

УДК 678.674:678.046.2:004.356.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА КОМПАУНДА НА ОСНОВЕ PETG (ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГЛИКОЛЯ) С ДОБАВЛЕНИЕМ КАРБОНОВОГО ВОЛОКНА

Шматов Андрей Игоревич,

ООО «Эргопластика», коммерческий директор. E-mail: production@ergoplastika.ru

Аннотация

Острая потребность высокотехнологичных отраслей, в частности аэрокосмического сектора и производителей беспилотных систем, в прочных материалах для печати высоконагруженных узлов требует поиска эффективных альтернатив дорогим импортным инженерным пластикам. В представленной работе спроектирован и практически отработан технологический процесс получения специализированного углеронаполненного компаунда на базе полиэтилентерефталат-гликоля (PETG). Отличительной особенностью предложенного производственного алгоритма служит применение малеата ПЭВД в качестве химического совместителя, обеспечивающего надежную межфазную адгезию армирующей нити и основы. Одновременно задействование прецизионного двухпикового температурного профиля при экструдировании позволяет минимизировать термическую деструкцию полимерной матрицы. Эмпирические испытания подтвердили, что синтезированный композит обладает пределом прочности на изгиб в диапазоне 3,5-4,0 ГПа. Полученный филамент стабильно формуется на 3D-принтерах открытого типа и оказывается в 2-2,5 раза дешевле зарубежных аналогов. Внедрение такого продукта формирует независимую и рентабельную отечественную сырьевую базу для современного аддитивного производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, карбоновое волокно, компаундирование, малеат ПЭВД, полиэтилентерефталат-гликоль (PETG), прочность на изгиб, филамент

TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PRODUCING A COMPOUND BASED ON PETG (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL) WITH THE ADDITION OF CARBON FIBER

Shmatov Andrei Igorevich,

LLC "Ergoplastika", Commercial Director. E-mail: production@ergoplastika.ru

ABSTRACT

The acute need of high-tech industries, in particular the aerospace sector and unmanned systems manufacturers, for durable materials for printing high-load components requires effective alternatives to expensive imported engineering plastics. This study designs and practically tests a technological process for producing a specialized carbon-filled compound based on polyethylene

terephthalate glycol (PETG). A distinctive feature of the proposed production algorithm is the use of LDPE maleate as a chemical compatibilizer, which provides reliable interfacial adhesion between the reinforcing fiber and the matrix. At the same time, a precision two-peak temperature profile during extrusion makes it possible to minimize thermal degradation of the polymer matrix. Empirical tests confirmed that the synthesized composite has a flexural strength of 3.5–4.0 GPa. The resulting filament is stably formed on open-type 3D printers and is 2–2.5 times cheaper than foreign analogues. The introduction of this product forms an independent and cost-effective domestic raw material base for modern additive manufacturing.

Keywords: additive manufacturing, carbon fiber, compounding, LDPE maleate, polyethylene terephthalate glycol (PETG), flexural strength, filament

Введение. Аддитивное производство давно перестало быть исключительно инструментом для создания визуальных макетов и заняло нишу полномасштабного изготовления функциональных деталей [2, 3]. Переход от концептуального моделирования к выпуску серийной продукции требует тщательного пересмотра применяемой сырьевой базы. Одной из наиболее значимых проблем отрасли в целом ряде промышленных секторов является острая нехватка материалов (филаментов), которые пригодны для конструирования ответственных узлов, соответствующих строгим эксплуатационным требованиям.

В сопоставлении с более ранними подходами, мировая химическая индустрия предложила специальные импортные составы (PETG CF, PCTG, различные армированные нейлоны). Данные инженерные решения обладают более высокими значениями прочности на изгиб, которые достигают 2,5-3,0 ГПа, а для отдельных марок – вплоть до 4,5 ГПа, что полностью покрывает запросы конструкторов [7]. Впрочем, рассматриваемые материалы отличаются весьма сложным профилем печати: они требуют наличия закрытых термокамер, прецизионного температурного контроля и, как следствие, высокой квалификации персонала. Помимо этого, высокая отпускная стоимость делает их интеграцию в массовое производство экономически нецелесообразным шагом. Технически эти решения удовлетворяют запросам аэрокосмического сектора, однако их дороговизна, капризность в обработке, тотальная зависимость от зарубежных поставок с учетом рисков логистических блокад делают их малопригодными для масштабного внедрения на отечественных предприятиях, особенно в условиях СВО. Преодоление указанного разрыва диктует необходимость создания отечественного продукта с оптимизированными свойствами.

Основной целью данной работы служит исследование и оптимизация технологии производства специализированного компаунда на основе PETG с добавлением карбонового волокна (углеволокна). Данная полимерная матрица предназначена для последующего изготовления высоконагруженных изделий, которые обладают повышенными прочностными характеристиками (в первую очередь, посредством метода 3D-печати), что призвано обеспечить эффективное импортозамещение в стратегически важных отраслях. Техничко-экономическая задача заключалась в получении состава с прочностью на изгиб на уровне 3,5-4,0 ГПа, доступной себестоимостью, максимально простым алгоритмом экструдирования на открытых машинах операторами минимальной квалификации.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели специалистами отдела НИОКР ООО «Эргопластика» (г. Рязань) был спроектирован, а затем практически отработан производственный цикл создания композиции на базе полиэтилентерефталат-гликоля и углеродного наполнителя. В ходе серии экспериментов

осуществлялся подбор наиболее действенных режимов подготовки сырья, выстраивание оптимального термического профиля вкупе с прецизионной калибровкой массовых долей компонентов.

Первичная подготовка матричного полимера включала сушку гранул PETG в специализированной сиккативной установке при температуре 65°C на протяжении трех часов. Далее следовало их постепенное естественное охлаждение. Данный этап весьма значим для удаления сорбированной влаги, препятствующей гидролитической деструкции макромолекул при последующем интенсивном нагреве. Затем осуществлялось измельчение гранулята на дисковой мельнице с вертикальным позиционированием рабочих элементов. Целевой размер полимерных частиц составил 50-150 мкм (такая дисперсность достигала 90 % от общего объема), после чего применялся рассев массы на вибросите для исключения нежелательной мелкой пылевой фракции.

Примечательно, что для обеспечения надежной межфазной адгезии между химически инертным углеродным наполнителем и полимерной матрицей применялся специальный совместитель – малеат полиэтилена высокого давления (ПЭВД). Этот агент выступал одновременно в роли эффективного смачивателя поверхности армирующих нитей и химического «моста», который обеспечивает ковалентное совмещение малеиновой и гликолевой групп. В отличие от предыдущих подходов, зачастую требующих тщательной дегидратации абсолютно всех функциональных добавок, совместитель вводился в измельченном виде без предварительной термической сушки. Подобное технологическое допущение объясняется его очень низким влагопоглощением при условии строгого хранения в герметичной закрытой таре.

Гомогенизация сырья выполнялась в высокоскоростном миксере контейнерного типа с планетарным движением двух винтов. Полученная масса анализировалась на предмет однородности распределения фаз с задействованием оптического спектрофотометра. Параллельно измерялся краевой угол откоса для оценки динамической сыпучести смеси в бункере дозатора, функционирующего без виброактиватора.

Экструдирование и компаундирование с различными марками углеродных волокон проводилось на промышленном двухшнековом экструдере, имеющем диаметр шнеков 30 мм и соотношение длины к диаметру (L/D), равное 44. Инструментальные испытания осуществлялись при строго идентичных нагрузочных и температурных параметрах с варьированием лишь процента ввода армирующей фазы. Основные физико-механические параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры технологического процесса
(составлено автором)

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура расплава	°C	220
Давление расплава	Бар	10
Нагрузка на валу	%	70
Обороты шнека	Об/мин	220
Обороты дозатора	Об/мин	40
Обороты гранулятора	Об/мин	1400

В качестве армирующего агента тестировались углеродные волокна от различных производителей, в том числе, поставщиков из Китая, Германии, а также отечественное сырье (углеродное волокно UFC производства ООО «ЗУКМ», г. Челябинск).

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим специфику различных промышленных сегментов, где внедрение трехмерной печати открывает новые горизонты. В

аэрокосмической отрасли, а также при выпуске беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), очень важны высокая механическая надежность комплектующих – рам, лучей, моторных отсеков [4, 6]. Дополнительно требуется предельная простота формообразования, в том числе, возможность оперативного создания деталей непосредственно в полевых условиях. В автомобилестроении и на транспорте акцент смещается в сторону снижения общей массы конструктивных кронштейнов, панелей, различных кожухов при сохранении необходимого уровня жесткости (предельная температура эксплуатации здесь обычно не превышает 70°C) [3]. Одновременно с этим, промышленное прототипирование (технологическая оснастка, шаблоны, кондукторы) остро нуждается в сырье, благодаря которому обеспечивается стабильность геометрии при многократном механическом воздействии [5]. Электронная промышленность, в свою очередь, предъявляет жесткие требования к устойчивости размеров корпусов и держателей печатных плат при резких температурных колебаниях.

Между тем, присутствующие на рынке универсальные нити, такие, как PETG (полиэтилентерефталат-гликоль), PLA или ABS, демонстрируют предел прочности на изгиб лишь в узком диапазоне 1,5-2,0 ГПа [1]. Разумно предположить, что подобные физические показатели являются совершенно недостаточными для силовых элементов тех же беспилотных аппаратов. Средний, а зачастую и низкий уровень жесткости закономерно приводит к деформации деталей под рабочей нагрузкой, провоцируя возникновение паразитных вибраций, которые, по-видимому, могут фатально нарушить функционирование чувствительных бортовых гироскопов. Вследствие этого отметим, что стандартные виды пластиков оказываются пригодными, в основном, для прототипирования и сборки узлов, некритичных к физическим воздействиям.

В практической части процесс плавления и диспергирования требовал настройки теплового режима. Температурный профиль рабочей зоны экструдера был разделен на 11 функциональных участков и имел два выраженных пика нагрева, достигающих отметки 240°C. Формирование двух температурных максимумов обусловлено необходимостью последовательного решения термодинамических задач: первичного смачивания волокон высоковязким расплавом, их дальнейшего равномерного распределения в объеме матрицы, финального прогрева массы непосредственно перед выходом в стренги для последующего гранулирования. Описываемый ступенчатый подход позволяет свести к минимуму термическую деструкцию гликолевых звеньев, сохраняя молекулярную массу полимера на требуемом расчетном уровне (табл. 2).

Таблица 2 – Температурный профиль рабочей зоны экструдера
(составлено автором)

Зона экструдера	Фактический температурный профиль, °C	Заданный температурный профиль, °C
1	200	200
2	210	210
3	220	220
4	230	230
5	240	240
6	240	240
7	230	230
8	220	220
9	210	210
10	220	220
11/Г	230	230

Следует также обратить внимание на кинематику процесса. Грануляция расплава осуществлялась при максимальных скоростях тянущего устройства. Интенсивная вытяжка перед нарезкой стренг применялась с целью направленной пространственной ориентации углеродного наполнителя вдоль оси вытяжки. Как следствие, сформированная макроструктура гранул закладывала технологическую основу для нужной анизотропии механических свойств будущего филамента. Готовый композитный продукт подвергался финальной сушке при 65°C в течение трех часов, после чего фасовался в герметичные клапанные полиэтиленовые мешки, которые исключают контакт с атмосферной влагой.

На базе полученного сырья с использованием специализированного лабораторного оборудования были изготовлены тестовые партии филаментов. Дальнейшая 3D-печать тестовых образцов и их физико-механические испытания подтвердили достижение целевых показателей: прочность готовых изделий на изгиб зафиксирована в диапазоне 3,5-4,0 ГПа. Одновременно эмпирически подтверждена способность материала стабильно экструдироваться на машинах открытого типа, что снижает порог внедрения и требования к квалификации обслуживающего персонала. С финансово-экономической точки зрения новый отечественный продукт оказался в 2-2,5 раза дешевле зарубежных аналогов, обладающих сопоставимыми характеристиками структурной жесткости.

В связи с полученными результатами сформулированы прикладные рекомендации. Разработанный филамент уже интегрирован в производственные цепочки предприятий, специализирующихся на выпуске беспилотных аппаратов. Это обеспечивает оперативное изготовление корпусов, рам, обтекателей и силовых кронштейнов из отечественного сырья. Новизна проявляется в возможности развертывания аддитивного производства функциональных деталей непосредственно в полевых ремонтных подразделениях, поскольку разработанный материал лишен склонности к температурной усадке и не требует громоздких закрытых принтеров. Помимо этого, для автомобильного сегмента данный углеронаполненный PETG может рассматриваться как замена тяжелым алюминиевым сплавам при изготовлении неответственных нагруженных элементов салона и подкапотного пространства; это снижает массу транспортных средств без потери эксплуатационной надежности.

Выводы. Спроектированный технологический процесс производства компаунда на базе полиэтилентерефталат-гликоля с добавлением карбонового волокна является научно обоснованным и экономически целесообразным решением. Тщательно выверенный алгоритм подготовки компонентов предусматривает использование малеата ПЭВД в качестве химически активного совместителя, а также применение двухпикового температурного профиля при экструзии, что обеспечивает гомогенизацию и правильную пространственную ориентацию армирующей фазы.

Представленный композитный материал дает возможность полностью нивелировать фундаментальные недостатки стандартных полимеров, увеличив прочность готовых напечатанных изделий до уровня 3,5-4,0 ГПа. Предположительно, данный подход задает новый стандарт качества для бюджетного сегмента сырья. При этом удастся избежать технологических трудностей, которые традиционно сопровождают работу с тугоплавкими инженерными пластиками, так как новый филамент демонстрирует исключительную стабильность при формообразовании на оборудовании открытого типа. Практическая и стратегическая значимость работы заключается в формировании независимой отечественной сырьевой базы, способной бесперебойно обеспечивать усиливающиеся нужды аэрокосмического, транспортного, электронного секторов в реалиях жестких санкционных ограничений и экономической турбулентности. Дальнейшие исследования, по-видимому, уместно сфокусировать на детальном изучении усталостной прочности

напечатанных структур и их поведении при длительных циклических температурных нагрузках.

Список литературы:

1. Жуков, А.В. Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) / А.В. Жуков, А.А. Никифоров, А.С. Яковичин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2021. – № 4 (91). – С. 57-70.
2. Кожиев, А.Ю. Аддитивное производство в авиации: текущее состояние и перспективы развития / А.Ю. Кожиев // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14. – № 7-1. – С. 429-435.
3. Куйчиев, О.Р. Использование аддитивных технологий в производстве автомобильных компонентов, анализ механических свойств / О.Р. Куйчиев // Экономика и социум. – 2024. – № 8 (123). – С. 300-302.
4. Кулаков, К.С. Применение аддитивных технологий для прототипирования и изготовления составных частей БПЛА / К.С. Кулаков, Ю.П. Крылов, В.И. Красников // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2024. – № 5-6 (191-192). – С. 130-136.
5. Куренков, А.С. Промышленный дизайн, макетирование, прототипирование / А.С. Куренков, С.А. Дмитриев, М.С. Капустин, Т.Р. Велиев // Локомотив. – 2021. – № 5 (774). – С. 6-8.
6. Цуканова, Т.В. Преимущество 3D-печати деталей для беспилотных летательных аппаратов / Т.В. Цуканова // Вестник научных конференций. – 2025. – № 2-1 (114). – С. 109-111.
7. Economides, A.L. Additively manufactured carbon fibre PETG composites: effect of print parameters on mechanical properties / A.L. Economides, M.N. Islam, K.P. Baxevanakis // Polymers. – 2024. – Т. 16. – №. 23. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/23/3336> (дата обращения: 29.06.2026).

References:

1. Zhukov, A.V. Plastics for additive technologies (review) / A.V. Zhukov, A.A. Nikiforov, A.S. Yakovichin // Bulletin of Saratov State Technical University. – 2021. – No. 4 (91). – Pp. 57-70.
2. Kozhiev, A.Yu. Additive manufacturing in aviation: current state and development prospects / A.Yu. Kozhiev // Economics: Yesterday, Today, Tomorrow. – 2024. – Vol. 14. – No. 7-1. – Pp. 429-435.
3. Kuychiev, O.R. The use of additive technologies in the production of automotive components, analysis of mechanical properties / O.R. Kuychiev // Economics and Society. – 2024. – No. 8 (123). – Pp. 300-302.
4. Kulakov, K.S. Application of additive technologies for prototyping and manufacturing components of UAVs / K.S. Kulakov, Yu.P. Krylov, V.I. Krasnikov // Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism. – 2024. – No. 5-6 (191-192). – Pp. 130-136.
5. Kurenkov, A.S. Industrial design, modeling, prototyping / A.S. Kurenkov, S.A. Dmitriev, M.S. Kapustin, T.R. Veliev // Locomotive. – 2021. – No. 5 (774). – Pp. 6-8.

6. Tsukanova, T.V. Advantage of 3D printing of parts for unmanned aerial vehicles / T.V. Tsukanova // Bulletin of Scientific Conferences. – 2025. – No. 2-1 (114). – Pp. 109-111.
7. Economides, A.L. Additively manufactured carbon fibre PETG composites: effect of print parameters on mechanical properties / A.L. Economides, M.N. Islam, K.P. Baxevanakis // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – No. 23. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/23/3336> (accessed: 06/29/2026).