59. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-53-59
- Mikhailin Yu.A. *Termoustoichivyye polimery i polimernyye materialy na ikh osnove* (Heat-resistant polymers and polymer materials based on them). St. Petersburg, Professiya, 2006, pp. 33-346.
- Petrova G.N., Platonov M.M., Bol'shakov V.A., Ponomarenko S.A. *Plasticheskie massy*, 2016, no. 5-6, pp. 53-58. DOI: 10.35164/0554-2901-2016-5-6-53-58
- Aksenov L.B., Kononov I.Yu., Kolbasnikov N.G. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Prom-Inzhiniring" (18-22 May 2020; Chelyabinsk)*. Chelyabinsk, ITs YuUrGU, 2020, pp. 203-206.
- Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Y., Perevalov A.V., Rogov V.E., Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S. Helicopter structural elements and components fatigue resistance tests. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 7-16.
- Andrianov I.K., Popov A.V., Chepurnova E.K. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh "Proizvodstvennyye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu" (05-11 December 2022; Komsomol'sk-na-Amure)*. V 2 chastyakh. Komsomol'sk-na-Amure, KnAGU, 2023, pp. 10-13.
- Shatov M.S., Batuev Ts.A., Greshilov A.D., Mityrushkin I.S. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy mekhaniki sovremennykh mashin" (04-09 July 2022; oz. Baikal)*. Ulan-Ude, VSGUTU, 2022, pp. 266-271. DOI: 10.53980/9785907599055\_266
- Batuev Ts.A., Shatov M.S., Lisov K.D., Semenov E.D. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 8(255), pp. 14-16. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-14-16
- Schwarzmann P. *Thermoforming 2E: A Practical Guide*. 2nd ed. Hanser Gasdner Publications, 2018, 495 p.
- Proizvodstvennaya instruksiya. *Izgotovlenie detalei ostekleniya iz organicheskikh stekol. PI-1.2.315-89* (Manufacture of glazing parts from organic glasses. Production instructions PI-1.2.315-89). Moscow, VIAM, 1990, 102 p.
- Katsnel'son M.Yu., Balaev G.A. *Plasticheskie massy. Svoystva i primeniya. Spravochnik* (Plastic masses. Properties and applications). Leningrad, Khimiya, 1978, 384 p.
- Ahn D., Kweon J.-H., Kwon S. et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 15-16, pp. 5593-5600. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016
- Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Gusev D.V., Shevchuk E.O. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 7(104), pp. 12-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-7-12-18
- Yakubovich D.I., Vasenicheva A.V. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, 2021, no. 3(72), pp. 99-107. DOI: 10.53078/20778481\_2021\_3\_99
- Kostina E.S., Chubukov A.I., Il'inkova T.A., Klabukov M.A. *Sbornik nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennyyi vzglyad na problemy tekhnicheskikh nauk"*, Ufa, ITsRON, 2017, pp. 42-47.
- Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Gusev D.V., Shevchuk E.O. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 12(97), pp. 4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-12-4-10

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 21.03.2024; принята к публикации 22.03.2024.  
The article was submitted on 09.10.2023; approved after reviewing on 21.03.2024; accepted for publication on 22.03.2024.