СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

А. С. Петровский

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

Проанализированы технологии 3D-печати армированных композитов. Представлена характеристика способов решения проблемы межфазного взаимодействия при получении металломатричных композитов. Рассмотрены схемы роботизированной печати для формирования полимерных композитов.

Ключевые слова: металломатричные композиты, полимерные композиты, аддитивные технологии, роботизированная печать.

Композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из матрицы и армирующего элемента, обладающего высокой прочностью. В отличие от традиционных материалов композиты позволяют совмещать в себе лучшие свойства каждого из компонентов, обеспечивая повышенную прочность, легкость, износостойкость и устойчивость к внешним воздействиям [1]. Современное машиностроение требует создания изделий с высокой удельной прочностью и сложной внутренней архитектурой. Интеграция аддитивных технологий с промышленными роботами открывает возможности для производства пространственно-армированных композитов, обладающих особыми свойствами [2–4].

Целью настоящего исследования является анализ современных тенденций в развитии аддитивных технологий и совершенствовании армированных композиционных материалов для определения наиболее перспективных направлений в производстве высоконагруженных деталей.

Наиболее широко применяемыми армированными композитами для различных отраслей промышленности являются металломатричные (ММК) и полимерные (ПКМ) композиты

Аддитивное производство позволяет преодолеть фундаментальную проблему традиционных методов (литье, порошковая металлургия) – плохую смачиваемость между керамическим армированием и металлической матрицей.

Исследования подтвердили эффективность использования микрочастиц нитрида циркония (ZrN) в алюминиевом сплаве при получении алюмоматричных композитов. Химическое взаимодействие ZrN с расплавом обеспечивает образование дополнительных упрочняющих фаз. Такое решение актуально для 3D-печати деталей, работающих в экстремальных условиях.

Установлено, что для получения титаноматричных композитов армирование титана непрерывными волокнами (борными или карбидокремниевыми) обеспечивает их меньшую растворимость в матрице при лазерном воздействии во время 3D-печати, что позволяет сохранить их армирующие свойства и значительно повысить ударную стойкость получаемых покрытий.

В области производства армированных ПКМ с применением аддитивных технологий наиболее доступным способом повышения жесткости и термостойкости является армирование короткими волокнами (PLA-CF, нейлон-CF). Однако ключевой прорыв связан с использованием непрерывного волокна, позволяющим создавать

изделия с максимальной прочностью за счет укладки волокна как послойно, так по сложным пространственным траекториям [3].

Согласно концепции стандартизации процессов, предложенной Мюнхенским университетом для систематизации многообразия технологических решений, выделяют пять основных схем реализации роботизированной 3D-печати непрерывно армированных ПКМ:

1. *In situ* пропитка. Принцип заключается в пропитке сухого непрерывного волокна (углеродного, базальтового, оптического) полимером непосредственно в экструзионной головке с последующим отверждением. Данный метод используют для комбинирования структурных и функциональных волокон, подбирая матрицу под требования по механическим свойствам и теплостойкости.

2. Коэкструзия препрега предполагает коэкструзию предварительно подготовленного препрега с добавлением термопласта для улучшения адгезии между слоями. В качестве матрицы используют низкотемпературные термопласты (поликарбонат, полилактид, термопластичный полиуретан), армирование осуществляют препрегами на основе углеродных, арамидных и борных волокон.

3. Экструзия препрега основана на экструзии полностью готового препрега, пропитанного термопластичным полимером. Преимущества данной схемы – высокая степень пропитки волокна, широкий выбор армирующих наполнителей и точный контроль состава материала.

4. *In situ* консолидация (автоматизированная укладка). Технология уплотнения «на месте» использует ленточный препрег, который нагревается дополнительным источником тепла на выходе из сопла и прижимается к поверхности прикаточным роликом. Данный подход позволяет использовать высокотемпературные термопласты семейства полиэфиркетонов (PEEK, PEKK).

Примером реализации является система роботизированной аддитивной печати (SCRAM), которая обеспечивает:

– 6 степеней свободы (против стандартных 2,5);

– вращающуюся платформу и климат-контроль;

– возможность точного управления ориентацией армирующих волокон для создания аэродинамических поверхностей.

5. Поточная пропитка – гибридный процесс, объединяющий традиционную подготовку композитных волокон (пропитку) с их последующим аддитивным нанесением через сопло на платформу построения [5].

Некоторые физико-механические характеристики современных материалов, применяемых для 3D-печати армированных композитов, представлены в таблице.

Физико-химические характеристики

Наименование материала	**σ_u, МПа**	***E*, ГПа**	**ρ, г/см³**	**УП, кДж/м²**	**Преимущество перед аналогом**
Al + ZrN	350–500	80–100	2,8	10–15	Прочность выше на 40–70 %, чем у AlSi10Mg
Ti + волокна	1200–2000	150–300	3,8–4,2	60–120	Прочность выше в 2–3 раза Ti-6Al-4V
PLA-CF	70–110	6–10	1,.25	3–5	Жесткость выше в 2–3 раза PLA
Nylon-CF	120–160	8–12	1,15	6–8	Прочность выше на 40–60 % , чем у нейлона

Окончание

Наименование материала	**σ_u, МПа**	***E*, ГПа**	**ρ, г/см³**	**УП, кДж/м²**	**Преимущество перед аналогом**
ПКМ + непрерывное волокно	700–1500	50–120	1,3–1,5	20–40	Прочность выше в 10–20 раз ABS/PLA
PEEK/PEKK + + волокно	1500–2500	120–180	1,4–1,5	30–50	Выдерживает более высокие температуры, чем PEEK

Из данных таблицы следует, что наряду с совершенствованием 3D-печати армированных композитов совершенствуются и материалы, применяемые для данной технологии.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения является аддитивное производство непрерывно армированных композитов.

Аддитивные технологии получения металломатричных композитов обеспечивают возможность создания деталей из алюмоматричных и титаноматричных композитов, способных работать в экстремальных условиях авиационной и атомной отраслей.

В области полимерных композитов ключевым достижением является переход от послойного синтеза к роботизированной пространственной укладке непрерывного волокна. Рассмотренные современные схемы 3D-печати таких композитов позволяют изготавливать изделия с максимальной прочностью и жесткостью, недостижимой при использовании дискретного армирования. Наиболее технологически гибкими являются системы на базе промышленных роботов с 6 степенями свободы (например, SCRAM), обеспечивающие климат-контроль и возможность управления ориентацией волокон для создания сложных аэродинамических контуров.

Сегодня аддитивные технологии продолжают совершенствоваться. Основными направлениями развития являются разработка новых композиционных материалов, обладающих способностью к самовосстановлению, биодеградации, программируемыми свойствами такими, как изменение формы под воздействием внешних факторов [5].

Широкие перспективы для производства высоконагруженных деталей из непрерывно армированных композитов открывает интеграция аддитивных технологий с промышленной робототехникой. Дальнейшее развитие направления связано с расширением номенклатуры высокотемпературных термопластов и совершенствованием методов многоосевой укладки волокна при получении армированных композитов для авиационной, космической, морской и атомной промышленности.

Литература

1. Джонс, Р. М. Механика композитных материалов / Р. М. Джонс – CRC Press, 2018. – 564 с.
2. Бобрышева, С. Н. Современные полимерные композиционные материалы в машиностроении / С. Н. Бобрышева, И. Ю. Ухарцева // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28 нояб. 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024.– С. 69–71.
3. Петровский, А. С. Композиционные материалы для прототипирования в машиностроении / А. С. Петровский, И. Ю. Ухарцева // Инновационные технологии в агропромышленном комплекс – сегодня и завтра : сб. ст. 9-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 5 нояб. 2025 г. : в 2 ч. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 137–140
4. Петровский, А. С. Современные композиционные материалы для аддитивных технологий в машиностроении / А. С. Петровский // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Тех-

нологии. Робототехника : тез. Междунар. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 188–190.
5. Ковалев, С. П. Металлические композиционные материалы: перспективы и проблемы / С. П. Ковалев // Материаловедение. – 2019. – № 6. – С. 52–58.

МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ СПЛАВЫ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А. О. Селицкий

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель И. Ю. Ухарцева

Рассмотрены принципы формирования структуры металлополимерных систем. Проанализированы ключевые преимущества металлополимерных сплавов и области их применения в авиационно-космической отрасли. Определены основные этапы развития данного класса материалов до 2030 г.

Ключевые слова: металлополимерные сплавы, гибридные композиты, авиационная и ракетно-космическая техника, СИАЛ.

Современное авиа- и ракетостроение предъявляет все более жесткие требования к конструкционным материалам: снижение массы, повышение ресурса, обеспечение живучести при циклических и ударных нагрузках, а также устойчивость к внешним воздействующим факторам. Одним из наиболее перспективных направлений в решении этих задач является использование металлополимерных сплавов (МПС) – гибридных слоистых материалов, сочетающих несущую способность металлических сплавов с функциональными свойствами полимерных композитов.

Цель настоящего исследования – проанализировать и систематизировать данные о структуре, свойствах и практическом применении металлополимерных сплавов в авиакосмической отрасли, а также определить основные тенденции их развития на ближайшую перспективу.

Металлополимерные сплавы представляют собой гибридные композитные системы, образованные чередующимися слоями металлических сплавов (алюминиевые или титановые сплавы) и слоями полимерных композитов на основе углеродных, стеклянных или органических волокон. Такое архитектурное решение позволяет реализовать принцип синергии: металлическая составляющая обеспечивает пластичность, электропроводность и стойкость к локальным разрушениям, а полимерные слои вносят вклад в снижение плотности, высокое демпфирование и коррозионную стойкость [1, 2].

Формирование структуры осуществляется преимущественно методами автоклавного и вакуумного формования с использованием термореактивных связующих. Ключевым параметром является качество межслойной границы, определяющее совместную работу разнородных материалов при циклическом нагружении.

Применение металлополимерных сплавов в конструкциях летательных аппаратов обеспечивает ряд значимых преимуществ по сравнению с монолитными металлическими и традиционными композиционными материалами. Основными преимуществами таких материалов являются следующие [3]:

1. *Живучесть*. Основным фактором, определяющим безопасность полета, является способность материала сопротивляться распространению усталостных трещин.