

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОНТРМАТРИЦ ДЛЯ ХОЛОДНОГО КОНГРЕВНОГО ТИСНЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. С. Феддер 

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18

 maryfedder@gmail.com

Проанализированы общие тенденции в развитии производственных подходов с точки зрения термина Индустрия 4.0. В рамках полиграфической отрасли рассмотрены возможности и ограничения применимых методов организации производства и интеграции новых цифровых технологий. Выявлено, что полиграфическая отрасль сталкивается с конкуренцией, дорогим сырьём и зависимостью от импортного оборудования. Предприятиям требуется повышение производительности, снижение потерь и формирование интеллектуальной собственности как основы конкурентоспособности.

Проведено исследование на предмет возможности изготовления контрматриц для холодного конгревного тиснения методом 3D-прототипирования. Проанализированы возможности аддитивных технологий в области изготовления прессовых пар, в частности ответных частей — контрштампов. Выбрана технология Fused Deposition Modeling — формирование объекта методом послойного наплавления для первичного прототипирования и печати тест-объектов, а также первичных тест-объектов на соответствие группы критериев качества контрматриц.

Проверены параметры воспроизведения линейных размеров отдельных элементов с использованием материалов ABS и PLA в сравнении с входными данными о геометрии. Получено подтверждение на входном контроле контрматриц к промышленным испытаниям на предприятии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-прототипирование, холодное конгревное тиснение, постпечатная обработка оттисков, матрица, контрматрица, клише

Для цитирования: Феддер М. С. Критерии оценки качества контрматриц для холодного конгревного тиснения, изготовленных с применением аддитивных технологий. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 46–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-46-55>. EDN: RSOMYU.



© Феддер М. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CRITERIA FOR ASSESSING THE QUALITY OF ADDITIVELY MANUFACTURED COUNTER-MATRICES FOR COLD EMBOSING

М. S. Fedder 

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Bolshaya Morskaya St., 18, Saint Petersburg, 191186, Russia

 maryfedder@gmail.com

The article examines general trends in production approaches within the framework of the Industry 4.0, focusing on the printing industry. The analysis highlights the opportunities and constraints of integrating digital technologies into existing manufacturing systems. Findings indicate that the sector contends with high raw material costs, reliance on imported machinery and intense market competition. To ensure competitiveness, enterprises should boost productivity, minimize waste and develop their own intellectual property portfolios.

The author conducts the research on the feasibility of manufacturing counter-matrices for cold embossing using 3D prototyping. The capabilities of additive technologies in the production of die sets — specifically counter-dies — are analysed. Fused Deposition Modeling (FDM), a layer-by-layer deposition technique,

is selected for initial prototyping and printing of test objects to evaluate them with a set of quality criteria for counter-matrices.

Moreover, the parameters for reproducing the linear dimensions of individual elements are verified using ABS and PLA materials compared with input geometric data. Therefore, the author confirms the compliance with acceptance criteria for industrial trials at an enterprise facility during the incoming inspection of the counter-matrices.

Keywords: additive technologies, 3D prototyping, cold embossing, post-press processing, matrix, counter-matrix, cliché

For citation: Fedder M. S. Criteria for assessing the quality of additively manufactured counter-matrices for cold embossing. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):46–55. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-46-55>. EDN: RSOMYU. (In Russ.).



© Fedder M. S., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Стремительное развитие информационных технологий, киберфизических систем и анализа больших данных знаменует переход к концепции «Индустрия 4.0» [1]. Применительно к производству полиграфической оснастки, такой как контрматрицы для холодного конгревного тиснения, подход «Индустрия 4.0» подразумевает переход от традиционных технологий производства к применению аддитивных технологий и прямому цифровому производству на основе электронных геометрических моделей [2].

Сталкиваясь с проблемой давления иностранных полиграфических компаний в ценообразовании, высокой стоимостью на запечатываемые и расходные материалы, а также с отсутствием отечественных альтернатив в оборудовании и технологической оснастке, полиграфическая промышленность должна выработать стратегию по стабилизации и устойчивому развитию [3]. Помимо экономической эффективности и рядового технологического развития с целью обеспечения конкурентоспособности необходимо формировать и поддерживать внедрение инновационных технологий [4].

В полиграфии важное значение имеет продукция с послепечатной отделкой, которая делает исполнение дорогим и неповторимым, притягательным и запоминающимся. Такая продукция имеет большую маржинальность, а типографии стремятся пополнить портфель заказов такими проектами. Один из популярных способов отделки полиграфической продукции, при котором элементы дизайна имеют видимый и осязаемый рельеф, — это холодное конгревное тиснение.

Предприятия, которые готовят оснащение полиграфического оборудования для проведения такого послепечатного процесса, рассматривают различные способы сокращения ошибок проектирования и разработки, рационализации производственных процессов, устранения потерь, а также исследуют возможности применения новых технологий производства, материалов и оборудования, что и поощряет последняя промышленная революция «Индустрия 4.0» [5]. Аддитивное производство считается важным компонентом этого нового механизма [6].

Аддитивные технологии прошли длинный путь от процессов быстрого прототипирования (Rapid prototyping) до прямого цифрового производства (Direct digital manufacturing) [7], которое позволяет создавать физические объекты на основе геометрического представления (цифровой модели)

путем последовательного добавления материала. В соответствии с ГОСТом аддитивный технологический процесс (additive manufacturing) — процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства [8].

Сегодня российский рынок аддитивного производства или 3D-печати (оборудование, программное обеспечение, материалы, поставки, производство по запросу) вырос на 33,9 % с 2021 по 2022 г. в стоимостном выражении и на 60,1 % с 2022 по 2023 г. Наблюдается развитие и распространение лучших практик в использовании аддитивных технологий в таких отраслях, как медицина и стоматология, литейное производство, авиация, общее машиностроение, индустрия пластмасс [9].

Лидеры рынка полимерной 3D-печати сосредоточены на развитии решений в производстве прототипов и оснастки. Интеграция аддитивных технологий в послепечатные полиграфические процессы имеет актуальность и новизну для развития на российском рынке, благодаря таким преимуществам, как экологичность, автономность работы, стабильность качества продукции, минимизация отходов, экономия ресурсов и снижение затрат, энергоэффективность [10].

При рассмотрении возможности применения аддитивных технологий для изготовления контрматриц выявляются технологические ограничения, связанные с особенностями формирования слоистой структуры, анизотропией физико-механических свойств, усадочными деформациями, недостаточной износостойкостью и вариацией качества поверхности в зависимости от технологии печати и последующей постобработки.

В связи с чем возникает необходимость систематизации и формирования критериев оценки качества контрматриц, изготовленных методом 3D-печати, с учетом специфики их применения в процессе холодного конгревного тиснения. Такие критерии должны отражать не только геометрическую точность и качество поверхности, но и устойчивость к циклическим контактным нагрузкам, сохранение формы рельефа, стабильность размеров в процессе эксплуатации, а также способность обеспечивать требуемую точность воспроизведения художественно-графических элементов. Технологические параметры, составляющие процесс 3D-печати, и свойства полимеров: скорость печати, толщина

слоя, ориентация раstra, устойчивость к излучению, будут оказывать влияние на формирование конечной модели критериев оценки [11].

Целью исследования является анализ и формирование перечня критериев для оценки качества контрматриц для холодного конгревного тиснения, изготовленных с применением аддитивных технологий. В исследовании учтены технологические и эксплуатационные факторы, определяющие их работоспособность. Для достижения цели необходимо рассмотреть факторы влияния способа аддитивного изготовления на точность воспроизведения геометрии элементов рельефа, установить основные параметры, характеризующие качество поверхности и геометрическую стабильность контрматриц, а также определить факторы, влияющие на их тиражную стойкость.

Научная новизна работы заключается в систематизации критериев качества контрматриц применительно к условиям холодного конгревного тиснения и в обосновании комплексного подхода к их оценке, основанного на сочетании геометрических, физико-механических и эксплуатационных характеристик. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученной модели критериев оценки при выборе технологий быстрого прототипирования, материалов и режимов постобработки для изготовления контрматриц с заданными эксплуатационными свойствами, а также входного контроля контрматриц.

Проблематика исследования

В отделочных процессах полиграфического производства применяется послепечатное оборудование и специализированная оснастка. Проектирование, разработку и изготовление оснастки берут на себя, как правило, поставщики, связанные с полиграфическим производством обязательствами и цепочкой поставок. Если на входном контроле или в процессе выявлены несоответствия оснастки и прессовых пар, возникает необходимость взаимодействия с поставщиком и время производственного процесса увеличивается. Актуальным требованием становится замена оснастки и инструмента на рабочем месте точно в срок с возможностью внесения изменений. Такому запросу на сегодняшний день отвечает аддитивное производство, а именно 3D-прототипирование, у которого наблюдается устойчивое, прогрессивное развитие технологий и оборудования, уменьшается цепочка технологического цикла, появляется возможность оперативно вносить изменения в конструкцию, без изготовления новых штампов и форм, срок изготовления сложных деталей снижается [12].

В традиционном производстве комплект клише для конгревного тиснения представляет собой пару, которая состоит из матрицы и ответной части (или «контрматрицы»). Матрица, как правило, изготавливается из металлов латуни, магния, алюминия и цинка в зависимости от дизайна, качественных характеристик обрабатываемого материала и требуемой тиражестойкости. Контрматрица может быть изготовлена как из металлов, так и из полимеров. При холодном конгревном тиснении зону контакта формируют три составляющие: матрица, обрабатываемый материал (бумага, картон, оттиск и др.) и контрматрица. Процесс изготовления контрматриц является многостадийным и занимает около 3–5 рабочих дней у поставщика полиграфической оснастки. Сокращение затрат рабочего времени,

а также расхода основных материалов — латуни, для изготовления дополнительной формы с целью отлива и термоформования является интересным с точки зрения рационализации труда и затрат машинного времени.

Целью текущего исследования, которое состоит из нескольких экспериментальных частей, является возможность изучения интеграции аддитивных технологий в послепечатные процессы, рассмотрение способов и материалов изготовления ответной части прессовой пары — контрматрицы для холодного конгревного тиснения с применением аддитивных технологий.

Методика проведения первичного эксперимента

Целью первой экспериментальной части являлась проверка гипотезы о технологической применимости и эксплуатационной пригодности прессовой пары (матрицы и контрматрицы), изготовленной методом послойного нанесения (Fused Deposition Modeling — FDM), для выполнения операций холодного конгревного тиснения на полиграфических и упаковочных материалах. В рамках эксперимента были поставлены следующие задачи:

- изучить технологию изготовления контрматриц традиционным способом и методы контроля качества контрматриц, а также оттисков с холодным конгревным тиснением;

- изучить свойства материалов для изготовления прессовой пары традиционным способом и сформировать модель критериев качества контрматриц;

- разработать тестовую модель прессовой пары с учётом требований к точности передачи рельефа и механической стабильности;

- изготовить прессовую пару из нескольких термопластичных полимерных материалов, совместимых с FDM-печатью;

- произвести входной контроль полученных контрматриц по основным группам критериев в соответствии с моделью качества.

Форматом проверки гипотезы стал квазиэксперимент с повторяющимися испытаниями. Использован сравнительный подход: в качестве образца-эталоны выступает прессовая пара, изготовленная по традиционной технологии (CNC-обработка), а в качестве экспериментального образца — прессовая пара, где контрматрица напечатана методом FDM с одной трехмерной модели на двух термопластах в нескольких экземплярах. Технология FDM — способ 3D-печати, который состоит в получении объектов на платформе построения путем послойного нанесения расплавленного полимера через сопло печатающей головки. Печатающая головка представляет собой экструдер, в который заправлена полимерная нить диаметром порядка 1,75 мм. На точность позиционирования печатающей головки по осям X, Y, Z влияют механика принтера и направляющие, данный параметр отвечает за качество печати [13].

Таким образом, полное преобразование от двухмерного чертежа до оттиска представлено на рис. 1.

В ходе анализа технологии изготовления контрматрицы, требований к оттискам и к ответной части матрицы были использованы общие технические требования, предъявляемые к контрматрице, изготовленной классическим способом. Изучены требования к оттиску. Так, конечный оттиск оценивается с точки зрения соответствия элементов

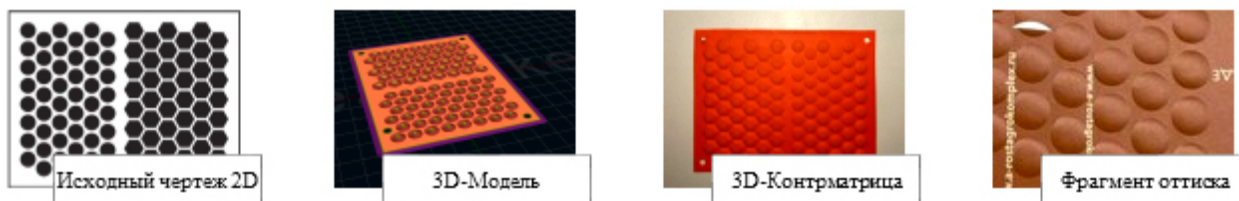


Рис. 1. Цифровое преобразование двухмерного чертежа в оттиск с холодным конгревным тиснением

Fig. 1. Digital transformation of a 2D drawing into a printed sheet with cold embossing

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 1. Модель критериев качества контрматрицы
Table 1. Model of counter-matrix quality criteria

Наименование группы критериев	Критерий	Допуски	Метод оценки
1. Воспроизведение всех элементов изображения контрматрицы	1.1. Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели	Отклонения не допускаются	Визуально, контрольный чертеж на прозрачной пленке
	1.2. Соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y)	Для аддитивных технологий определяется в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм в зависимости от материала оттиска и сложности дизайна	Штангенциркуль
	1.3. Соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z)	Для аддитивных технологий определяется в диапазоне от 0,05 до 0,15 мм в зависимости от материала оттиска и сложности дизайна	Штангенциркуль
2. Внешний вид контрматрицы	2.1. Цвет контрматрицы	Допускается любой цвет, пригодный для последующего сканирования, кроме прозрачного	Визуально
	2.2. Высота площадки, на которой расположены элементы дизайна контрматрицы	$\pm 0,02$ мм	Штангенциркуль
	2.3. Линейные размеры площадки по периметру, на которой расположены элементы дизайна контрматрицы	Допускается изменение размеров $\pm 0,5$ мм	Штангенциркуль
	2.4. Плоскостность объекта	Допускается изменение плоскостности объекта не более чем на $5-7^\circ$ от ровной горизонтальной поверхности	Методика измерения плоскостности
	2.5. Гладкость поверхности элементов дизайна	Поверхность не должна иметь явно выраженный рельеф, который обусловлен технологией изготовления	Визуально, лупа
3. Функциональные и эксплуатационные характеристики контрматрицы	3.1. Отсутствие механических повреждений и пузырей по всему объему	На внешней поверхности и внутри массы полимера не должно быть пузырей и трещин	Визуально, лупа
	3.2. Устойчивость к температурным воздействиям от $40-80^\circ\text{C}$ на вырубном прессе	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.3. Устойчивость к периодическим ударным нагрузкам $5-25$ МПа ($500-2500$ т/м ²)	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.4. Устойчивость к обработке щелочными растворами по всей площади	Не должно происходить внешних разрушений и механических повреждений по всему объему контрматрицы	Визуально, лупа
	3.5. Устойчивость к изгибу основания	Не должно происходить внешних разрушений, трещин и изломов	Визуально, лупа

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 2. Параметры печати контрматриц на материалах ABS и PLA

Table 2. Counter-matrix printing parameters on ABS and PLA materials

Материал/ Параметр	ABS (акрилонитрил- бутадиен- стирол)	PLA (полилактид)
Температура рабочего стола, °C	110	80
Температура экструдера, °C	240	205
Скорость печати, мм/сек.	40	40
Время печати, мин.	201	242,4
Высота слоя, мм	0,05	0,05
Толщина стенки, мм	2,5	2,5
Высота первого слоя, мм	0,3	0,3

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

дизайна утвержденному оригинал-макету, совмещения элементов конгревного тиснения с элементами печатного изображения и отсутствия механических повреждений материала отиска. Элементы конгревного тиснения должны быть проработаны, визуально заметны, иметь ощутимый и гладкий рельеф, на котором отсутствует растрескивание и другие механические повреждения материала как с лицевой, так и с обратной стороны. Контрматрица должна обладать прочностью и упругостью, так как при установке и смене материал подвергается изгибу на угол от 15 до 90°, а также возможным воздействиям химических щелочных и кислых сред, в ходе обработки основного комплекта оснастки для вырубки. Микрошероховатость выпуклых элементов дизайна должна быть минимальной, так как данный объект будет использоваться для штамповки и рельеф не должен проявляться на бумажном сырье. Нагрузка на объект от 20 до 60 т/м² с повторяемостью до 50 тыс. ударов на автоматических штамповальных прессах, предназначенных для вырубки, биговки, перфорации, конгревного тиснения и тиснения фольгой картона, гофрокартона, микрогофрокартона, бумаги, пластика. Таким образом формируются входные требования к контрматрице, представленные в табл. 1.

В качестве материалов для испытаний использованы полимерные нити: акрилонитриленстирол (ABS) и полилактид (PLA). PLA-пластик — термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. ABS-пластик (Акрилонитрил, Бутадиен, Стирол) — ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Пропорции ABS могут варьироваться в пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена и 40–60 % стирола. Как и полилактид, может разлагаться под воздействием солнечного света, что позволяет считать его экологически безопасным [9]. Также полимерные нити ABS и PLA зарекомендовали себя как полимеры, имеющие хорошую прочность и жесткость при сжатии в процессе прототипирования штампов [14].

В соответствии с выбором технологии изготовления, материалов и определения входных требований к контрматрице был спроектирован тест-

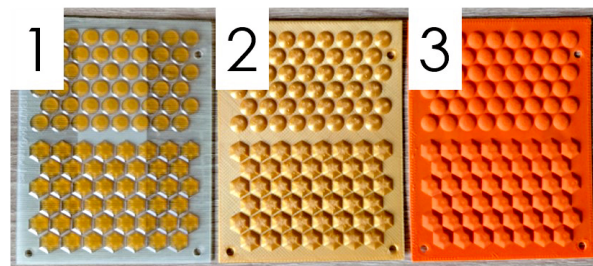


Рис. 2. Полученные контрматрицы:
1 — традиционный способ; 2 — способ 3D-печати на материале PLA; 3 — способ 3D-печати на материале ABS
Fig. 2. Produced counter-matrices: 1 — traditional method; 2 — 3D printing method of PLA material; 3 — 3D printing method of ABS material

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

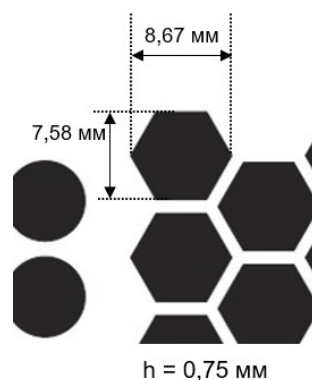


Рис. 3. Размеры элемента
«Шестиугольник» по X —
8,67 мм, Y — 7,58 мм,
Z — 0,75 мм

Fig. 3. Dimensions of
the "Hexagon" element
in X — 8.67 mm, Y — 7.58 mm,
Z — 0.75 mm

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

объект, который представляет собой основание форматом 79×102 мм, высотой 0,5 мм. На основании находятся простые геометрические формы элементов: круг — 48 штук и шестиугольник — 45 штук. Для печати контрматриц на материале ABS и PLA подобран принтер марки RAISE PRO2, параметры печати и режимов в ходе эксперимента представлены в табл. 2.

Для проведения входного контроля контрматриц, представленных на рис. 2, на однородность и повторяемость воспроизведения, были собраны данные для каждого объекта.

Для оценки качества самой первой группы критериев «Воспроизведение всех элементов изображения объекта» из табл. 1 было изготовлено по два экземпляра контрольных образцов: 2 — на материале ABS, 2 — на материале PLA. На полученных контрматрицах выбрана контрольная группа элементов: «Шестиугольник».

Для оценки воспроизведения геометрии элементов в ходе преобразования цифровых данных от двухмерного чертежа до получения реального объекта и его сканирования были выбраны линейные параметры элемента «Шестиугольник» в направлении осей X, Y, Z, представленных на чертеже (рис. 3).

Таблица 3. Сбор массива данных по размерам элемента «Шестиугольник» в разрезе осей XYZ для PLA
Table 3. XYZ dimensions dataset for the "Hexagon" part (PLA)

№ измерения	Контрольный элемент 1, мм			Контрольный элемент 2, мм			Контрольный элемент 3, мм			Контрольный элемент 4, мм			Контрольный элемент 5, мм		
	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z
1	8,58	7,69	0,97	8,59	7,74	0,77	8,77	7,62	0,81	8,64	7,81	0,91	8,74	7,76	1,12
2	8,65	7,57	0,87	8,63	7,56	0,97	8,89	7,67	0,98	8,71	7,74	1,03	8,61	7,62	1,08
3	8,65	7,79	0,88	8,65	7,74	0,87	8,86	7,78	0,84	8,74	7,64	1,04	8,81	7,86	0,93
4	8,61	7,64	0,74	8,72	7,62	0,79	8,87	7,88	1	8,65	7,72	0,96	8,66	7,8	0,92
5	8,62	7,79	1,1	8,61	7,72	0,85	8,78	7,84	0,88	8,64	7,83	1,08	8,74	7,73	1,03
6	8,55	7,69	1,07	8,76	7,65	0,72	8,74	7,81	0,85	8,69	7,79	0,76	8,71	7,89	1,07
7	8,69	7,61	0,72	8,62	7,67	0,83	8,69	7,76	0,85	8,69	7,76	1,02	8,76	7,85	1,1
8	8,66	7,64	0,88	8,58	7,64	0,68	8,81	7,77	0,97	8,68	7,68	1,11	8,75	7,94	1,01
9	8,51	7,69	0,81	8,69	7,64	0,68	8,83	7,74	0,92	8,66	7,82	0,87	8,75	7,77	0,89
10	8,52	7,63	0,77	8,63	7,72	0,73	8,74	7,84	0,76	8,65	7,65	0,93	8,8	7,94	1,08
Среднее	8,604	7,674	0,881	8,648	7,670	0,789	8,798	7,771	0,886	8,675	7,744	0,971	8,733	7,816	1,023
Станд.ош.	0,020	0,023	0,041	0,018	0,019	0,029	0,021	0,025	0,025	0,010	0,022	0,034	0,019	0,032	0,026
Медиана	8,615	7,665	0,875	8,630	7,660	0,780	8,795	7,775	0,865	8,670	7,750	0,990	8,745	7,825	1,050
Мода	8,650	7,690	0,880	8,630	7,740	0,680	8,740	7,840	0,850	8,640	—	—	8,740	7,940	1,080
Ст. откл.	0,062	0,072	0,131	0,058	0,059	0,093	0,065	0,080	0,079	0,033	0,070	0,107	0,060	0,100	0,082
Дисп. выб	0,004	0,005	0,017	0,003	0,004	0,009	0,004	0,006	0,006	0,001	0,005	0,011	0,004	0,010	0,007
Экспесс	— 1,206	— 0,290	— 0,741	— 0,063	— 0,534	— 0,025	— 1,016	0,074	— 1,057	— 0,096	— 1,415	0,169	0,810	0,078	— 1,272
Асимметрия	— 0,343	0,586	0,569	0,889	— 0,389	0,635	— 0,127	— 0,685	0,088	0,783	— 0,309	— 0,700	— 0,930	— 0,563	— 0,596
Интервал	0,180	0,220	0,380	0,180	0,180	0,290	0,200	0,260	0,240	0,100	0,190	0,350	0,200	0,320	0,230
Мини-м	8,510	7,570	0,720	8,580	7,560	0,680	8,690	7,620	0,760	8,640	7,640	0,760	8,610	7,620	0,890
Макс-м	8,690	7,790	1,100	8,760	7,740	0,970	8,890	7,880	1,000	8,740	7,830	1,110	8,810	7,940	1,120

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 4. Сбор массива данных по размерам элемента «Шестиугольник» в разрезе осей XYZ для ABS
Table 4. XYZ dimensions dataset for the "Hexagon" part (ABS)

№ измерения	Контрольный элемент 1, мм			Контрольный элемент 2, мм			Контрольный элемент 3, мм			Контрольный элемент 4, мм			Контрольный элемент 5, мм		
	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z	Размеры по X	Размеры по Y	Размеры по Z
1	8,87	7,72	0,83	8,67	7,8	0,8	8,74	7,85	0,9	9,01	7,88	0,75	8,85	7,86	0,75
2	9,01	7,71	0,82	8,84	7,73	0,1	8,93	7,79	0,87	8,94	7,83	0,76	8,78	7,81	0,71
3	8,88	7,68	0,81	8,78	7,78	0,8	8,95	7,78	0,91	8,89	7,81	0,78	8,71	7,79	0,76
4	8,91	7,69	0,78	8,68	7,81	0,83	9,01	7,81	0,92	8,78	7,77	0,76	8,88	7,81	0,74
5	8,72	7,7	0,85	8,85	7,82	0,77	8,76	7,78	0,86	8,83	7,78	0,75	8,76	7,82	0,72
6	8,77	7,75	0,84	8,95	7,74	0,8	8,68	7,83	0,87	8,93	7,83	0,76	8,83	7,85	0,74
7	8,69	7,69	0,78	8,92	7,82	0,81	8,73	7,75	0,91	8,83	7,84	0,74	8,76	7,71	0,74
8	8,72	7,71	0,81	8,81	7,83	0,76	8,71	7,79	0,89	8,81	7,89	0,75	8,68	7,85	0,75
9	8,68	7,73	0,79	8,71	7,9	0,77	8,69	7,84	0,86	8,78	7,87	0,78	8,71	7,73	0,7
10	8,69	7,78	0,82	8,73	7,79	0,81	8,78	7,85	0,89	8,76	7,85	0,77	8,85	7,89	0,76
Среднее	8,79	7,72	0,81	8,79	7,80	0,73	8,80	7,81	0,89	8,86	7,84	0,76	8,78	7,81	0,74
Станд.оп.	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01
Медиана	8,75	7,71	0,82	8,80	7,81	0,80	8,75	7,80	0,89	8,83	7,84	0,76	8,77	7,82	0,74
Мода	8,72	7,71	0,82	—	7,82	0,80	—	7,85	0,87	8,78	7,83	0,75	8,85	7,81	0,74
Ст. откл.	0,12	0,03	0,02	0,10	0,05	0,22	0,12	0,03	0,02	0,08	0,04	0,01	0,07	0,06	0,02
Дисп. выб	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Экспесс	−0,73	0,83	−0,99	−1,12	1,20	9,74	−0,83	−1,18	−1,57	−0,61	−0,77	−0,75	−1,43	−0,12	−0,56
Асимм-сть	0,74	1,05	−0,08	0,27	0,44	−3,11	0,91	−0,09	0,00	0,68	−0,33	0,35	−0,01	−0,71	−0,74
Интервал	0,33	0,10	0,07	0,28	0,17	0,73	0,33	0,10	0,06	0,25	0,12	0,04	0,20	0,18	0,06
Мини-м	8,68	7,68	0,78	8,67	7,73	0,10	8,68	7,75	0,86	8,76	7,77	0,74	8,68	7,71	0,70
Макс-м	9,01	7,78	0,85	8,95	7,90	0,83	9,01	7,85	0,92	9,01	7,89	0,78	8,88	7,89	0,76

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Для оценки параметра 1.1. «Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели» был проведен визуальный осмотр объектов. Выявлено, что рисунок и геометрия на всех образцах материала ABS и PLA соответствуют входным данным, преобразование которых показано на рис. 1.

Далее произведен сбор и оценка массива данных на соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели (п. 1.1, табл. 1), соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y) (п. 1.2, табл. 1) и соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z) (п. 1.3, табл. 1). В массив данных была взята группа из пяти контрольных элементов формы «Шестиугольник» материала PLA и ABS. Пример сбора данных приведен в табл. 3 и табл. 4 соответственно.

Проведенный статистический анализ 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материала PLA показал соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели. Наибольшая стабильность геометрических размеров из полученных данных определяется для осей X и Y. Так, среднее квадратичное отклонение размеров элементов по осям X и Y не превышает 0,100 мм, а для большинства контрольных элементов находится в пределах 0,03–0,07 мм, что говорит о высокой повторяемости процесса экструзии, стабильности позиционирования печатающей головки в горизонтальной плоскости и отсутствия усадки после охлаждения для материала PLA [15]. Наименьшая технологическая стабильность выявлена для параметров высоты контрольных элементов по оси Z. Максимальное значение среднеквадратичного отклонения — 0,131 мм и наибольший интервал варьирования (0,380 мм) зафиксированы для контрольного элемента 1. Данная закономерность для материала PLA обусловлена спецификой послойного формообразования: погрешность по оси Z носит накопительный характер и зависит от адгезии первого слоя к столу печатного устройства, адгезии между первыми слоями, а также наличия люфтов в механических узлах печатной головки.

Анализ законов распределения для контрольной группы элементов говорит о том, что отклонения имеют преимущественно отрицательный эксцесс, то есть вершины распределений более плоские, чем у нормального закона распределения. Это указывает на наличие нескольких наложенных друг на друга факторов рассеивания. Асимметрия умеренная, без выраженных систематических сдвигов, что говорит о преобладании случайных технологических погрешностей.

Проведенный статистический анализ 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материала ABS показал соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели. Наибольшая стабильность и повторяемость для осей Y и Z. Среднеквадратичное отклонение по оси Y не превышает 0,06 мм, а по оси Z составляет всего лишь 0,01–0,02 мм. Это говорит о высокой степени работоспособности механики оборудования. Наименьшая стабильность характерна для линейных размеров по оси X. Максимальное значение среднеквадратичного отклонения — 0,12 мм и наибольший интервал варьирования — 0,33 мм зафиксированы для элементов 1 и 3. Данная закономерность связана с физико-химическими свойствами материала ABS, который подвержен некоторой термической усадке и короблению при остывании [15].

Анализ законов распределения выявил выраженную положительную асимметрию по оси X — коэффициенты асимметрии до 0,91. Это указывает на наличие систематической технологической погрешности, которая, вероятно, связана с направленным натяжением ремней или односторонним обдувом модели, что приводит к предсказуемому смещению размеров контрольной группы элементов в большую сторону.

Выводы

Сопоставление статистических данных 10-кратных измерений пяти контрольных элементов контрматрицы из материалов PLA и ABS позволяет сделать следующие промежуточные выводы об их технологической стабильности и воспроизводимости по группе критериев «Воспроизведение всех элементов изображения объекта» для пяти контрольных элементов:

1. По критерию «Соответствие рисунка и геометрии элементов дизайна цифровой модели» (п. 1.1. в табл. 1) контрматрицы из материалов PLA и ABS полностью соответствуют требованиям.

2. По критериям «Соответствие линейных размеров элементам дизайна цифровой модели (оси X, Y)» (п. 1.2. в табл. 1) и «Соответствие высоты размеров элементам дизайна цифровой модели (оси Z)» (п. 1.3. в табл. 1) контрматрица из материала PLA показывает типовую проблему технологии FDM-печати: высокая точность в плоскости осей X, Y и значительный разброс по высоте — ось Z. Максимальное среднеквадратичное отклонение по оси Z у материала PLA — 0,131 мм, что почти в 6,5 раза выше, чем у материала ABS — 0,02 мм. Таким образом, для материала PLA входные режимы печати являются наиболее критичными. Контрматрица из материала ABS показывает стабильность по оси Z (среднеквадратичное отклонение 0,01–0,02 мм), что говорит о высокой межслойной когезии. При этом материал ABS утрачивает стабильность в плоскости X, где среднеквадратичное отклонение достигает 0,12 мм из-за термической усадки, которая свойственна данному материалу.

3. Оценка сходимости десяти измерений контрольной группы из пяти элементов показывает, что контрматрица из материала ABS имеет повторяемость процесса печати контрматриц выше, чем у контрматрицы из материала PLA. Дисперсии и стандартные ошибки измерений контрольных элементов стабильны по осям Y, Z и стремятся к нулю. Процесс экструзии для материала ABS дает более предсказуемый результат от итерации к итерации. Воспроизводимость геометрии в процессе печати между пятью контрольными элементами на контрматрице для материала PLA равномернее. У контрматрицы из материала ABS наблюдается резкий перепад: элементы в центре и по краям по оси X изменяются из-за усадки, в то время как высота по оси Z воспроизводится эталонно на всей площади стола.

Следовательно, если при воспроизведении всех элементов изображения объекта для изготовления контрматрицы критически важна точность по оси Z, то материал ABS является лучшим вариантом, обеспечивая прецизионную стабильность. Если же критически важны линейные размеры в плоскости осей X и Y, предпочтительнее использовать материал PLA.

Рекомендуется допустить к лабораторным испытаниям для получения оттиска на картоне толщиной от 0,40 до 0,43 мм контрматрицу, изготовленную

из материала PLA с сопоставлением геометрических размеров по X, Y, Z контрольной группы элементов уже на оттиске.

Продолжить исследование контрматриц по двум другим группам критериев «Внешний вид контрматрицы» и «Функциональные и эксплуатационные характеристики контрматрицы» для формирования комплексной оценки на допуск к лабораторным и промышленным испытаниям в условиях типографии.

Список источников / References

1. Козлов Д. Р. Индустрия 4.0. Перспективы и вызовы // Вестник науки и образования. 2017. № 8 (32). С. 30–33. EDN: WQGUUV.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. Москва: Эксмо, 2016. 138 с.
3. Тимохин А. М., Тиунова Е. С. Анализ полиграфического рынка РФ // МедиаВектор. 2022. № 4. С. 111–115. EDN: JQCIGS.
4. Timokhin A. M., Tiunova E. S. Analysis of the printing market of the Russian Federation. *MediaVector*. 2022;4:111–115. EDN: JQCIGS. (In Russ.).
5. Мамедова Л. Э. Г., Лесник Ф. М. Методологические и практические аспекты обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий: цели, задачи и перспективы дальнейшего развития // Вестник Академии знаний. 2025. № 4 (69). С. 361–369. EDN: UYMRUJ.
6. Mamedova L. E. G., Lesnik P. M. Methodological and practical aspects of ensuring competitiveness of industrial enterprises: goals, objectives and prospects for further development. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2025;4(69):361–369. EDN: UYMRUJ. (In Russ.).
7. Horst D., Duvoisin Ch., Vieira R. Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2018;8(8):2454–4698.
8. Греков Г. И. Технологические инновации и синхромаркетинг в полиграфии: новые горизонты // Практический маркетинг. 2025. № 1 (331) С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2025-1331-16-20>. EDN: YJYHQS.
9. Grekov G. I. Technological innovations and synchromarketing in print: New horizons. *Practical Marketing*. 2025;1(331):16–20. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2025-1331-16-20>. EDN: YJYHQS. (In Russ.).
10. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Boston: Springer, 2010. 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>. ISBN 978-1-4419-1119-3. EDN: YDZUZH.
11. Фролова А. Б., Шигапов А. И. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Научные известия. 2022. № 29. С. 198–202. EDN: THYPWV.
12. Frolova A. B., Shigapov A. I. History, current status and development prospects of additive technologies. *Scientific News*. 2022;29:198–202. EDN: THYPWV. (In Russ.).
13. Цветкова Т. М. Исследование рынка аддитивного производства в России // Научные записки молодых исследователей. 2015. № 4. С. 13–21. EDN: VPKFQH.
14. Tsvetkova T. M. Issledovaniye rynka additivnogo proizvodstva v Rossii. *Nauchnye zapiski molodykh issledovatelei = Scientific Notes of Young Researchers*. 2015;4:13–21. EDN: VPKFQH. (In Russ.).
15. Аддитивные технологии — один из драйверов развития промышленности // Аддитивные технологии. 2024. № 2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnye-tehnologii-odin-iz-drayverov-razvitiya-promyshlennosti.html> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Additivnye tekhnologii — odin iz drayverov razvitiya promyshlennosti. *Additive Technologies*. 2024;2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/additivnye-tehnologii-odin-iz-drayverov-razvitiya-promyshlennosti.html> (accessed: 12.01.2026). (In Russ.).
17. Левина Т. А., Кушнир И. С., Глухих Я. М., Ключков А. Я. К вопросу о влиянии параметров процесса на механические свойства 3D-печати FDM: комплексный обзор // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2023. Т. 15, № 3. С. 123–131. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.39.12.017>. EDN: FKMJRJX.
18. Levina T. A., Kushnir I. S., Gluhikh Ya. M., Klovchikov A. Ya. On the influence of process parameters on the mechanical properties of 3D printing FDM: a Comprehensive review. *Herald of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2023;15(3):123–131. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.39.12.017>. EDN: FKMJRJX. (In Russ.).
19. Армашова-Тельник Г. С., Соколова П. Н., Дегтерев Д. В. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82, № 4. С. 347–353. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-347-353>. EDN: OJOJVV.
20. Armashova-Telnik G. S., Sokolova P. N., Degterev D. V. Additive technologies: an Innovative effect digitalization in industry. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020;82(4):347–353. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-347-353>. EDN: OJOJVV. (In Russ.).
21. Трошин А. А., Захаров О. В. Обзор технологических возможностей FDM-3D принтеров // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 1 (28). С. 61–65. EDN: SHUGOC.
22. Troshin A. A., Zakharov O. V. Review of technological capabilities of FDM-3D printers. *Modern materials, equipment and technologies*. 2020;1(28):61–65. EDN: SHUGOC. (In Russ.).
23. Хлыновский А. 3D-печать оснастки при прототипировании изделий из металла // Аддитивные технологии. 2024. № 2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-osnastki-pri-prototipirovanii-izdeliy-iz-metalla.html> (дата обращения: 12.01.2026).
24. Khllynovskiy A. 3D pechat' osnastki pri prototipirovanii izdeliy iz metalla. *Additive Technologies*. 2024;2. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-osnastki-pri-prototipirovanii-izdeliy-iz-metalla.html> (accessed: 12.01.2026). (In Russ.).
25. Жуков А. В., Никифоров А. А., Яковиншин А. С. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) // Вестник СГТУ. 2021. № 4 (91). С. 57–70. EDN: OEGRFD.
26. Zhukov A. V., Nikiforov A. A., Yakovishin A. S. Plastic materials for additive technologies (review). *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2021;4(91):57–70. EDN: OEGRFD. (In Russ.).

Информация об авторе:

ФЕДДЕР Мария Сергеевна, доцент кафедры «Технологии полиграфического производства» Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7552-0950

AuthorID (РИНЦ): 1355338

e-mail: maryfedder@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в пред-

ставленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 01.07.2026; принята к публикации 27.07.2026.

Information about the author:

FEDDER Mariya Sergeyevna, Associate Professor of the Printing Technology Department, Saint Petersburg

State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7552-0950

AuthorID (RSCI): 1355338

e-mail: maryfedder@gmail.com

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 01.07.2026; accepted for publication 27.07.2026.