





## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА ТИ/ТИВ ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

М. С. Болдин<sup>1</sup> , М. С. Озеров<sup>2</sup> , В. С. Соколовский<sup>2</sup> , Е. А. Поголяева<sup>2</sup> 

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,  
Нижегород, 603950, Россия

<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, 308015, Россия

E-mail: [ozеров@bsu.edu.ru](mailto:ozеров@bsu.edu.ru), [sokolovskiy@bsu.edu.ru](mailto:sokolovskiy@bsu.edu.ru), [povolyaeva@bsu.edu.ru](mailto:povolyaeva@bsu.edu.ru), [zherebtsov@bsu.edu.ru](mailto:zherebtsov@bsu.edu.ru)

**Аннотация.** Беспористый высокопрочный металл-матричный композит Ti/TiB был получен методом искрового плазменного спекания при температуре 1000 °С. Было установлено, что после горячей прокатки композит показал несколько повышенный предел текучести и значительно улучшенные показатели пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при степени деформации на сжатие 25 %, тогда как пластичность для исходного состояния составляла 12 %. Значения предела текучести составили 930 и 1200 МПа для исходного и горячекатаного состояний, соответственно. Показано заметное улучшение высокотемпературных механических свойств композита: при температуре растяжения 500 °С пластичность в исходном состоянии составила 3 %, горячекатаный образец показал значение относительного удлинения ~ 13%.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, деформация, эволюция микроструктуры, глобуляризация

**Благодарности:** Исследования выполнены при финансовой поддержке внутривузовского гранта НИУ БелГУ по поддержке коллективов молодых ученых «Молодые лидеры в науке».

**Для цитирования:** Болдин М. С., Озеров М. С., Соколовский В. С., Поголяева Е. А., Жеребцов С. В. 2022. Механические свойства композита ТИ/ТИВ после горячей прокатки. Прикладная математика & Физика, 54(4): 266–270.

DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-4-266-270

---

## MECHANICAL PROPERTIES OF THE TI/TIB COMPOSITE AFTER HOT ROLLING

Maxim Boldin<sup>1</sup> , Maxim Ozerov<sup>2</sup> , Vitaliy Sokolovsky<sup>2</sup> , Elizaveta Povolyaeva ,  
Sergey Zherebtsov<sup>2</sup> 

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University, N. I. Lobachevsky,  
Nizhny Novgorod, 603950, Russia

<sup>2</sup>Belgorod National Research University,  
Belgorod, 308015, Russia

E-mail: [ozеров@bsu.edu.ru](mailto:ozеров@bsu.edu.ru), [sokolovskiy@bsu.edu.ru](mailto:sokolovskiy@bsu.edu.ru), [povolyaeva@bsu.edu.ru](mailto:povolyaeva@bsu.edu.ru), [zherebtsov@bsu.edu.ru](mailto:zherebtsov@bsu.edu.ru) u

Received November, 29, 2022

**Abstract.** A non-porous high-strength Ti/TiB metal-matrix composite was obtained by spark plasma sintering at a temperature of 1000°C. It was found that after hot rolling, the composite showed slightly increased yield strength and significantly improved ductility compared to the initial state: the hot-rolled sample failed at a compressive strain of 25 %, while the ductility for the initial state was 12 %. The values of the yield strength were 930 and 1200 MPa for the initial and hot-rolled states, respectively. A noticeable improvement in the high-temperature mechanical properties of the composite was shown: at a tension temperature of 500 °C, the ductility in the initial state was 3%, and the hot-rolled sample showed a relative elongation value of ~ 13%.

**Keywords:** Titanium Alloy, Compression, Microstructure Evolution, Globularization

**Acknowledgements:** The research was carried out with the financial support of the intra-university grant of the Belgorod National Research University for the support of teams of young scientists "Young Leaders in Science".

**For citation:** Boldin M., Ozerov M., Sokolovsky V., Povolyaeva E., Zherebtsov S. 2022. Mechanical properties of the TI/TIB composite after hot rolling. Applied Mathematics & Physics, 54(4): 266–270. (in Russian).

DOI 10.52575/2687-0959-2022-54-4-266-270

---

**1. Введение.** За счет комплекса привлекательных свойств (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, биосовместимость) титан и титановые сплавы широко востребованы в промышленности

и медицине [4]. Однако применение титана и низколегированных титановых сплавов часто ограничивается их недостаточно высокой абсолютной прочностью, твердостью и износостойкостью. Упрочнение титана может быть достигнуто за счет создания металл-матричных композитов (ММК) с использованием в качестве армирующего компонента таких высокотвердых соединений, как TiB, TiC, TiN [2, 5, 7, 9]. При этом, по сравнению с остальными упрочнителями, TiB имеет высокую устойчивость при температурах синтеза, близкую к титану плотность и коэффициент термического расширения, а также обладает хорошим кристаллографическим сопряжением с титановой матрицей, обеспечивая тем самым минимальные остаточные напряжения [6, 10]. На сегодняшний день плазменное спекание (ИПС) является одним из самых перспективных методов создания композиционных материалов. ИПС позволяет проводить синтез при низкой температуре и за короткое время, что, с одной стороны обеспечивает высокую производительность метода при достижении практически 100 % плотности заготовок, а с другой не ведет к существенному росту структурных элементов, позволяя получать наноструктурное состояние в композите [1]. В ходе искрового плазменного синтеза смеси порошков титана и диборида титана (TiB<sub>2</sub>) протекает химическая реакция  $Ti + TiB_2 = 2TiB$ , в результате чего в титановой матрице образуется прочная нитевидная фаза TiB [3, 10]. В настоящее время для изготовления режущего инструмента применяются в основном коррозионностойкие стали. Титановые сплавы обладают конкурентным преимуществом перед сталями в области их применения в специальных условиях. К примеру, при работе режущего инструмента в условиях агрессивной среды (морская вода) развивается морская и контактная коррозия, стальной инструмент быстро разрушается. Для расширения области применения и увеличения требуемого баланса технологических свойств композита Ti/TiB необходимо наличие комплексных исследований по поиску повышения пластических свойств данного материала. Одним из путей повышения пластичности титана и сплавов на его основе является деформационно-термическая обработка. Прокатка – относительно простой метод пластической деформации, с помощью которого можно повысить механические свойства металла. Таким образом, данная работа направлена на исследование влияния горячей прокатки на структуру и механические свойства композита Ti/TiB.

**2. Материал и методики.** В данной работе композит Ti/TiB с весовым содержанием армирующего компонента TiB<sub>2</sub> 5 % был получен искровым плазменным спеканием при 1000 °С. Призматические образцы размером 4 × 10 × 30 мм<sup>3</sup> вырезали из гомогенизированных цилиндров с помощью аппарата электроэрозионной резки Sodick AQ300L. Затем образцы нагревали до 1000 °С и прокатывали в неизотермических условиях до общей деформации по толщине 0,7 (уменьшение толщины на 55 %). Однонаправленную многопроходную прокатку выполняли с обжатием за проход ~ 0,25 мм с выдержкой 10 мин в печи, нагретой до 1000 °С, через каждые 2 прохода. Дальнейшая прокатка (уменьшение толщины более 55 %) привела к образованию поверхностных трещин на боковых гранях, скорее всего, из-за значительного охлаждения поверхностных слоев при неизотермическом деформировании.

Испытания на сжатие обоих состояний (исходной и после прокатки) композита проводились при комнатной температуре и номинальной скорости деформации 10<sup>-4</sup> с<sup>-1</sup> на испытательной машине Instron 5882 с использованием образцов размером 3×3×5 мм<sup>3</sup>. Механические испытания на растяжение проводили на плоских образцах с длиной рабочей части 4 мм и поперечным сечением 1,5×3,0 мм<sup>2</sup>. Перед испытаниями образцы тщательно шлифовали и полировали. Деформация образцов осуществлялась на универсальной испытательной машине Instron 5882 при комнатной и повышенных температурах (300–700 °С) и начальной скорости деформации 10–3 с<sup>-1</sup>. Поверхность изломов композита исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (СЭМ). СЭМ проводили с использованием электронного сканирующего микроскопа FEI Quanta 600 FEG при ускоряющем напряжении 30 кВ.

**3. Результаты и их обсуждение.** Кривые деформации композита Ti/TiB в исходном и горячекатаном состояниях, полученные после одноосного сжатия при комнатной температуре, представлены на рисунке 1. Удалось установить, что после горячей прокатки композит показал несколько повышенный предел текучести и значительно улучшенные показатели пластичности по сравнению с исходным состоянием. Так, горячекатаный образец разрушился при степени деформации на сжатие 25 %, тогда как пластичность для исходного состояния составляла существенно меньшее значение – 12 %. Показатели предела текучести составили 930 и 1200 МПа для исходного и горячекатаного состояний, соответственно. Также была измерена микротвердость двух состояний. Стоит отметить существенное повышение значений микротвердости прокатанного образца: по сравнению с исходным состоянием значения микротвердости увеличились с 480 до 550 HV.

Горячая прокатка также заметно улучшила высокотемпературные механические свойства композита (Рис. 2). Хотя при 400 °С ни в одном из состояний сплава не наблюдалось стадии пластического течения, образцы после горячей прокатки разрушались при гораздо более высоких напряжениях, чем в исходном состоянии. Повышение температуры растяжения до 500 °С привело к очень ограниченной пластичности (удлинение около 3 %) в исходном состоянии. В то же время горячекатаный образец показал выраженное относительное удлинение ~ 13 %. В то же время достаточно быстрая локализация пластического течения в композите свидетельствует об ограниченной способности материала к упрочнению. Величина предела

прочности при растяжении композита при 500 °С составила ~ 480 МПа.

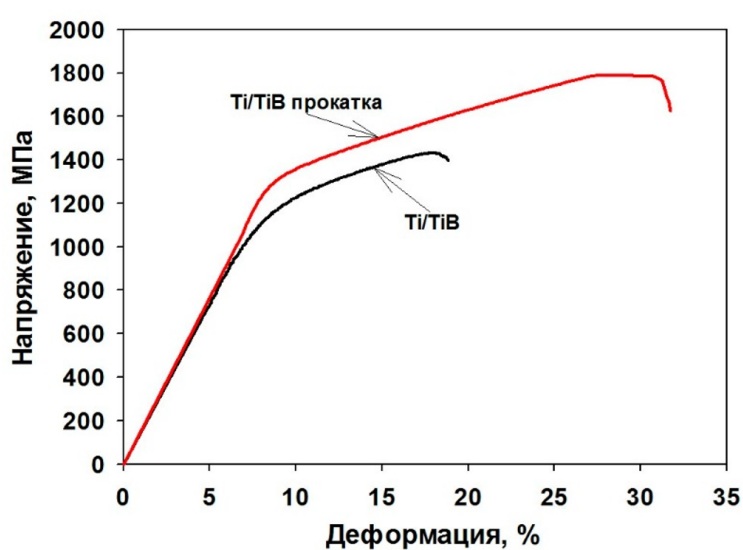


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация, полученные после испытаний на сжатие при комнатной температуре образцов композита Ti/TiB в исходном состоянии и после прокатки  
 Fig. 1. Stress-strain curves obtained after compression tests at room temperature of Ti/TiB composite specimens in the initial state and after rolling

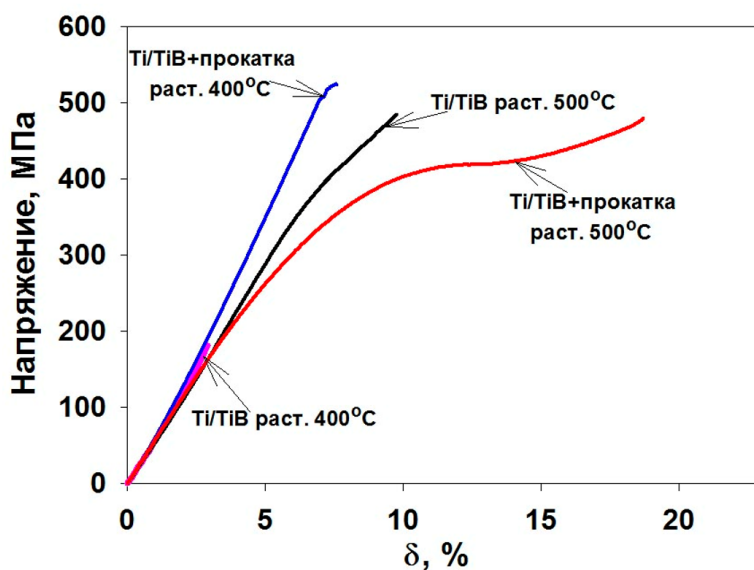


Рис. 2. Кривые напряжение-деформация композита в исходном и испытанном горячекатаном состоянии, полученные после испытаний на растяжение при 400 или 500 °С  
 Fig. 2. Stress-strain curves of the composite in the initial and tested hot-rolled states, obtained after tensile tests at 400 or 500 °С

Изображения поверхностей излома образцов композита Ti/TiB в исходном состоянии (Рис. 3а) и после горячей прокатки (Рис. 3б), испытанных на растяжение при 500 °С, показали значительную разницу в механизмах разрушения. Исходное состояние продемонстрировало хрупкий характер разрушения с фасетками, а также местами, соответствующими межкристаллитному разрушению (Рис. 3а).

После горячей прокатки испытуемый образец имел явную вязкую поверхность излома с образованием типичных ямок (Рис. 3б). Анализируя данные кривых, напряжение-деформация после растяжения при 500 °С и анализа разрушения, можно предположить о незначительном снижении температуры хрупко-вязкого перехода (на ~ 100 °С) для горячекатаного композита по сравнению с исходное состояние, ранее наблюдавшееся в этих композитах после многоосной изотермической деформации [8].

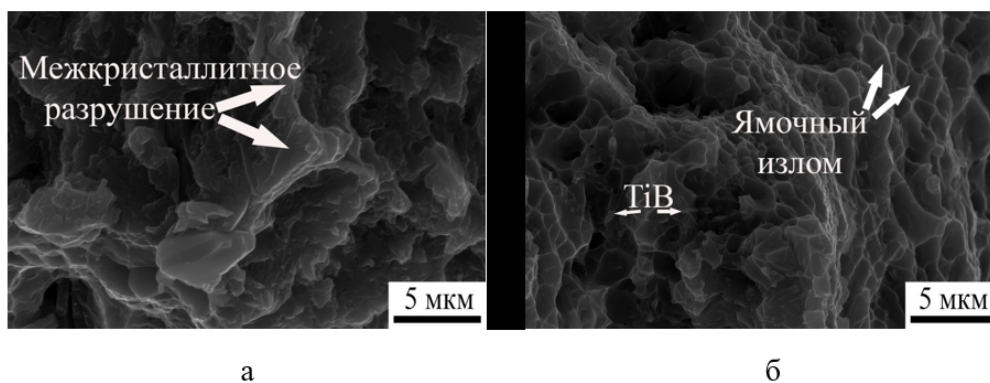


Рис. 3. Поверхности излома образцов, испытанных на растяжение при 500 °С в исходном состоянии (а) и после горячей прокатки (б); СЭМ-изображения  
 Fig. 3. Fracture surfaces of tensile tested specimens at 500 °С in the initial condition (a) and after hot rolling (b); SEM images

**4. Заключение.** После испытаний на сжатие при комнатной температуре было установлено, что после горячей прокатки композит Ti/TiB показал повышенный предел текучести и значительно улучшенные показатели пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при степени деформации на сжатие 25 %, тогда как пластичность для исходного состояния составляла 12 %. Значения предела текучести составили 930 и 1200 МПа для исходного и горячекатаного состояний, соответственно. После высокотемпературных испытаний на растяжение показано существенное улучшение высокотемпературных механических свойств композита: при температуре растяжения 500 °С пластичность в исходном состоянии составила 3 %, тогда как горячекатаный образец показал значение относительного удлинения ~ 13 %. После растяжения при 500 °С исходное состояние композита продемонстрировало хрупкий характер разрушения, соответствующий межкристаллитному разрушению, в то время как горячекатаный ММК демонстрировал явную вязкую поверхность разрушения с образованием характерных ямок.

#### References

1. Feng H., Zhou Yu, Jia D., Meng Q., Rao J. 2006. Growth Mechanism of In Situ TiB Whiskers in Spark Plasma Sintered TiB/Ti Metal Matrix Composites, *Cryst. Growth Des.* 7: 1626–1630.
2. Godfrey T. M. T., Goodwin P. S., Ward-Close C. M. 2000. Titanium particulate metal matrix composites—Reinforcement, production methods, and mechanical properties, *Adv. Eng. Mater.*, 2: 85–91.
3. Huang L., Cui X., Geng L., Fu. Y. 2012. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22: 79–83.
4. Leyens C., Peters M. 2003. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.* – Wiley-VCH: Weinheim. 499.
5. Lindroos V. K., Talvitie M. J. J. 1995. Recent advances in metal matrix composites, *Mater. Process. Technol.*, 53: 273–284.
6. Morsi K., Patel V. V. 2007. Processing and properties of titanium–titanium boride (TiBw) matrix composites – a review, *J. Mater. Sci.*, 42: 2037–2047.
7. Ozerov M., Klimova M., Vyazmin A., Stepanov N., Zhrebtsov S. 2017. Orientation relationship in a Ti/TiB metal-matrix composite, *Mater. Lett.*, 186: 168–170.
8. Ozerov M., Klimova M., Sokolovsky V., Stepanov N., Popov A., Boldin M., Zhrebtsov S. 2019. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti/TiB metal matrix composite during isothermal multiaxial forging. *J. Alloys Compd.* 770, 840–848.
9. Radhakrishna Bhat B. V., Subramanyam J., Bhanu Prasad V. V. 2002. Preparation of Ti-TiB-TiC & Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing, *Mater. Sci. Eng. A.*, 325: 126–130.
10. Ragulya A. V. 2010. Fundamentals of Spark Plasma Sintering, in *Encyclopedia of Materials.* – Science and Technology (Eds. K. H. Juergen Buschow et al.), 5.

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 08.10.2022

Поступила после рецензирования 19.11.2022

Принята к публикации 29.11.2022

---

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Болдин Максим Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского физико-технического института, ННГУ им. Н. И. Лобачевского  
пр. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия

**Озеров Максим Сергеевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории объёмных наноструктурных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

**Соколовский Виталий Сергеевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории объёмных наноструктурных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

**Поволяева Елизавета Андреевна** – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории объёмных наноструктурных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Boldin Maxim Sergeevich** – PhD, Researcher at the Research Institute of Physics and Technology, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

**Ozerov Maxim Sergeevich** – PhD, Researcher, Laboratory of Bulk Nanostructured Materials, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Sokolovsky Vitaliy Sergeevich** – PhD, Researcher, Laboratory of Bulk Nanostructured Materials, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Povolyaeva Elizaveta Andreevna** – Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Bulk Nanostructural Materials, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia