

А.Н. Борисов, В.Ш. Суфияров, А.А. Попович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, borisov_an@spbstu.ru

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТiС НА МИКРОСТРУКТУРУ И ИЗНОС КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ INCONEL 718/TiC, ПОЛУЧЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО

Аннотация

В работе было исследовано влияние содержания TiC на микроструктуру, твердость и износостойкость композиционных материалов Inconel 718/TiC, полученных методом струйного нанесения связующего. Твердость композиционных материалов возрастает с увеличением доли армирования. Наибольшая износостойкость зафиксирована у образцов Inc-5 после ГИП и ТО, что связано с оптимальным распределением фазы MC вдоль частиц TiC, обеспечивающим их прочное закрепление в матрице. При повышении содержания TiC наблюдается снижение трибологических характеристик. Выдвинута гипотеза о том, что изменение режимов спекания и термической обработки может улучшить износостойкость металломатричных композитов с повышенным содержанием TiC.

Ключевые слова: струйное нанесение связующего, композиционные материалы с карбидным упрочнением, микроструктура, трибологические свойства.

Введение

Никелевые сплавы, такие как Inconel 718, широко используются в различных областях инженерии, особенно в авиационной и космической промышленности, благодаря сочетанию высокой прочности, эффективного сопротивления усталости и ползучести, а также устойчивости к окислению при повышенных температурах и стабильных химических свойств при комнатной температуре [1,2]. Однако детали, изготовленные из традиционных никелевых сплавов, зачастую не удовлетворяют возрастающим требованиям, особенно касающихся износостойкости. В связи с этим в настоящее время активно ведутся исследования, направленные на решение данной проблемы, включая разработку металломатричных композиционных материалов (ММК) с улучшенными эксплуатационными характеристиками [3-5].

Металломатричные композиты – это особый класс материалов, объединяющих в себе несколько разнородных материалов, чаще всего два – металлическую матрицу и керамические армирующие компоненты [6]. Металлическая матрица в подобных системах обеспечивает необходимую конечному материалу пластичность, а армирование с использованием керамики приводит к существенному повышению твердости и жесткости. Комбинирование их создает возможность получения материалов, обладающих комплексом уникальных свойств, а именно малым удельным весом, высокими прочностными характеристиками, в том числе при повышенных температурах, а также устойчивостью к абразивному износу [7,8].

Использование технологий аддитивного производства при изготовлении ММК предоставляет возможность создавать легкие и экономичные конструкции

сложной геометрической формы и обходить большинство ограничений, с которыми связаны традиционные методы производства [9-11]. В свою очередь применение аддитивной технологии струйного нанесения связующего особенно перспективно благодаря ее высокой производительности, относительно более низкой стоимости производства (как с точки зрения стоимости оборудования, так и с точки зрения энергопотребления), а также отсутствию термических напряжений в структуре материала, поскольку процесс не связан с плавлением [12–14].

Потенциальные области применения МКМ зависят от получаемых свойств, которые, в свою очередь, зависят от количества карбидного армирования. Как правило, они хорошо подходят для применения в тех областях, где абразивная стойкость имеет первостепенное значение, включая буровые инструменты и компоненты насосов. Целью настоящего исследования является изучение влияния содержания TiC в композиционных материалах Inconel 718/TiC на микроструктуру, твердость и износостойкость.

Методы и материалы

В качестве исходных материалов в настоящем исследовании использовался сферический порошок из суперсплава Inconel 718 со средним размером частиц 49,7 мкм и порошок карбида титана (TiC) с осколочной формой частиц и средним размером 17,1 мкм.

Порошковые смеси из Inconel 718 с добавлением 3, 5 и 10 масс.% TiC изготавливали с использованием гравитационного смесителя в течение 12 часов. В работе они маркировались как Inc-3, Inc-5 и Inc-10, соответственно. Контрольная группа образцов была изготовлена из Inconel 718 без добавленного TiC, они маркировались в работе Inc-0.

Для исследования морфологии порошков и микроструктуры полученных образцов применялся сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Tescan Mira3 LMU (Brno, Czech Republic) с использованием режима регистрации обратно отраженных электронов (BSE).

Фазовый анализ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра (XRD) Bruker D8 Advance (Billerica, MA, USA), используя облучение Cu-K α (1/4 1,5418 Å).

Образцы для исследований изготавливались с использованием установки струйного нанесения связующего ExOne Innovent (The ExOne Company, North Huntington, USA).

По результатам проведения предварительных тестов, для спекания образцов были выбраны следующие режимы: температура 1270°C с выдержкой 10 часов для образцов Inc-0 и Inc-3 и 1280°C с выдержкой 5 часов для образцов Inc-5 и Inc-10. Спекание всех образцов проводилось в вакууме и включало этап выжигания связующего при температуре 600°C в течение 1 часа с продувкой аргоном.

Горячее изостатическое прессование (ГИП) производили при температуре 1160 \pm 5°C и давлении 130 МПа в течение 3 часов в атмосфере аргона. Термическая обработка (ТО) образцов представляла собой отжиг при температуре 1060 \pm 5°C с выдержкой в течение 1 часа и последующим охлаждением на воздухе и старение. Старение включало нагрев до 760 \pm 5°C и выдержку в течение 10 часов, затем охлаждение до 650 \pm 5°C в течение 2 часов и выдержку при 650 \pm 5°C в течение 8 часов с последующим охлаждением на воздухе.

Плотность спеченных образцов и образцов после ГИП определяли методом гидростатического взвешивания в деионизированной воде с добавлением поверхностно-активного вещества.

Твердость образцов определяли с использованием твердомера Zwick/Roell Zhu (ZwickRoell GmbH & Co, Ulm, Germany) методом Виккерса при нагрузке 100 Н.

Оценка трибологических свойств проводилась по стандарту ASTM G65 «Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus». Методика испытаний заключалась в стирании испытываемой поверхности образцов сухим абразивом определённого размера и состава. Всего были проведены 2 цикла испытаний по процедуре В приведенного стандарта (прижимная нагрузка – 130 Н, количество оборотов колеса – 2000). По окончании каждого цикла у образцов измерялась потеря массы. Взвешивание проходило на аналитических весах с классом точности 0,0001 г.

Результаты и обсуждение

Несмотря на то, что выбранные режимы спекания были наиболее удачными с точки зрения плотности и сохранения геометрии образцов среди всех режимов, опробованных в рамках проведения предварительных тестов, образцы тем не менее характеризовались довольно высоким содержанием пор, и, для достижения достойного уровня механических свойств, было рекомендовано проведение постобработки, обеспечивающей дополнительное уплотнение – ГИП.

Результаты сравнения значений плотности до и после ГИП для каждого материала представлены на рисунке 1. Все образцы характеризовались некоторым уплотнением после ГИП, однако для образца Inc-0 повышение плотности после ГИП было наименее существенным. Вероятно, образец Inc-0 имел открытую пористость, на уменьшение которой ГИП имеет лишь ограниченное влияние. Хотя высокое давление и температура во время процесса ГИП могут способствовать некоторому уменьшению открытой пористости, взаимосвязанный характер этих пор затрудняет их полное устранение. Открытые поры все еще могут оставаться после ГИП, особенно если материал изначально имел довольно высокую пористость, а сами поры были крупными [15,16].

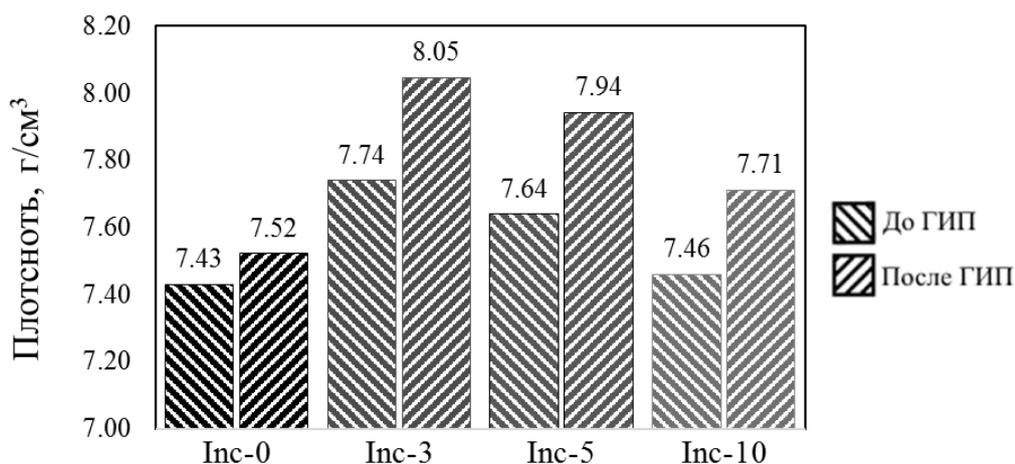


Рисунок 1 – Сравнение плотности образцов до и после проведения ГИП

Определение фазового состава образцов было выполнено с использованием рентгеновской дифракции. Рентгенограммы образцов после ГИП и ТО демонстрировали наличие пиков на углах, характерных для γ и γ' -фаз никеля (рисунок 2). Кроме того, на увеличенных областях графиков наблюдались пики,

характерные для фаз MC и TiC, причем с увеличением содержания TiC в материале интенсивность обоих типов этих пиков возрастала. Карбид титана не мог быть включен в обозначение MC-фазы, поскольку пики, относящиеся к TiC, наблюдались только в образцах, содержащих TiC (Inc-3, Inc-5, Inc-10), чего нельзя сказать о пике, обозначенном как MC, который наблюдался в той или иной мере в каждом из исследованных образцов.

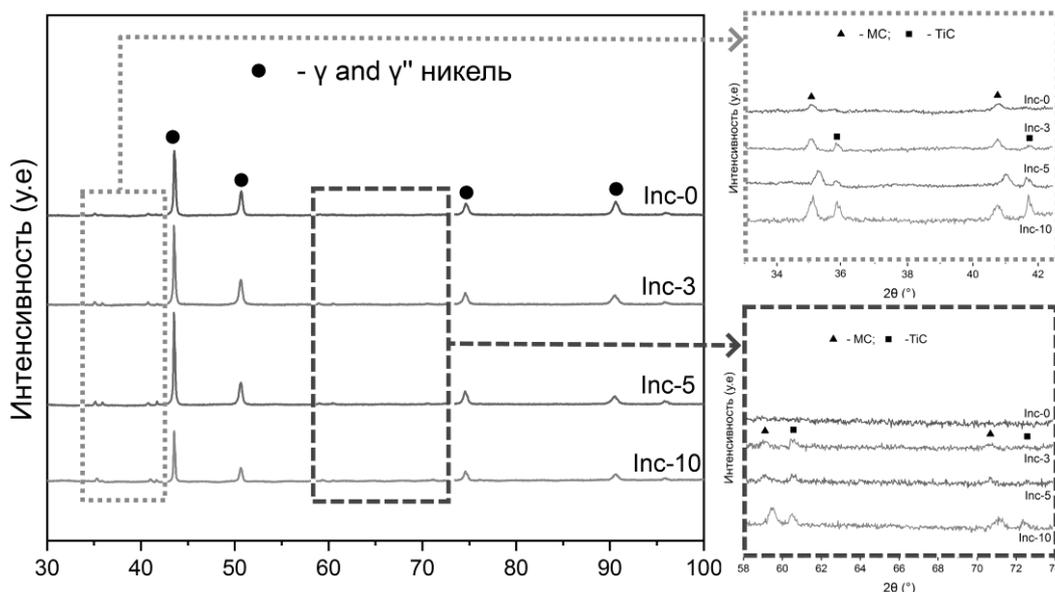


Рисунок 2 – Рентгенограммы образцов после ГИП и ТО

Исследование микроструктуры было проведено с применением СЭМ, его результаты представлены на рисунке 3. Наблюдаемые карбидные фазы MC, выделившиеся после проведения ТО, располагались преимущественно по границам зерен и вблизи частиц TiC в образцах Inc-3, Inc-5 и Inc-10. В образце Inc-0 фаза MC выделилась в гораздо меньшем количестве. Также стоит отметить, что с увеличением содержания TiC в материале размер включений MC увеличивался, а в образце Inc-10 эти включения в некоторых случаях были по размеру сопоставимы с частицами TiC.

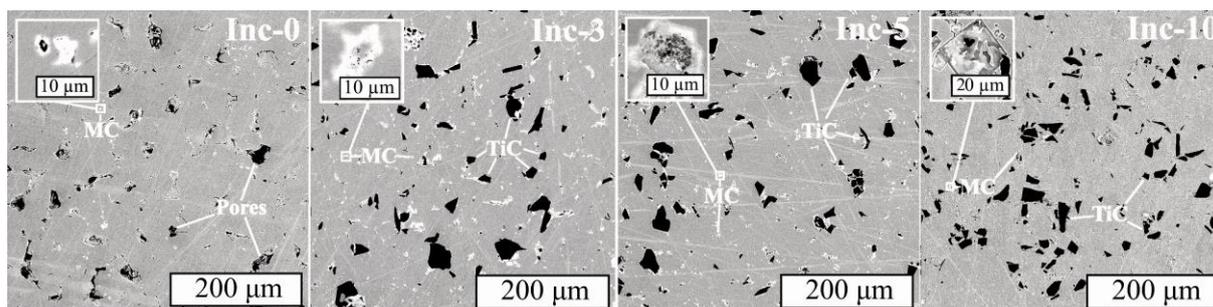


Рисунок 3 – СЭМ-изображения образцов после ГИП и ТО (BSE)

Измерения твердости проводились для образцов после спекания, а также для образцов после ГИП+ТО. Результаты измерений представлены на рисунке 4.

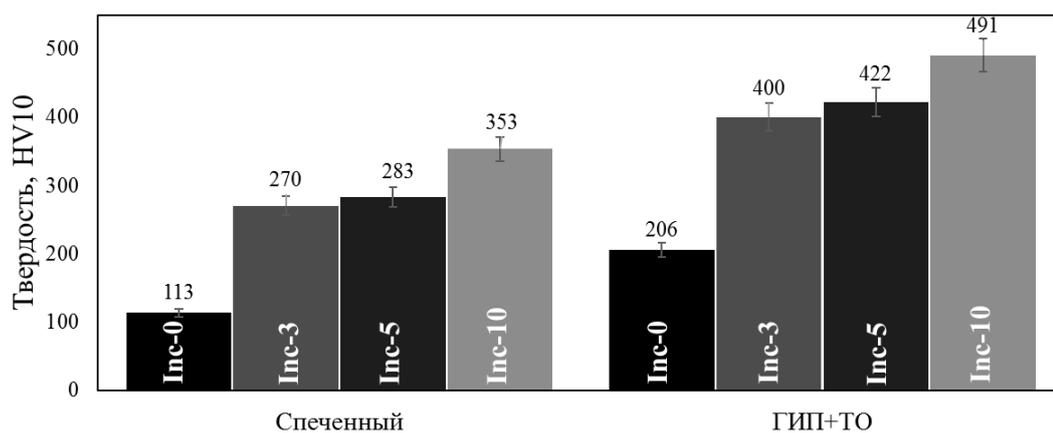


Рисунок 4 – Результаты измерения твердости образцов

В состоянии образцов после спекания добавление частиц TiC и последующее увеличение его содержания приводило к повышению твердости. ГИП и ТО способствовали увеличению твердости во всех исследуемых образцах за счет уплотнения и выделившейся в результате старения фазы MC. Сравнительно низкие значения твердости образцов Inc-0, вероятно, было обусловлено их высокой пористостью, в том числе после проведения ГИП, не оказавшего существенной роли в уплотнении этих образцов.

Результаты испытаний на абразивный износ представлены на рисунке 5.

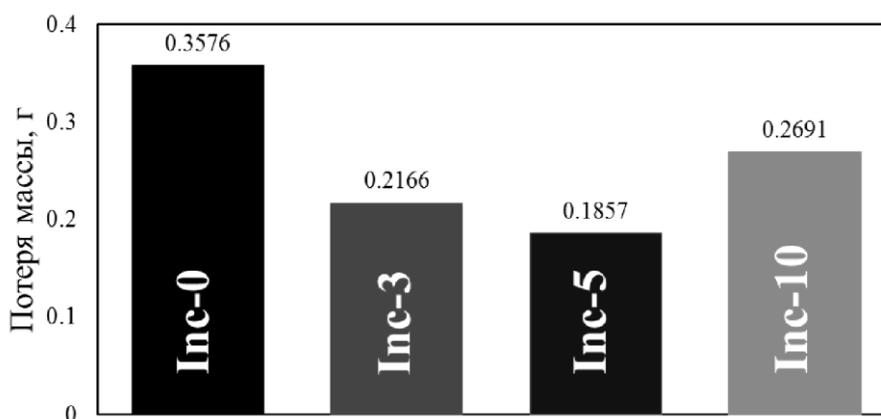


Рисунок 5 – Общая потеря массы при испытаниях на абразивный износ

Образец Inc-5 с постобработкой, включающей ГИП и ТО, характеризовался наименьшей потерей массы в результате двух циклов истирания, то есть обладал наилучшей износостойкостью. Примечательно, что повышение содержания TiC в композиционном материале до 10 масс% снижало его износостойкость. Предположительно, это было связано с недостаточной прочностью связи между частицами TiC и матрицей, приводящей к выкрашиванию карбидных частиц в процессе испытаний.

После проведения испытаний изношенные поверхности образцов Inc-5 и Inc-10 были исследованы с использованием СЭМ. СЭМ-изображения представлены на рисунке 6. В образце Inc-10 СЭМ-изображения иллюстрировали наличие борозд в матрице, параллельных направлению скольжения и возникших, вероятно, в результате локального выкрашивания и протаскивания по матрице твердых частиц TiC. Ширина этих борозд соответствовала среднему размеру частиц TiC. При этом на СЭМ-изображениях поверхности образца Inc-5 подобного явления не наблюдалось.

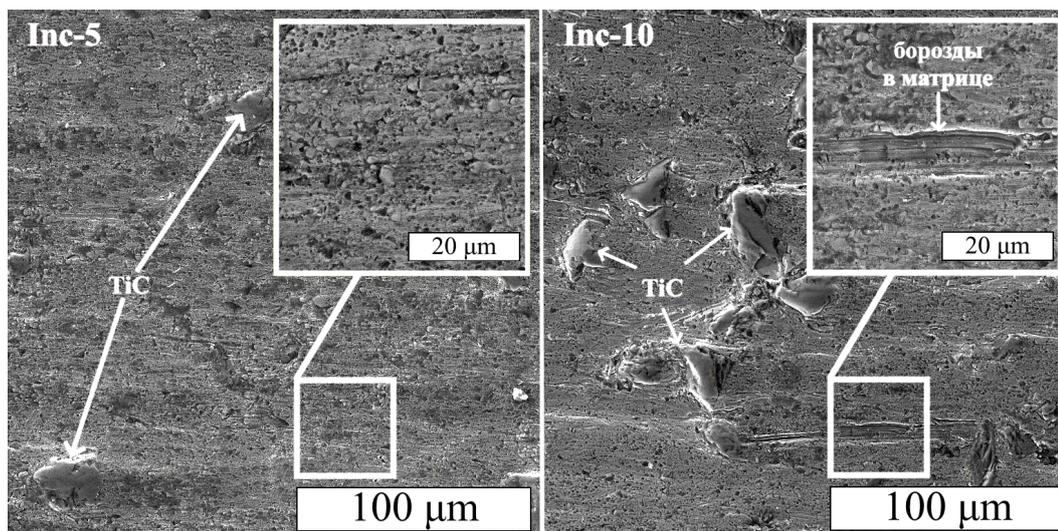


Рисунок 6 – СЭМ-изображения изношенных поверхностей образцов Inc-5 и Inc-10

Отсюда следует, что при данных условиях изготовления композиционных материалов (режимах спекания и постобработки) чрезмерное содержание TiC (в данном случае 10%) приводит к снижению износостойкости из-за отслоения частиц и слабого сцепления, сводя на нет потенциальные преимущества повышенной твердости.

Исследование микроструктуры образцов с использованием СЭМ при больших увеличениях (рисунок 7) показало, что в образце Inc-5 фаза MC, выделяющаяся в результате старения, располагалась преимущественно по периметру частиц TiC, тем самым, вероятно, укрепляя TiC в матрице при механическом воздействии. В отличие от Inc-5, в образце Inc-10 количество фазы MC вблизи частиц TiC оказалось значительно меньшим. По-видимому, из-за этого частицы TiC были слабее закреплены в матрице, что приводило к их выкрашиванию и, как следствие, снижению износостойкости образцов Inc-10.

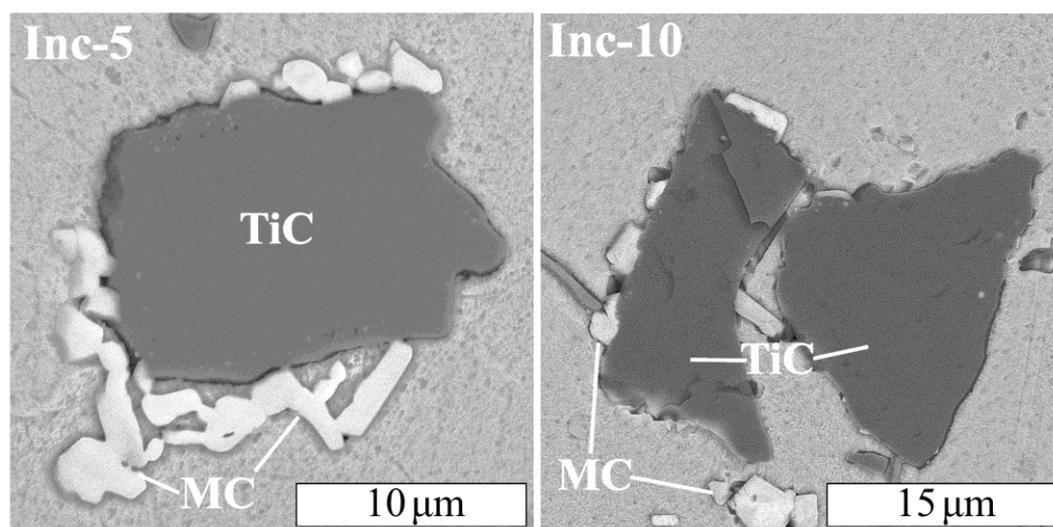


Рисунок 7 – СЭМ-изображения образцов Inc-5 и Inc-10 при больших увеличениях

Изменение режимов спекания и ТО потенциально могло бы обеспечить более прочную связь между частицами TiC и матрицей в МКМ с повышенным содержанием карбидов, тем самым способствуя улучшению их износостойкости. Эта гипотеза интересна для изучения и может стать объектом для дальнейших исследований.

Заключение

Содержание TiC оказывало существенное влияние на микроструктуру и свойства композиционных материалов Inconel 718/TiC, изготовленных с использованием технологии струйного нанесения связующего. Значения твердости композиционных материалов находились в прямой зависимости от доли армирования.

Наибольшая износостойкость наблюдалась у образцов Inc-5 после ГИП и ТО, что, вероятно, связано с их микроструктурными особенностями – эффективным распределением фазы MC вдоль границ частиц TiC, обеспечивающим их прочное закрепление в матрице. При дальнейшем увеличении содержания TiC трибологические свойства ухудшались, что, по-видимому, было обусловлено недостаточным количеством фазы MC для надежного удержания карбидных частиц. Оптимизация режимов спекания и термической обработки может позволить улучшить износостойкость МКМ с повышенным содержанием TiC.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидии из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научных центров мирового уровня, выполняющих исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники, № 075-15-2022-311 от апреля 2022 г. 075-15-2022-311, от 20 апреля 2022 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Zhang H. et al. Understanding tensile and creep properties of WC reinforced nickel-based composites fabricated by selective laser melting //Materials Science and Engineering: A. - 2021. - Т. 802. - С. 140431.
2. Borisov E., Popovich A., Sufiiarov V. Modification of Inconel 718 Properties by In Situ Y Addition in Selective Laser Melting //Materials. - 2022. - Т. 15. - №. 18. - С. 6219.
3. Mei X. et al. Interfacial characterization and mechanical properties of 316L stainless steel/inconel 718 manufactured by selective laser melting //Materials Science and Engineering: A. - 2019. - Т. 758. - С. 185-191.
4. Li C. W. et al. Microstructure characterization of cemented carbide fabricated by selective laser melting process //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - 2018. - Т. 75. - С. 225-233.
5. Sufiiarov V. et al. Selective laser melting of Inconel 718/TiC composite: effect of TiC particle size //Metals. - 2022. - Т. 12. - №. 10. - С. 1729.
6. Snelling D. A. et al. Binder jetting advanced ceramics for metal-ceramic composite structures //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - Т. 92. - С. 531-545.
7. Hong C. et al. Laser metal deposition of TiC/Inconel 718 composites with tailored interfacial microstructures //Optics & Laser Technology. - 2013. - Т. 54. - С. 98-109.
8. Mussatto A. et al. Advanced production routes for metal matrix composites //Engineering reports. - 2021. - Т. 3. - №. 5. - С. e12330.
9. Shabani M., Xiong W. Metal matrix composite development using binder jet additive manufacturing //Metal-Matrix Composites: Advances in Processing, Characterization, Performance and Analysis. - Cham : Springer International Publishing, 2022. - С. 215-223.
10. Dadkhah M. et al. A comprehensive overview on the latest progress in the additive manufacturing of metal matrix composites: potential, challenges, and feasible solutions //Acta Metallurgica Sinica (English Letters). - 2021. - Т. 34. - С. 1173-1200.

11. Sufiiarov V. Materials, Design and Process Development for Additive Manufacturing //Materials. - 2022. - T. 15. - №. 10. - C. 3492.
12. Tian Y. F. et al. Microstructure and properties of tungsten-40 wt.-% copper composites fabricated by binder jet 3D printing //Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. - 2024. - T. 55. - №. 6. - C. 851-863.
13. Mostafaei A. et al. Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter-HIP binder-jet 3D-printed WC-Co composites //Additive Manufacturing. - 2021. - T. 46. - C. 102128.
14. Mostafaei A. et al. Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges //Progress in Materials Science. - 2021. - T. 119. - C. 100707.
15. Atkinson H. V., Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview //Metallurgical and materials transactions A. - 2000. - T. 31. - C. 2981-3000.
16. Helle A. S., Easterling K. E., Ashby M. F. Hot-isostatic pressing diagrams: new developments //Acta Metallurgica. - 1985. - T. 33. - №. 12. - C. 2163-2174.

A.N. Borisov¹, V.S. Sufiiarov¹, A.A. Popovich¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, borisov_an@spbstu.ru

EFFECT OF TiC CONTENT ON MICROSTRUCTURE AND WEAR OF INCONEL 718/TiC COMPOSITE MATERIALS PRODUCED BY BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING.

Abstract

The effect of TiC content on the microstructure, hardness and wear resistance of Inconel 718/TiC composites produced by binder jetting was investigated in this work. The hardness of the composites increased with increasing reinforcement fraction. The highest wear resistance was recorded in Inc-5 samples after hot isostatic pressing and heat treatment, which is associated with the optimal distribution of MC phase along the TiC particles, providing their strong fixation in the matrix. When the TiC content increases, a decrease in tribological characteristics is observed. It is hypothesized that the change of sintering and heat treatment modes can improve the wear resistance of metal matrix composites with increased TiC content.

Keywords: Binder Jetting Additive Manufacturing, carbide-strengthened composites, microstructure, tribological properties.