

doi: 10.51639/2713-0576_2026_6_3_92

Научная статья

УДК 621.86

ГРНТИ 55.53.09

ВАК 2.6.17

Перспективы применения металломатричных композитов и гибридных материалов в дорожно-строительном машиностроении

Дмитрий Андреевич Удачин ^{1*}, Александр Геннадьевич Ульянов ²
*Филиал ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» в г. Новороссийске,
Новороссийск, Россия*

^{1*} udachinfmk@mail.ru, ² al-gen@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрены металломатричные композиты (ММК) и гибридные материалы как перспективное направление развития материаловедения для дорожно-строительного машиностроения.

Выполнен анализ механических свойств алюмоматричных композитов, армированных частицами карбида кремния (SiC) и карбида бора (B₄C), в моно- и гибридных схемах армирования.

Проведены расчёты удельной прочности и удельного модуля упругости. Показано, что гибридные композиты демонстрируют синергетический эффект, обеспечивая повышение прочности на 7 – 10 % и твёрдости до 23 % по сравнению с моноармированными системами. Обсуждаются технологические методы получения ММК и перспективы их применения в узлах трения и нагруженных элементах дорожно-строительной техники.

Ключевые слова: металломатричные композиты, гибридные материалы, алюминиевая матрица, карбид кремния, карбид бора, удельная прочность, армирование, дорожно-строительная техника.

Введение

Металломатричные композиционные материалы (ММК) представляют собой гетерофазные системы, в которых металлическая матрица служит связующим элементом для более твёрдых и жёстких армирующих фаз — керамических частиц, волокон или их комбинаций (рисунок 1). Такая архитектура обеспечивает сочетание пластичности и вязкости металлической матрицы с высокой твёрдостью, износостойкостью и жёсткостью армирующих включений [1].

В дорожно-строительной технике узлы трения, рабочие органы и несущие конструкции подвергаются постоянным интенсивным механическим нагрузкам и абразивному износу.

Применение ММК позволяет существенно повысить износостойкость, снизить массу конструкций и увеличить интервалы необходимые для их ремонта. Особый интерес

представляют гибридные композиты, позволяющие реализовать синергетический эффект, превосходящий свойства моно-армированных материалов [2].

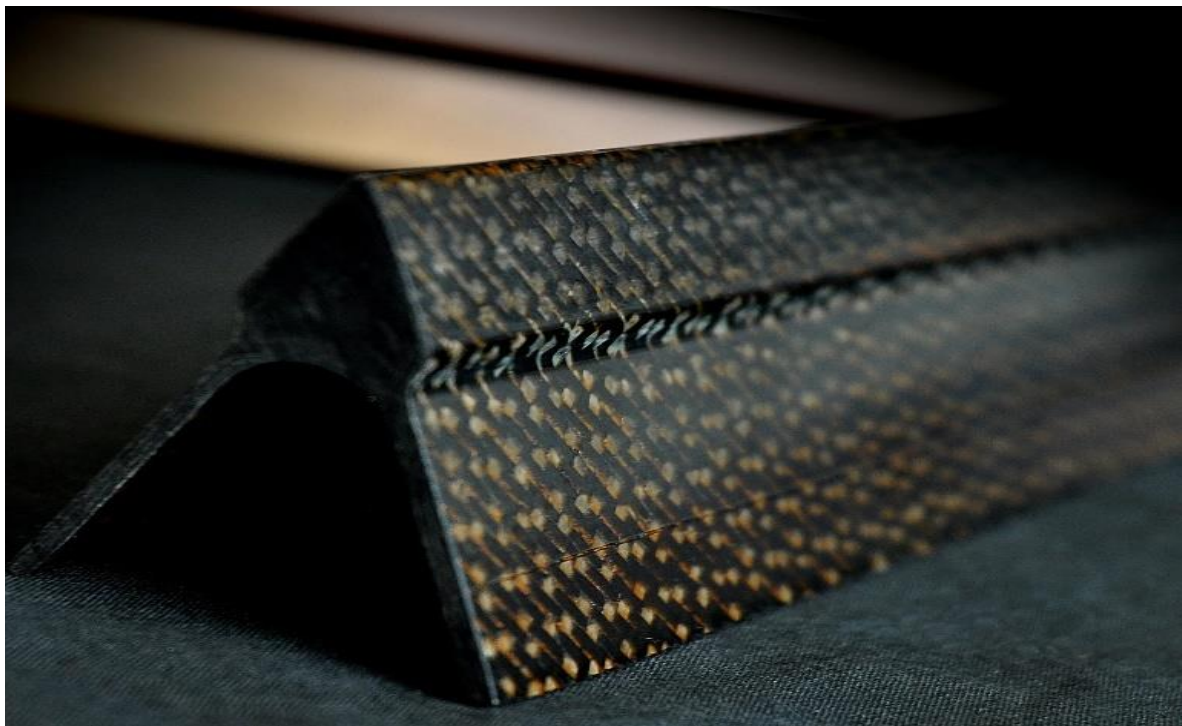


Рисунок 1 – Металломатричный композит

В БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках стратегического проекта «Функциональные полимерные и керамические композиционные материалы» ведутся активные исследования в области создания композиционных материалов. Учёными университета получены экспериментальные образцы композиционного металлокерамического покрытия для режущего инструмента на основе порошка самофлюсующегося никель-железного сплава с добавлением карбида бора [3].

Металломатричные композиты

Технология создания ММК заключается во введении в металлическую матрицу армирующих компонентов (алюминий, титан, медь или сталь), керамических частиц (карбид кремния, оксид алюминия), либо волокон. Существует несколько методов производства: порошковая металлургия; жидкофазные технологии; аддитивные методы [1, 4].

Механизм упрочнения заключается в том, что армирующие частицы воспринимают основную нагрузку, а металлическая матрица обеспечивает вязкость и перераспределение напряжений. В результате ММК демонстрируют уникальное сочетание характеристик: высокую удельную прочность, повышенную износостойкость и сохранение механических свойств при повышенных температурах. Для объективной оценки эффективности ММК необходимо сравнивать удельные характеристики, отнесённые к плотности материала.

Плотность композита рассчитывается по правилу смесей. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Удельные характеристики алюмоматричных композитов

Материал	ρ , г/см ³	σ в, МПа	Е, ГПа	σ уд, МПа·см ³ /г	Е уд, ГПа·см ³ /г
Алюминий (чистый)	2,70	90	69	33,3	25,6
Сплав 6063	2,70	240	69	88,9	25,6
Al/20%SiC	2,80	372	99	132,9	35,4
Al/40%SiC	~2,90	538	~120	185,5	41,4
Конструкционная сталь	7,85	550	200	70,1	25,5

Гибридные материалы

Отдельного внимания заслуживают гибридные материалы, представляющие собой комбинацию разнородных материалов на макроуровне (рисунок 2).

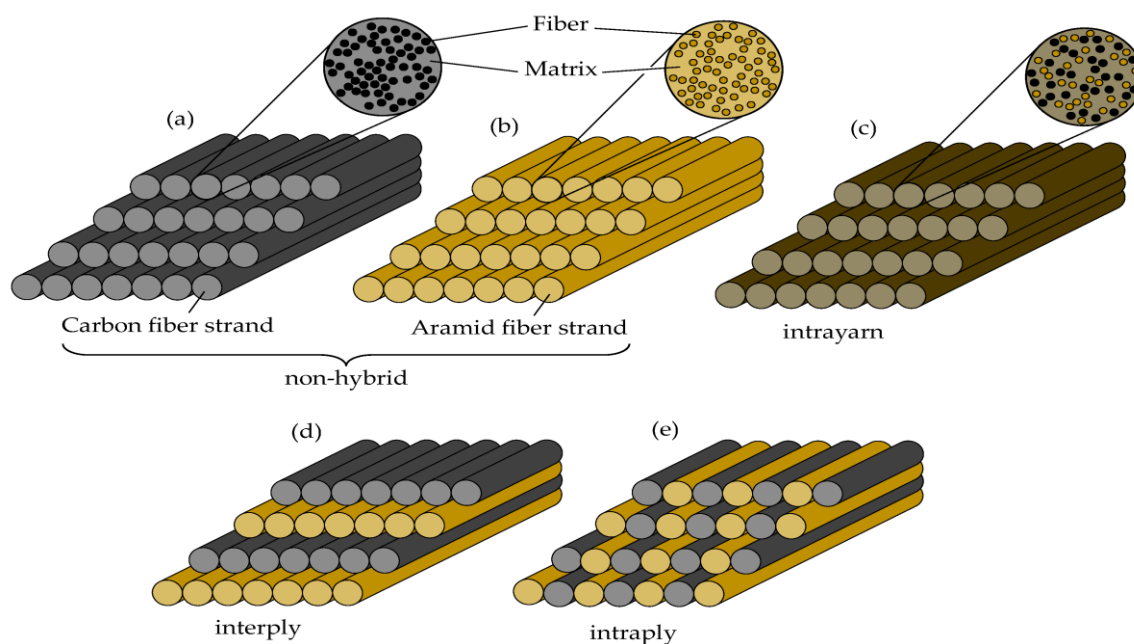


Рисунок 2 – Гибридные материалы

К ним относятся биметаллические отливки, сэндвич-панели с легким наполнителем и волокно-металлические ламинаты, где чередуются слои металла и композита. Такие структуры позволяют достичь синергетического эффекта, превосходящего свойства их отдельных компонентов [2, 4].

Упрочнение ММК определяется несколькими механизмами:

- механизм Орована — твёрдые частицы препятствуют движению дислокаций;
- термическое несоответствие — различие коэффициентов термического расширения матрицы ($\alpha_{Al} \approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и частиц ($\alpha_{SiC} \approx 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) приводит к возникновению полей остаточных напряжений и генерации геометрически необходимых дислокаций. Этот механизм вносит доминирующий вклад в упрочнение;
- несоответствие модулей упругости — более жёсткие частицы ($E_{SiC} \approx 400 \text{ ГПа}$) воспринимают большую долю нагрузки;
- дисперсионное упрочнение — при использовании наноразмерных частиц.

С увеличением объёмной доли армирующей фазы вклад механизмов термического несоответствия и несоответствия модулей возрастает, однако при этом наблюдается снижение пластичности [5].

К примеру, в 2024 году в международном журнале "Polymers" опубликовано исследование, посвященное созданию композитного материала на основе отходов штамповки стали, встроенных в полипропиленовую матрицу.

Полученный композит PPLK продемонстрировал несущую способность на 11 % выше суммы показателей отдельных компонентов.

В 2023 году в трудах Саратовского государственного технического университета опубликован анализ применения композиционных материалов в мостостроении, рассматривающий вопросы реконструкции железобетонных сооружений с использованием композитов для повышения прочностных характеристик.

Фактическое применение в наши дни

В патентной документации Caterpillar описываются композитные зубья экскаваторов, которые представляют собой стальную основу с запрессованным или залитым износостойким вкладышем из металломатричного композита (карбид/сталь). Суть технологии в том, что зубья изготавливаются не из однородного материала, а по гибридной схеме: массивная стальная часть обеспечивает прочность и вязкость, а рабочая поверхность, контактирующая с грунтом, выполнена из сверхтвёрдого композита. Это позволяет увеличить ресурс зуба без существенного удорожания всего изделия.

В зарубежных патентах также встречаются описания зубьев, полностью изготовленных из ММК.

В России активно развивается направление упрочнения рабочего оборудования металлокерамическими покрытиями. Например, рассматривается способ карбовибродуговой наплавки, при котором на режущие кромки ковшей и элементы гусеничных систем наносятся металлокерамические порошковые материалы. Это позволяет значительно увеличить ресурс деталей, эксплуатируемых в абразивной среде, что особенно актуально для дорожно-строительных машин [3].

В США была разработана технология MetPreg — алюминиевый металломатричный композит, армированный непрерывными волокнами оксида алюминия. По заявлению разработчиков, этот материал имеет прочность стали при весе алюминия. Он позиционируется как идеальное решение для создания сверхлегких гидравлических домкратов и переносных подъемников, используемых в полевых условиях.

Использование композитных материалов для производства гидроцилиндров является перспективным направлением для снижения веса строительной техники

(экскаваторов, автовышек). Однако, по имеющимся данным, в этой области чаще рассматриваются более дорогие углепластики (CFRP), а не ММК. Тем не менее, сама постановка задачи снижения веса гидравлических компонентов подтверждает высокий спрос на легкие и прочные материалы в отрасли.

В автомобильной промышленности ММК используются для производства тормозных дисков. Основное преимущество — значительное снижение массы (по сравнению с чугуном) при сохранении или улучшении теплоотводящих свойств и износостойкости. Для тяжелой техники это особенно актуально, так как снижение неподрессоренных масс положительно сказывается на ходовых качествах и ресурсе подвески.

Перспективы

В данном направлении есть огромные перспективы, например ожидается интеграция аддитивных технологий с традиционными методами, такими как 5-осевая фрезеровка, что позволит расширить возможности производства и повысить его гибкость. Разрабатываются новые технологии для печати деталей на больших поверхностях, что откроет новые горизонты для производства крупномасштабных компонентов. Наиболее актуальным и перспективным является внедрение систем цифрового хранения моделей деталей, что позволит отказаться от использования физических прототипов, повысив эффективность производственных процессов.

ММК на основе алюминия с SiC обладают высокой теплопроводностью (170 – 180 Вт / м·К), износостойкостью и способностью сохранять свойства при повышенных температурах.

Замена серого чугуна (плотность 7,2 г/см³) на алюмоматричный композит позволяет снизить массу тормозного диска в 2,5 раза.

Поршни гидроцилиндров, направляющие втулки и плунжерные пары из ММК демонстрируют повышенную износостойкость и коррозионную стойкость [4, 6].

Зубья ковшей, режущие кромки дорожных фрез могут быть выполнены с использованием биметаллических технологий — стальная основа с наплавленным слоем ММК.

Высокая удельная прочность ММК позволяет увеличить критическую скорость вращения валов при снижении их массы.

Заключение

На основе анализа научных данных и результатов исследований, проводимых в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова, проведена сравнительная оценка свойств металломатричных композитов (ММК) на основе алюминиевой матрицы, армированной частицами карбида кремния (SiC) и карбида бора (B₄C).

Установлено, что введение частиц SiC позволяет повысить предел прочности на 55–120 % и модуль упругости в 1,4 – 2,0 раза. Удельная прочность композита Al / 40 % SiC (185,5 МПа·см³/г) в 2,6 раза превышает аналогичный показатель конструкционной стали, что обеспечивает снижение массы деталей в 2–3 раза при сохранении несущей способности.

Гибридные композиты Al / SiC / B₄C демонстрируют синергетический эффект: повышение прочности на 7 – 10 %, твёрдости до 23 % и модуля упругости до 16 % по

сравнению с моно-армированными системами, однако при этом снижается пластичность материала.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку технологий получения крупногабаритных деталей, оптимизацию составов гибридных систем и создание методов неразрушающего контроля качества [7].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что на момент передачи статьи в редакционную коллегию, у них нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников:

1. Шошев, Ф. Л. Особенности получения алюмоматричного композиционного материала методом селективного лазерного сплавления / Ф. Л. Шошев, И. А. Богачев, Д. И. Сухов. – Текст: электронный // Труды ВИАМ. – 2023. – № 11. – С. 66–76. – DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-66-76. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 30.07.2026).
2. Серпова, В. М. Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов (обзор) / В. М. Серпова, Д. В. Сидоров, А. Н. Няфкин, Е. И. Курбаткина. – Текст: электронный // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3. – С. 68–77. – DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 30.07.2026).
3. Матюхин, П. В. Перспективы создания современных высококонструкционных радиационно-защитных металлокомпозиов / П. В. Матюхин, В. И. Павленко, Р. Н. Ястребинский, Ю. М. Бондаренко. – Текст: электронный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 4. – С. 138–142. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 30.07.2026).
4. Бхарати, П. Механические характеристики и износостойкость гибридных металломатричных композитов Al/SiC и Al/SiC/B₄C, полученных методом порошковой металлургии / П. Бхарати, Т. Сампатх Кумар. – Текст: электронный // Силикон (Silicon). – 2023. – № 10. – С. 4259–4275. – На англ. яз. – URL: <https://link.springer.com> (дата обращения: 30.07.2026).
5. Крючков, Д. И. Влияние всестороннейковки в условиях кратковременной ползучести на структуру и механические свойства алюмоматричного композита Al7075/10SiCr / Д. И. Крючков, А. В. Нестеренко, С. В. Смирнов, Н. Б. Пугачева, Д. И. Вичужанин, Т. М. Быкова. – Текст: электронный // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 10. – С. 1054–1064. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 30.07.2026).
6. Морозов, Н. Ф. Создание алюмоматричного композита с улучшенными механическими свойствами за счёт направленного регулирования химического состава поверхности армирующей дисперсной фазы / Н. Ф. Морозов, Е. Г. Земцова, В. К. Кудымов, П. Е. Морозов, Б. Н. Семенов, Д. В. Юрчук, В. М. Смирнов. – Текст: электронный // Деформация и разрушение материалов. – 2024. – № 3. – С. 2–10. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 30.07.2026).
7. Удачин Д.А., Ульянов А.Г. Применение современных конструкционных материалов в дорожно-строительной технике // Инженерия - XXI: сборник трудов международной молодёжной школы. — Новороссийск: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2026. — С. 66-67. — DOI: 10.51639/2713-0601_2026_66. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=91577276> (дата обращения: 18.08.2026). — Текст: электронный.

The prospects for the use of metal matrix composites and hybrid materials in road and construction machinery engineering

Dmitry Andreevich Udachin ¹, Alexander Gennadyevich Ulyanov ²

*Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov" in Novorossiysk
Novorossiysk, Russia*

^{1*} udachinfmk@mail.ru, ² al-gen@yandex.ru

Abstract

This article examines metal-matrix composites (MMCs) and hybrid materials as a promising area for the development of materials science for road construction engineering. An analysis of the mechanical properties of aluminum-matrix composites reinforced with silicon carbide (SiC) and boron carbide (B₂C) particles in mono- and hybrid reinforcement configurations is provided. Calculations of the specific strength and specific modulus of elasticity are also performed. Hybrid composites are shown to exhibit a synergistic effect, providing a 7–10 % increase in strength and up to 23 % in hardness compared to mono-reinforced systems. Technological methods for producing MMCs and the potential for their application in friction units and loaded components of road construction equipment are discussed.

Keywords: metal matrix composites, hybrid materials, aluminum matrix, silicon carbide, boron carbide, specific strength, reinforcement, road construction equipment.