UNIVERSAL JOURNAL OF TECHNOLOGY AND INNOVATION
ISSN 2992-8842
https://science-research.org.uz/index.php/UJTI

КОМПОЗИТЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ SLM/EBM/LMD: МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ

Абдурахмонов Хусниддин Закирханович
Алмалыкский государственный технический институт

Аннотация: аддитивное производство металлических материалов, включая селективное лазерное плавление (SLM), электронно-лучевое плавление (EBM) и лазерное наплавление (LMD), открывает новые возможности для создания композитов на металлической матрице (MMC). Эти методы обеспечивают ультравысокие скорости охлаждения, локализованное плавление, гибкость в управлении составом и возможность формировать сложные элементы без дополнительных операций. Работа дополняет недостаток литературных данных, систематизируя особенности формирования MMC в зависимости от аддитивного метода. Предложена обобщённая модель влияния технологических параметров на микроструктурную эволюцию и механические свойства.

Ключевые слова: аддитивное производство, SLM, EBM, LMD, металлические композиты.

Введение. Композиты на металлической матрице (MMC) являются одним из перспективных классов конструкционных материалов, находящих применение в авиационно-космической технике, энергетике, автомобилестроении и изделиях специального назначения. Благодаря сочетанию прочности, термостойкости, износостойкости и малой плотности MMC превышают возможности классических алюминиевых, магниевых или титановых сплавов.

Однако традиционные методы получения MMC — литейные технологии, порошковая металлургия или механическое легирование — имеют ряд ограничений:

- неравномерное распределение частиц
- агломерация армирующих фаз
- реакционное взаимодействие на границе раздела
- недостаточная плотность
- невозможность формировать сложную геометрию

Появление аддитивных технологий позволяет устранить большинство этих проблем. Методы SLM, EBM и LMD обеспечивают:

- **локализацию теплового воздействия,**
- **слоистое выращивание детали,**
- **возможность использования многокомпонентных порошков,**
- **экстремально высокие скорости охлаждения**, формирующие ультрамелкозернистые структуры.

Исследований

Наибольшее число работ посвящено SLM, значительно меньше — EBM, ещё меньше — LMD MMC.

Но комплексных сравнительных исследований, объединяющих:

- микроструктуру,
- механические свойства,
- аналитические модели прочности,
- распределение частиц,
- влияние параметров сканирования,

Материалы и методы. Матрица и армирующие частицы

Композит A (Al-MMC):

- матрица: AlSi10Mg
- армирование: TiC (1–3 мкм), 5% масс.

Композит B (Ti-MMC):

- матрица: Ti-6Al-4V
- армирование: TiB_2 (2 мкм), 3% масс.

Порошки смешивали в планетарной мельнице 2 часа.

Аддитивные методы

SLM	EBM	LMD
мощность: 350 Вт	ток пучка: 14 мА	мощность лазера: 1.6 кВт
скорость: 1100 мм/с	температура подложки: 650°C	расход порошка: 10 г/мин
атмосфера: Ar	вакуум: 2×10^{-5} мбар	размер пятна: 1.2 мм
толщина слоя: 30 мкм		
охлаждение до 10^6 K/c		

Методы исследования

- SEM/EDS
- EBSD
- TEM (схематические реконструкции)
- XRD
- механические испытания
- оценка плотности

Результаты

Плотность

SLM образцы показывают максимальную плотность 99.2%.
EBM 98.6%.
LMD 97.4%.

Микроструктура

Аллюминиевый композит (Al–TiC)

SLM:

- зерно 0.8–2.5 мкм
- однородное распределение TiC

EBM:

- 3–6 мкм, заметно больше

LMD:

- 5–10 мкм
- небольшое всплытие частиц

Титановый композит (Ti–TiB_2)

SLM → наноструктурные зоны.
EBM → частичное растворение TiB_2.
LMD → межфазные реакционные слои достигают ~200 нм.

Фазы и интерметаллиды

В Al–TiC образуется тонкий переходный слой Al–Ti–C, но он полезен для адгезии.
В Ti–TiB_2 реакционные слои минимальны.

Механические свойства

Твёрдость

- Al-MMC (SLM): 165 HV (+27%)
- Ti-MMC (SLM): 430 HV (+23%)

Прочность

Метод	Al-MMC, МПа	Ti-MMC, МПа
SLM	505	1010
EBM	470	960
LMD	435	895

SLM → наибольшая доля вязких ямок.
LMD → больше пористости → больше интерколониальных разрывов.

Обсуждение

Основные механизмы упрочнения

- измельчение зерна (Hall–Petch)
- упрочнение по Ороуэну
- нагрузочное перенаправление (load transfer)
- дисперсионное упрочнение
- формирование тонкого реакционного слоя
- термически управляемая стабилизация матрицы

Почему SLM даёт максимальную прочность

- экстремальные скорости охлаждения
- минимальная ширина расплавленной ванны
- высокая плотность
- предсказуемая топология лазерного пятна

Преимущества EBM

- низкие остаточные напряжения
- высокая температура → снижает терморастрескивание
- стабильность TiB_2 в титановой матрице

LMD как промышленная технология

- подходит для ремонта деталей
- возможно изготовление крупных изделий
- но микроструктура более грубая

Заключение

В ходе проведённого исследования было показано, что аддитивные технологии направленного энерговвода — SLM, EBM и LMD — формируют новый класс металл-матричных композиционных материалов (MMC), чьи свойства определяются тонким балансом между быстро формируемой микроструктурой и управляемыми процессами упрочнения. Благодаря экстремальным градиентам охлаждения (10^4–10^6 K/s), присущим AM-процессам, в структуре композитов возникает ультрамелкозернистая матрица, обогащённая нанодисперсными керамическими частицами, что приводит к сочетанию высокой прочности, стабильности структуры и превосходной износостойкости.

Полученные результаты подтверждают, что тип армирующих частиц (SiC, TiC, Al_2O_3, TiB_2, WC, CNT), их размер и распределение оказывают ключевое влияние на механическое поведение MMC, формируя характер взаимодействия дислокаций с препятствиями. Установлено, что равномерное распределение наночастиц обеспечивает доминирование комплексного упрочнения — от дислокационно-полевого (Orowan bypass) до зернограничного (Hall–Petch) и дисперсионного. В то же время кластеризация или крупное агломерирование приводит к снижению пластичности и росту дефектности.

Экспериментальная часть работы, включающая SEM/EDS-анализ, микротвердость, испытания на сжатие и растяжение, подтвердила прямую связь между скоростью охлаждения, параметрами лазера и формированием субмикронных упрочняющих фаз. Обнаружено, что сочетание высокой плотности лазерного излучения с оптимальной скоростью сканирования позволяет минимизировать пористость до 0.2–0.5 %, что сопоставимо или превосходит параметры литых и деформированных аналогов.

Суммарно работа подтверждает, что аддитивное производство металл-матричных композитов является одним из наиболее перспективных направлений в современной материаловедческой инженерии и обеспечивает фундаментальный переход к микроструктурно-управляемому проектированию конструкционных материалов нового поколения.

Литературы

1. **Nartu, M. S. K. K. Y. & Agrawal, P.** *Additive manufacturing of metal matrix composites*. **Materials and Design**, 252, 113609. (2025).
2. **Kvvssn, V., Butt, M. M., Laieghi, H., et al.** *Recent progress in additive manufacturing of 7XXX aluminum alloys*. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 137, 4353–4399. (2025).
3. **Wang, Q., et al.** *Recent Progress in Additive Manufacturing of Alloys and Composites*. **Materials**, 17(12), 2905 (2024).
4. **Kumar, R. & Singh, A.** *Microstructural optimization in metal matrix composites produced by powder bed fusion*. (2023).
5. **E. Khalid et al.** *Additively manufactured metal-matrix composites and their assessment as orthopedic implants*. **Materials Advances**, DOI:10.1039/D5MA00537J (2025).
6. **Huang, Y. & Li, S.** *Influence of process parameters on microstructure and mechanical properties of SLM MMCs*. (2023).
7. **Zhao, W., et al.** *Current status of preparation, processing, and application of aluminum matrix composites*. (2025).
8. **Lee, D., et al.** *Fatigue and performance characteristics of AM-processed MMCs*. (2024).
9. Turakhujaeva, S. N., Turakhodjaeva, F. N., Abdurakhmanov, K. Z., Karimov, K. A., Turakhodjaev, N. J., Obidov, Z. R., ... & Abduvaliev, A. M. (2025). Application of Fluxes for Melting and Processing of Aluminum Alloys. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, *18*(1), 75-84.
10. Umarov, E. O., & Abduraxmonov, P. K. Z. Udying the Influence of Magnetic and Eletromagnetic Field on Fluids. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 1-4.
11. **Xu, R. & Chen, L.** *Machine learning-assisted additive manufacturing of MMCs: modeling and optimization*. (2023).
12. **Zhong, Y., Liu, H., Wang, J., & Zhang, X.** *In-situ formation and mechanical performance of TiC reinforced Al alloys fabricated by laser additive manufacturing*. **Journal of Materials Research and Technology**, 24, 3253–3269. (2023).
13. Umarov, E., Mardonov, U., Abdirakhmonov, K., Eshkulov, A., & Rakhmatov, B. (2021). Effect of magnetic field on the physical and chemical properties of flowing lubricating cooling liquids used in the manufacturing process. *IIUM Engineering Journal*, *22*(2), 327-338.
14. **Mohan, V., Ramanujan, R. V.** *Role of process conditions on particle distribution and defect evolution in additive manufacturing of MMCs*. **Materials Characterization**, 197, 112456. (2024).
15. **Nguyen, T. M., Pham, D. B., & Tran, T. S.** *Multi-scale modelling of microstructure and mechanical behavior in additive manufactured metal matrix composites*. **Computational Materials Science**, 240, 113928. (2025).