

УДК 621.792.6

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_170

**ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ
СОЕДИНЕНИЙ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ 3D-ПЕЧАТИ**

**EFFECT OF SOLVENTS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF JOINTS
OF THE BASIC MATERIALS OF 3D-PRINTING**

Ю.П. Крылов, Л.А. Башта, В.А. Прохоров

Y.P. Krylov, L.A. Bashta, V.A. Prokhorov

НПО Спецматериалов

В статье представлены результаты исследования клеящих свойств растворителей для соединения деталей, изготовленных методом 3D-печати из термопластов PLA, ABS и PETG. Рассмотрены три растворителя: дихлорметан, ацетон и тетрагидрофуран в сравнении с цианоакрилатным клеем. Проведены испытания на прочность шва при растяжении, а также анализ влияния комбинаций материалов и растворителей на механические характеристики соединений. Установлено, что цианоакрилатный клей обеспечивает наиболее прочное соединение, когда среди растворителей лучшие результаты показал дихлорметан. Тетрагидрофуран продемонстрировал наихудшие показатели. Комбинирование разнородных материалов приводит к снижению прочности шва на 15–50 % по сравнению с мономатериальными соединениями. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов проектирования и производства составных изделий.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-печать, растворители, клеевые соединения, полимеры, механические испытания, прочность.

The article presents the results of a study of the adhesive properties of solvents for joining parts made by 3D printing from thermoplastics PLA, ABS and PETG. Three solvents, dichloromethane, acetone, and tetrahydrofuran, are considered in comparison with cyanoacrylate glue. The tensile strength of the joint was tested, as well as the analysis of the effect of combinations of materials and solvents on the mechanical characteristics of the joints. It was found that cyanoacrylate glue provides the most durable compound when dichloromethane showed the best results among solvents. Tetrahydrofuran showed the worst performance. The combination of dissimilar materials leads to a decrease in the strength of the seam by 15–50 % compared with monomaterial compounds. The results of the research can be used to optimize the processes of designing and manufacturing composite products.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, solvents, adhesives, polymers, mechanical tests, and strength.

Введение

Аддитивное производство (3D-печать), в число которого входит технология послойного

синтеза (Fused Deposition Modeling, FDM), представляет собой инновационный метод изготовления изделий, принципиально отличающийся от традиционных субтрактивных и формообразую-

щих технологий. В ее основе лежит поэтапное наращивание материала слой за слоем на основе цифровой 3D-модели, что обеспечивает принципиально новые возможности в проектировании и производстве изделий со сложной геометрией. В числе очевидных преимуществ аддитивного производства могут быть отмечены следующие:

- минимизация материальных затрат за счет аддитивного принципа формирования изделий;
- возможность реализации сложных геометрических конфигураций, включая внутренние полости и решетчатые структуры;
- сокращение временных затрат на этапе прототипирования и внедрения новых изделий;
- персонализация продукции без существенного увеличения себестоимости;
- оптимизация массогабаритных характеристик изделий при сохранении функциональных параметров.

Несмотря на значительный потенциал, современные аддитивные технологии характеризуются рядом ограничений:

- высокие затраты на материалы в отличие от стандартных технологий;
- малые объемы производства;
- ограниченный выбор используемых материалов.

Эти факторы существенно сужают область экономически целесообразного применения аддитивных технологий в промышленности.

Именно эти ограничения определяют текущую нишу максимальной эффективности аддитивного производства. Наиболее востребована 3D-печать в мелкосерийном производстве, создании сложных деталей и прототипировании, то есть в сферах, где ценность сложности и кастомизации превосходит затраты. При разработке прототипа важно быстро получить функциональный образец для проверки ключевых параметров. Однако традиционные методы часто требуют много времени на доработку и повторные испытания, что замедляет процесс. 3D-печать ускоряет итерации — изменения вносятся оперативно, а новый вариант прототипа изготавливается в кратчайшие сроки, что значительно сокращает общее время разработки [1, 2].

В таких областях, как робототехника, автомоделирование и протезирование, актуальной является задача интеграции разнородных материалов с целью сочетания их функциональных

свойств. Это включает совмещение механической прочности с гибкостью, термостойкости с низкой плотностью, а также электропроводности с диэлектрическими характеристиками. Для решения таких технологических задач возникает необходимость объединения нескольких отдельных объектов в единую конструкцию [3], при этом материалы соединяемых компонентов могут варьироваться в зависимости от эксплуатационных требований. Подобный подход не только уменьшает материальные затраты и сокращает время производства, но и расширяет функциональные возможности изделий. В частности, он позволяет создавать уплотнительные и демпфирующие элементы [4, 5], а также реализовывать изделия со сложной геометрической конфигурацией, тяжело достижимой при использовании несоставных структур.

Для соединения отдельных элементов в единую структуру возможны несколько вариантов, а именно склеивание и растворение. Можно предположить, что при использовании метода растворения обеспечивается более монолитная и прочная структура соединения тем, что подразумевает частичное поверхностное растворение материала с взаимным проникновением полимерных цепей и их последующей рекристаллизацией, что в то же время требует тщательного подбора растворителей и режимов обработки для разных полимерных материалов [6]. В то время как метод склеивания подразумевает под собой то, что прочность шва будет такой же как у материала склеивания.

В данной статье изложены итоги изучения адгезионных свойств растворителей применительно к основным материалам, используемым в аддитивных технологиях. В рамках исследования:

- определены взаиморастворимые пары полимеров;
- проведены испытания образцов на прочность соединительного шва на разрыв;
- проведен сравнительный анализ прочности клеевых швов в зависимости от растворителя (дихлорметан, ацетон, тетрагидрофуран) или клея.

В работе рассмотрены изделия, изготовленные из термопластов PLA (полилактид), ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) и PETG (полиэтилентерефталат-гликоль). Изделия были по-

делены на группы согласно склеиваемым материалам, а также по виду растворителя, используемого для склейки. Предварительно выполнены испытания на химическую совместимость растворителей с исследуемыми полимерами, результаты приведены в таблице. В результате сформировано 10 испытуемых групп. Для каждой группы были произведены образцы типа А1, общий вид которых показаны на рис. 1. Вид отдельного элемента образца указан на рис. 2.

Образцы изготавливались на 3D-принтере BambuLab X1 Carbon, обеспечивающем скорость печати до 500 мм/с, температуру сопла до 320 °С, ширину линии от 0,1 до 0,8 мм.

Исследование готовых изделий на прочность клеевого шва выполнялось согласно разработанной программе и методике испытаний «Клеящие свойства растворителей для материалов аддитивных технологий», созданной на основе ГОСТ 11262–2017 [7], с использованием машины испытательной универсальной МИМ.1-5-2.1-15.1-1.1.1. Перед испытанием измерялись толщина и ширина образцов в трех местах узкой части, после чего рассчитывались среднеарифметические значения полученных результатов, используя которые вычислялось начальное поперечное сечение образца. Образцы, у которых минимальное и максимальное значение толщины или ширины

различались более чем на 0,2 мм, не допускались до испытаний. Скорость растяжения была равна 3 мм/мин. Нагрузка и удлинение образца измерялись непрерывно.

В ходе исследования были протестированы клеевые соединения на основе трех полимерных материалов: PLA, ABS и PETG, склеенных с использованием трех растворителей: Т (тетрагидрофуран), АС (ацетон) и D (дихлорметан) и клея — G (Цианакрилатный клей). Основной целью работы было определение прочности клеевого шва при растяжении и анализ влияния комбинаций материалов и растворителей на механические характеристики соединений.

Все исследуемые образцы демонстрировали разрушение в зоне клеевого соединения. У каждого из них отсутствовало плато текучести, то есть происходило хрупкое разрушение образцов. Типичный вид графика зависимости усилия от времени, отражающего данное поведение, приведен на рис. 3.

Установлено, что образцы с комбинированными материалами показали меньшую прочность на 15–50 % по сравнению с мономатериальными аналогами. Данные результаты могут быть обусловлены низкой степенью совместимости материалов, недостаточной диффузионной активностью на границе раздела, а также не-

Таблица

Результаты испытаний растворимости материалов

Материал Растворитель	ПАО «Химпром» дихлорметан, ХЧ	ГК «Ясхим» ацетон технический	ООО «Технопайка» тетрагидрофуран
ESun PLA, белый	+	–	+
ESun ABS, черный	+	+	+
FDPlast PETG, серый	+	–	+
+ — химически совместимы; – — химически несовместимы			

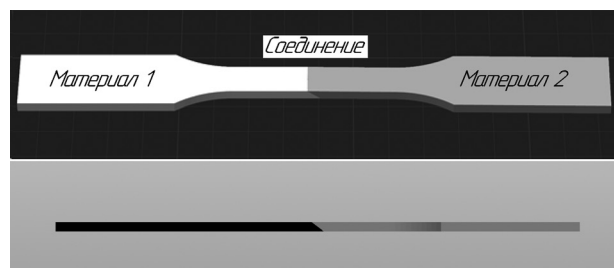


Рис. 1. Пример образца для испытаний

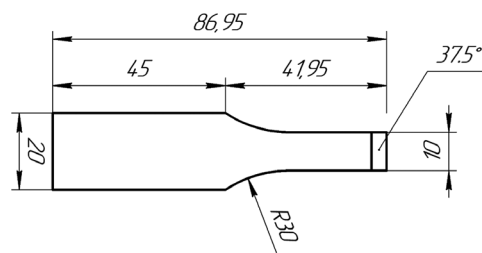


Рис. 2. Вид отдельного элемента испытуемого образца

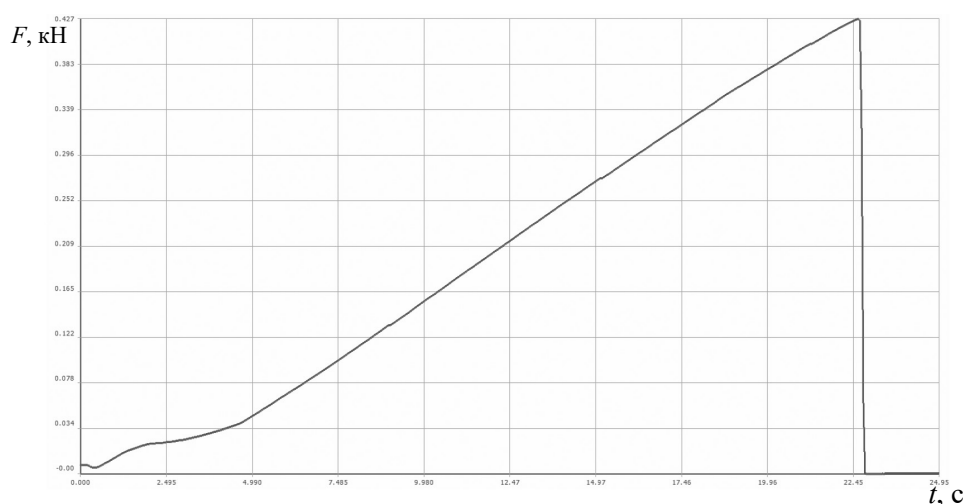


Рис. 3. График зависимости усилия от времени образца ABS-T-ABS

достаточностью объема растворителя в зоне соединения. Результаты исследования прочности на растяжение приведены на рис. 4 и 5. На данных диаграммах не указан PLA-T-PLA из-за того, что образцы ломались при фиксации в испытательной машине, что указывает на чрезмерную хрупкость шва данной испытуемой группы.

Также установлено, что цианоакрилатный клей (G) обеспечил наиболее прочные швы во всех группах, особенно с PLA (29,4 МПа) и PETG (26,43 МПа). Дихлорметан (D) обеспечил наиболее прочные соединения из всех выбранных растворителей. Ацетон (AC) показал хорошие результаты с ABS (19,19 МПа). Тетрагидрофуран (T) продемонстрировал наихудшие показатели прочности клеевого шва:

ABS-T-ABS — 12,99 МПа (на 36 % менее прочный по сравнению с ABS-D-ABS);

PETG-T-PETG — 14,79 МПа (на 20 % менее прочный по сравнению с PETG-D-PETG);

PETG-T-ABS — 11,53 МПа (на 23 % менее прочный по сравнению с PETG-D-ABS);

PLA-T-ABS — 11,21 МПа (на 35 % менее прочный по сравнению с PLA-D-ABS).

Это может быть связано с частичным растворением полимерной матрицы под его воздействием, что приводит к снижению структурной целостности образца, а также с неполным растворением компонентов вследствие интенсивного испарения растворителя, что провоцирует формирование пористой микроструктуры, или недостаточной диффузионности, что приводит к повышению хрупкости адгезионного шва.

При анализе деформационных характеристик было выявлено, что:



Рис. 4. Диаграммы предела прочности опытных образцов

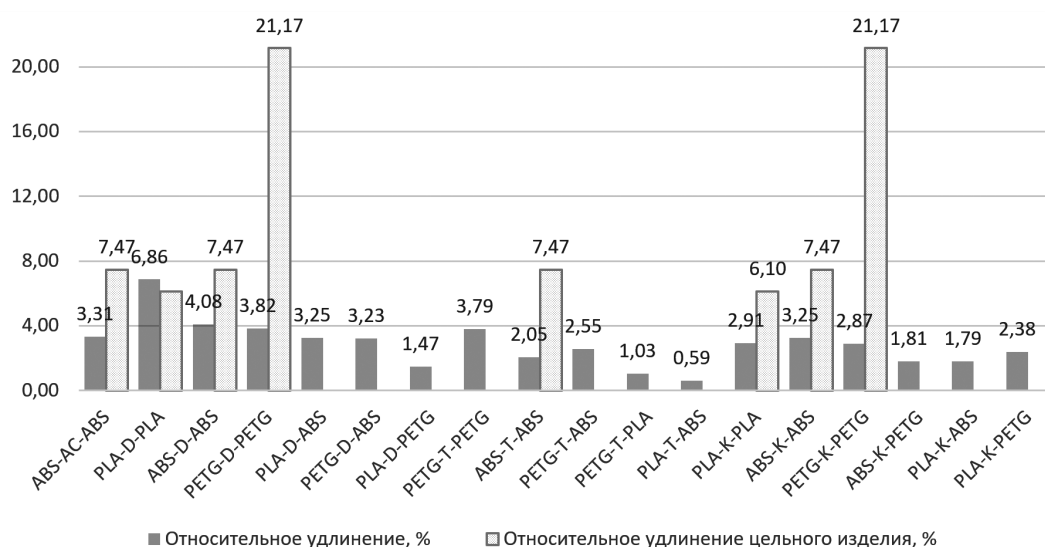


Рис. 5. Диаграммы относительного удлинения опытных образцов при растяжении

– максимальная прочность шва на разрыв оказалась у соединения с использованием цианоакрилатного клея;

– наибольшее удлинение при разрыве отмечено у PLA-D-PLA (6,86 %), что свидетельствует о высокой пластичности соединения;

– комбинированные образцы (PLA-D-PETG, PETG-T-ABS) показали минимальные значения удлинения (0,59–2,55 %), что указывает на хрупкость шва.

Заключение

Результаты испытаний показали, что цианоакрилатный клей обеспечивает наиболее прочное соединение для всех исследованных материалов. Среди растворителей лучшие результаты демонстрирует дихлорметан, тогда как тетрагидрофуран оказался наименее эффективным из-за его разрушающего воздействия на полимеры. Кроме того, комбинирование разнородных материалов (PLA-PETG, PETG-ABS) приводит к значительному снижению прочности по сравнению с соединениями из одного материала.

Эти результаты важны для сложных изделий, где критична долговечность и устойчивость к нагрузкам. При этом следует учитывать влияние возможных погрешностей: отклонения могли возникнуть из-за неидеальных условий склеивания образцов, вариативности свойств материала или человеческого фактора при из-

мерениях. Для повышения точности в дальнейших исследованиях рекомендуется увеличить количество образцов, изменить форму и размеры образца для меньшего влияния разницы в объеме растворителя, провести повторные испытания.

С помощью этих данных можно усовершенствовать производственные процессы, снизить вероятность брака и увеличить надежность готовой продукции. Полученные данные позволят создавать более точные трехмерные и численные модели, что ускорит и повысит точность перехода от прототипа к изделию. Кроме того, это откроет возможность производства конечных продуктов с заданными техническими требованиями к отдельным частям изделия.

Подводя итог, можно сказать, что в ходе данной работы группой сотрудников АО «НПО Спецматериалов» были решены следующие задачи:

– проведено исследование возможности использования растворителей в качестве адгезивного средства для соединения деталей, изготовленных из разнородных материалов, в процессе производства изделий;

– исследованы механические свойства клевого шва различных материалов для 3D-печати, склеенных с помощью различных растворителей, что дает возможность создавать более точные трехмерные и числовые модели, и также быстрее и точнее переходить от прототипа к изделию;

– установлено, что прочность клеевого шва в лучшем случае на 54 % ниже, чем у изделия произведенного целостным;

– установлено, что при изготовлении составных элементов изделия целесообразно использовать однородные материалы, поскольку это обеспечивает повышенную прочность клеевого соединения благодаря усилению диффузионных процессов на границе контакта.

Помимо этого, были также намечены для решения новые исследовательские задачи по данному направлению.

В частности:

– исследование других механических и физических свойств изделий, получаемых при помощи аддитивного производства;

– исследование способов увеличения прочностных характеристик изделий, получаемых при помощи 3D-печати;

– рассмотрение возможности использования гибких (резиновых) материалов для 3D-печати для создания частей БПЛА, например резиновых прокладок или виброгасящих стоек;

– исследование устойчивости материалов 3D-печати к ультрафиолетовому излучению.

Список источников

1. Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Красников В.И. Применение аддитивных технологий для прототипирования и изготовления составных частей БПЛА // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 5–6 (191–192). С. 130–136.

2. Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Тархов Н.Ю. Влияние добавок из стекла и карбона на физико-механические свойства термопластов для 3D-печати // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2025. № 1–2 (199–200). С. 137–143.

3. Прошин А.А., Горячев Н.В., Горячева Е.П., Каракулов Е.С. и др. Области применения 3D-принтеров // Робототехника и системный анализ. Т. 1. 2015. С. 95–105.

4. Клейменов В.В. Технологии и материалы 3D-печати для запасных частей производственного оборудования // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII Международной научно-практической конференции, Сара-

тов, 01–30 апреля 2017 года. Саратов: ООО «ЦесАин», 2017. С. 125–128.

5. Торубаров И.С. и др. Развитие технологии 3D-печати с армированием непрерывным волокном // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8. С. 81–86.

6. Максимкин М.А. Исследование методов обработки поверхностей, изготовленных filamentной 3D-печатью // Альманах современной метрологии. 2019. № 3 (19). С. 72–75.

7. ГОСТ 11262–2017 – Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018. 20 с.

References

1. Kulakov K.S., Krylov Yu.P., Krasnikov V.I. Application of additive technologies for prototyping and manufacturing of UAV components // Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism. 2024. No 5–6 (191–192). Pp. 130–136.

2. Kulakov K.S., Krylov Yu.P. and Tarkhov N. Yu. The effect of glass and carbon additives on the physical and mechanical properties of thermoplastics for 3D printing // Issues of Defense Technology. Series 16. Technical Means of Countering Terrorism. 2025. No 1–2 (199–200). Pp. 137–143.

3. Proshin A.A., Goriachev N.V., Goriacheva E.P., Karakylov E.S. Application areas of 3D printers // Robotics and Systems Analysis. Vol. 1. 2015. Pp. 95–105.

4. Kleymenov V.V. Technologies and materials of 3D printing for spare parts of production equipment // Actual problems of energy of the agro-industrial complex: materials of the VIII international scientific and practical conference, Saratov, April 01–30, 2017. Saratov: LLC «Tsesain», 2017. Pp. 125–128.

5. Torubarov I.S. et al. Development of 3D printing technology with continuous fiber reinforcement // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. No 8. Pp. 81–86.

6. Maksimkin M.A. Research of methods of processing surfaces made by filament 3D-printing // Almanakh sovremennoi metrologii. 2019. No 3 (19). Pp. 72–75.

7. GOST 11262–2017 – Plastics. Tensile testing method. Moskva: Standartinform, 2018. 20 p.