

Received: 06.06.2024

Revised: 06.08.2024

Accepted: 16.08.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.057-069

## MECHANICAL PROPERTIES OF AN Fe–Ti–Ni–B–C SHS COMPOSITE

N. B. Pugacheva<sup>a</sup>, A. V. Nokhrina<sup>b, \*</sup>, E. I. Senaeva<sup>c</sup>, and R. A. Savrai<sup>d</sup>

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru);

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0004-8283-9690>  [nokhrina2000@mail.ru](mailto:nokhrina2000@mail.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8625-2310>  [katty14-12@yandex.ru](mailto:katty14-12@yandex.ru);

<sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  [ras@imach.uran.ru](mailto:ras@imach.uran.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [nokhrina2000@mail.ru](mailto:nokhrina2000@mail.ru)

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia  
Tel.: +7 (902) 259-3642

The paper studies the structure, mechanical properties and wear resistance of a composite produced by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) with an average chemical composition, wt%:  $35.47 \pm 1.5$  Fe;  $24.08 \pm 1.4$  Ti;  $13.99 \pm 0.5$  Ni;  $17.91 \pm 0.4$  B;  $8.54 \pm 0.5$  C. Testing has revealed that the composite has wear resistance on a level with one of the Hardox 500 wear-resistant steels. The composite is characterized by a wide range of values of transverse bending strength  $R_{bm30}$  from 200 to 800 MPa. Steel 40X shows a bending strength  $R_{bm30}$  of 1590 MPa, and the values of this characteristic for the Hardox 500 steel range between 2970 and 3020 MPa. The composite has low impact strength values  $KCU = 0.02$  MJ/m<sup>2</sup>, compared with  $KCU = 0.35$  MJ/m<sup>2</sup> for steel 40X and  $KCU = 1.59$  MJ/m<sup>2</sup> for Hardox 500. The Fe–Ni–Ti–C–B SHS composite should not be used for bending parts and those experiencing shock loads; however, it suits perfectly for protecting the surfaces of parts subject to intense abrasive wear.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis (SHS), SHS composite, microstructure, abrasive wear resistance, bending strength, impact strength

### Acknowledgment

*The work was performed under the state assignment for the IES UB RAS, theme No. 124020700063-3.*

### References

1. Amosov, A.P., Borovinskaya, I.P., and Merzhanov, A.G. *Poroshkovaya tekhnologiya samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza materialov* [Powder Technology of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials]. Mashinostroenie–1 Publ., Moscow, 2007, 472 p. (In Russian).
2. Merzhanov, A.G. *Tverdoplamennoe gorenie* [Solid-Flame Combustion]. ISMAN Publ., Chernogolovka, 2000, 238 p. (In Russian).
3. *Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyi sintez: teoriya i praktika* [Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Theory and Practice: Collection of Articles, ed. by A.E. Sychev]. Territoriya Publ., Chernogolovka, 2001, 432 p. (In Russian).
4. Pugacheva, N.B., Nikolin, Yu.V., Senaeva, E.I., and Malygina, I.Yu. Structure of Fe–Ni–Ti–C–B SHS composites. *Physics of Metals and Metallography*, 2019, 120 (11), 1078–1084. DOI: 10.1134/S0031918X19110139.

5. Pugacheva, N.B., Nikolin, Yu.V., Bykova, T.M., and Senaeva, E.I. Structure and properties of a SHS Cu–Ti–C–B composite. *Physics of Metals and Metallurgy*, 2022, 123 (1), 43–49. DOI: 10.1134/S0031918X22010100.
6. Mofa, N.N., Sadykov, B.S., Bakkara, A.E., Zhuranova, G.S., and Mansurov, Z.A. Production of metal-ceramic SHS composites based on mechanochemically treated systems. *Gorenie i Plazmokhimiya*, 2018, 16 (3–4), 159–171. (In Russian).
7. Sychev, A.E., Kamynina, O.K., Umarov, L.M., Shchukin, A.S., and Zhidkov, M.V. SHS of composite materials based on Ti-Co. *Fundamentalnye Issledovaniya*, 2014, 12, 1912–1916. (In Russian).
8. Xinghong, Z., Qiang, X., Jiecai, H., and Kvanin, V.L. Self-propagating high temperature combustion synthesis of TiB/Ti composites. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 348 (1–2), 41–46. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00635-4.
9. Fan, Q., Chai, H., and Jin, Z. Role of iron addition in the combustion synthesis of TiC–Fe cermet. *Journal of Materials Science*, 1997, 32, 4319–4323. DOI: 10.1023/A:1018667722150.
10. LaSalvia, J.C., Meyers, M.A. Combustion synthesis in the Ti–C–Ni–Mo system. Part II. Analysis. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26, 3011–3019. DOI: 10.1007/BF02669657.
11. Zhang, X., He, X., Han, J., Qu, W., Kvalin, V.L. Combustion synthesis and densification of large-scale TiC–xNi cermets. *Materials Letters*, 2002, 56 (3), 183–187. DOI: DOI: 10.1016/S0167-577X(02)00437-8.
12. Zhang, W., Zhang, X., Wang, J., and Hong, C. Effect of Fe on the phases and microstructure of TiC–Fe cermets by combustion synthesis/quasi-isostatic pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 381 (1–2), 92–97. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.026.
13. Shcherbakov, V.A., Gryadunov, A.N., Barinov, Yu.N., and Botvina, O.I. Synthesis and properties of composites based on zirconium and chromium borides. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsionalnye Pokrytiya*, 2018, 1, 18–25. (In Russian). DOI: 10.17073/1997-308X-2018-1-18-25.
14. Manucharyan, A.G., Kikanyan, S.L., and Khachatryan, E.A. Corrosion resistance of a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–30%TiN metal-ceramic SHS composite to the sulfuric-acid–phosphoric-acid–water triple mixture *Molodoy Uchenyi*, 2014, 2 (61), 260–263.
15. Nikolin, Yu.V., Matevosyan, M.B., Kochugov, S.P., and Pugacheva, N.B. RF Patent No. 2680489, Byull. Izobret. No. 6, 2019.

Подана в журнал: 06.06.2024

УДК 669.017.165

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.057-069

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Fe–Ti–Ni–B–C

Н. Б. Пугачева<sup>a</sup>, А. В. Нохрина<sup>b</sup>, \* Е. И. Сенаева<sup>b</sup>, Р. А. Саврай<sup>г</sup>

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия*

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru);

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0004-8283-9690>  [nokhrina2000@mail.ru](mailto:nokhrina2000@mail.ru);

<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8625-2310>  [katty14-12@yandex.ru](mailto:katty14-12@yandex.ru);

<sup>г</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9873-3621>  [ras@imach.uran.ru](mailto:ras@imach.uran.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [nokhrina2000@mail.ru](mailto:nokhrina2000@mail.ru)  
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия  
Тел.: +7 (902) 259-36-42

Исследована структура, механические свойства и износостойкость композита, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), со средним химическим составом, вес. %: 35,47 ± 1,5 Fe; 24,08 ± 1,4 Ti; 13,99 ± 0,5 Ni; 17,91 ± 0,4 В; 8,54 ± 0,5 С. В результате испытаний установлено, что композит обладает износостойкостью на уровне с одной из износостойких сталей Hardox 500. Композит характеризуется широким интервалом значений предела прочности на поперечный изгиб  $R_{bm30}$  от 200 до 800 МПа. Сталь 40Х показала предел прочности на изгиб  $R_{bm30}$ , равный 1590 МПа, а сталь Hardox 500 – 2970–3020 МПа. Композит имеет низкие значения ударной вязкости  $KCU = 0,02$  МДж/м<sup>2</sup> по сравнению со значениями  $KCU = 0,35$  МДж/м<sup>2</sup> для стали 40Х и  $KCU = 1,59$  МДж/м<sup>2</sup> для стали Hardox 500. СВС-композит системы Fe–Ni–Ti–C–B не следует применять для деталей, работающих на изгиб и испытывающих ударные нагрузки, однако он отлично подойдет для защиты поверхностей деталей, подверженных интенсивному абразивному износу.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), СВС-композит, микроструктура, абразивная износостойкость, предел прочности на изгиб, ударная вязкость

### 1. Введение

Современный уровень развития техники вызывает необходимость создания новых материалов с особыми свойствами. Такими материалами являются композиты. В настоящее время у российского композитного рынка имеется большой потенциал для роста, развития и выхода на мировой уровень. Композиты с металлической матрицей и керамическим наполнителем имеют уникальные свойства, что обуславливает их широкое использование в таких отраслях промышленности, как авиастроение, судостроение, машиностроение, металлургия, энергетика и т. п. Однако получение данных композитов с использованием традиционных методов порошковой металлургии затруднено главным образом достижением высоких температур нагрева.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является одним из перспективных методов получения новых порошковых или монокристаллических материалов [1–3].

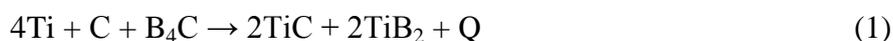
Полученные высокотемпературным синтезом композиты отличаются высокой износостойкостью и могут служить защитной поверхностью ковшей карьерных экскаваторов, дна кузовов карьерных самосвалов, скребков горнопроходческого щита, пластин транспортеров железной руды и окатышей. Процесс изготовления СВС-композитов является нестационарным. Получение двух абсолютно одинаковых композитов затруднительно, так как при малейшем изменении температуры или времени начала компактирования происходит перераспределение структурных составляющих.

В настоящее время проводятся исследования различных систем СВС-композитов [4–7]. Уже установлено, что с увеличением процентного содержания добавок Ti, Ni, Co, NiAl, Ni<sub>3</sub>Al уменьшается адиабатическая температура нагрева, снижается температура горения системы, размер зерна уменьшается, увеличивается прочность на изгиб, на сжатие и вязкость разрушения [8–11]. В статье [12] установлено, что добавление Fe в композит TiC–Fe в количестве 30 масс. % максимально повышает плотность композита. Авторы работы [4] показали, что при содержании железа и никеля в исходной порошковой смеси 70 масс. % формируется беспористый композит системы Fe–Ni–Ti–C–B. В статье [13] сообщается о получении композита системы ZrB<sub>2</sub>–CrB с пористостью 1 % при добавлении связки CrB в количестве 40 масс. %. Установлено, что увеличение этой связки до 40 масс. % повышает прочность на изгиб с 400 до 610 МПа. Изучается также и коррозионная стойкость СВС-композитов различных систем [14]. Связи структуры и свойств, установленные экспериментальными методами, помогают в изучении композитов новых систем. Традиционно проводят исследования влияния структуры и фазового состава композитов на их химические, физические, микромеханические и трибологические свойства с целью экономически или экологически выгодной замены существующих в реальных промышленных условиях технологий. В настоящее время проводятся исследования СВС-композитов различных систем, однако структура и свойства СВС-композитов с железной матрицей до сих пор недостаточно изучены. Это определяет научную новизну работы, которая заключается в исследовании износостойкости и механических свойств композита с железной матрицей, полученного методом СВС.

Цель работы – исследование износостойкости и механических свойств композита системы Fe–Ti–Ni–B–C, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

## 2. Материал и методика исследований

Композит системы Fe–Ti–Ni–B–C был изготовлен методом СВС по технологии, подробно описанной в патенте [15]. В качестве терморегулирующего компонента выступали порошки Ti, B<sub>4</sub>C, C и обеспечивали протекание экзотермической реакции:



Структуру полученного композита исследовали на оптическом микроскопе Neophot 21. Средний химический состав был определен с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 XT по десяти участкам 2 × 2 мм. Испытания на абразивную износостойкость проводили на лабораторной установке знакопеременного движения при возвратно-поступательном скольжении плоской торцевой поверхности пальчиковых образцов композита по поверхности пластины с закрепленным на ней электрокорундовым абразивом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с зернистостью 160 мкм и твердостью 2000 HV при постоянной нагрузке 49 Н. Скольжение торцевых поверхностей композита проходило со средней скоростью 0,175 м/с, при этом поперечное смещение образца на один двойной ход составило 0,8 мм, а путь трения – 18 м. Взвешивание образцов во время испытаний проводили на аналитических весах с точностью 0,0001 мг. Площадь образца определяли замером сторон квадрата микрометром с точностью до 0,01 мм. Рельеф поверхности раз-

рушения образцов после испытаний исследован на сканирующем микроскопе Tescan в соответствии с терминами и определениями РД 50-672-88. Шероховатость поверхности износа определяли на оптическом профилометре Wyko NT-1100 по ГОСТ 2789-73.

Испытания на поперечный изгиб проводили на сервогидравлической машине Instron по ГОСТ 20019-74 на образцах типа А. Скорость испытания составляла 0,2 мм/мин, а расстояние между осями опор – 30 мм. Предел прочности на изгиб был рассчитан по формуле

$$R_{bm} = \frac{3F \cdot l}{2l^2 \cdot b}, \quad (2)$$

где  $F$  – максимальная сила, приводящая к разрушению образца;  $l$  – расстояние между опорами;  $h$  – высота образца;  $b$  – ширина образца. Предел текучести рассчитывали по формуле

$$\sigma_{0,2} = \frac{F}{h \cdot b}. \quad (3)$$

Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре Tinius Olsen IT542M в соответствии с ГОСТ 9454-78 на образцах типа 1 с поперечным сечением  $10 \times 10$  мм. Ударную вязкость рассчитывали по формуле

$$KCU = \frac{A}{H \cdot B}, \quad (4)$$

где  $A$  – работа удара;  $H$  – начальная высота рабочей части;  $B$  – начальная ширина образца.

Для сравнения были испытаны образцы из износостойкой и коррозионностойкой стали 40Х и высокопрочной стали Hardox 500.

### 2.1. Структура и фазовый состав СВС-композиата

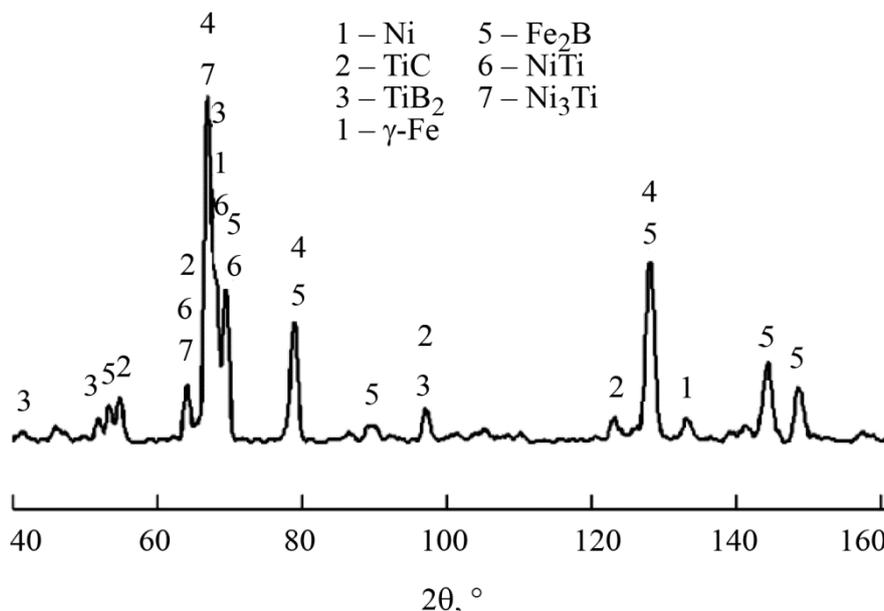


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы СВС-композиата [4]

Фазовый состав композита был подробно изучен ранее и представлен в работе [4] (рис. 1). Матрицей композита является твердый раствор никеля в  $\gamma$ -Fe, а армирующими фазами – частицы карбида титана TiC и диборида титана TiB<sub>2</sub>, образовавшиеся в результате

СВС. В структуре композита присутствуют также частицы упрочняющих фаз, образовавшиеся в результате превращений в металлической матрице: бориды железа  $Fe_2B$  и никелиды титана  $Ni_3Ti$  и  $NiTi$ . Частицы упрочняющих фаз неравномерно распределены по объему композита (рис. 2 а). Сталь 40Х имеет перлитно-ферритную структуру с соотношением «перлит/феррит» 85/15 по шкале 7 ГОСТ 8233-56 (рис. 2 б). Перлит имеет пластинчатое строение и соответствует баллу 6 по шкале 1 ГОСТ 823-56 с межпластинчатым расстоянием 0,6 мкм. Сталь Hardox 500 имеет структуру крупноугольчатого мартенсита балла 9 по шкале 3 ГОСТ 823-56 (рис. 2 в).

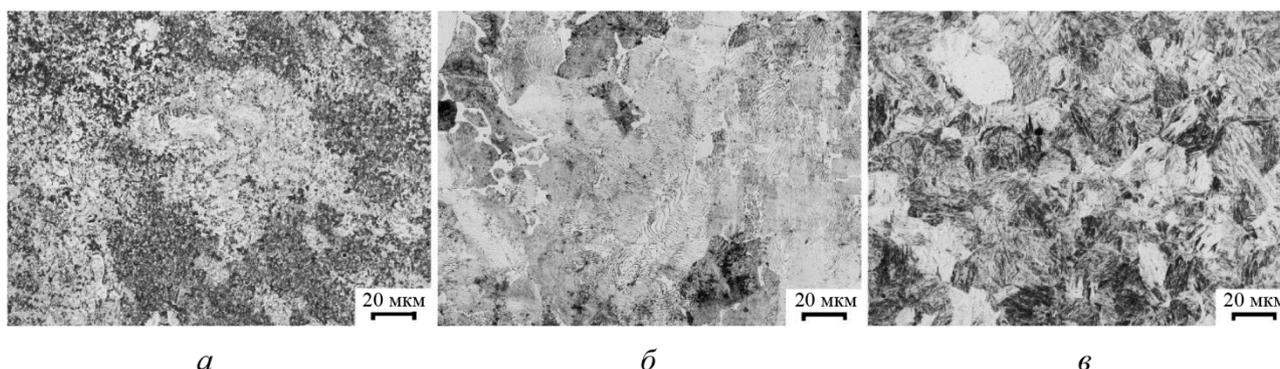


Рис. 2. Структура: СВС-композит (а); 40Х (б); Hardox 500 (в)

### 2.2. Абразивная износостойкость

В табл. 1 представлены результаты расчетов после проведенных испытаний на износостойкость. В результате относительный износ  $\epsilon$  и интенсивность изнашивания  $I_h$  СВС-композита не намного отличаются от результатов стали Hardox 500.

Таблица 1

Результаты испытаний на износостойкость

Состав	$\Delta m_{отн}, \%$	$\epsilon$	$f$	$I_h$	$W, \text{кДж/см}^3$	$R_a, \text{мкм}$
СВС-композит	1,8	1,95	0,52	4,1	12,8	1,49
	2,5	1,39	0,55	5,7	9,8	
Сталь 40Х	1,3	1	0,65	3,6	18,5	2,0
	1,3	1	0,66	3,5	19,1	
Hardox 500	1,7	1,05	0,68	4,8	14,6	1,2
	1,5	1,14	0,58	4,2	14,9	

Частицы износа стали 40Х и исследованного композита образовались по механизму скола, что свойственно абразивному износу по механизму хрупкого скола (рис. 3, 4). Частицы износа стали Hardox 500 имеют суставчатый вид, характерный для абразивного износа по механизму пластичного резания (рис. 5).

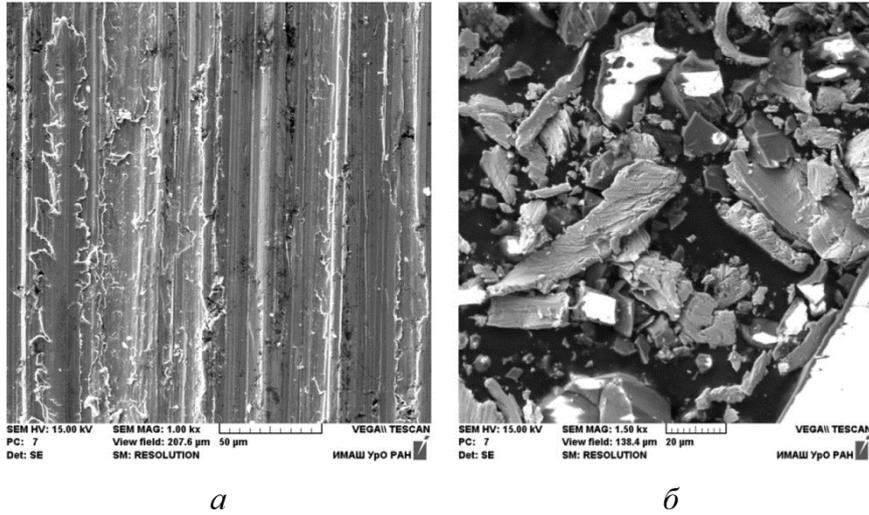


Рис. 3. Поверхность износа (а) с частицами износа (б) стали 40Х

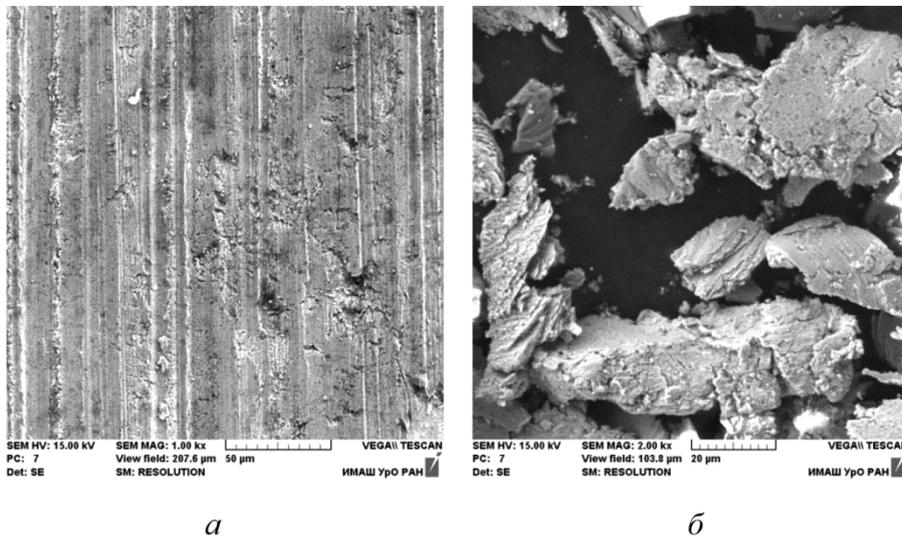


Рис. 4. Поверхность износа (а) с частицами износа (б) композита

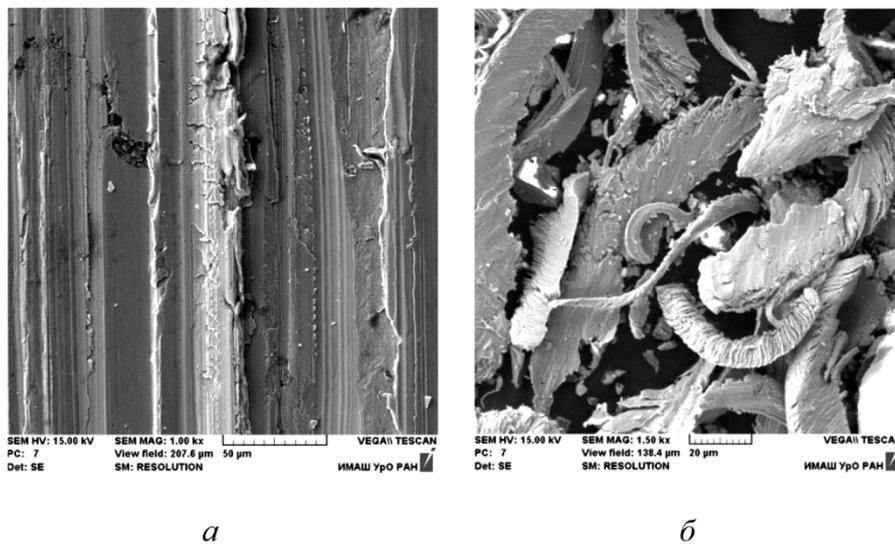


Рис. 5. Поверхность износа (а) с частицами износа (б) стали Hardox 500

В результате исследованный композит показал износостойкость ( $\varepsilon = 1,39$ ), близкую к значению этой характеристики ( $\varepsilon = 1,05$ ) для Hardox 500, одной из самых износостойких сталей. Это позволяет характеризовать СВС-композит с железной матрицей как довольно износостойкий материал.

### 2.3. Прочность на поперечный изгиб СВС-композита

В результате испытаний на поперечный изгиб образцы СВС-композита хрупко разрушились (рис. 6 а). На образцах стали 40Х появились трещины, но полного разрушения образца с разделением его на две части не наблюдали (рис. 6 б). Образцы Hardox 500 показали отличную прочность на изгиб без разрушения (рис. 6 в). По результатам испытаний композит имеет прочность на изгиб в широком интервале значений  $R_{bm30}$  от 200 до 800 МПа (табл. 2). Такой разброс значений связан с неоднородным распределением структурных составляющих в объеме композита [4], а также с наличием микродефектов в виде мелких пор, которые также неравномерно распределены. Прочность композита меньше, чем у сталей 40Х и Hardox 500 (табл. 2).

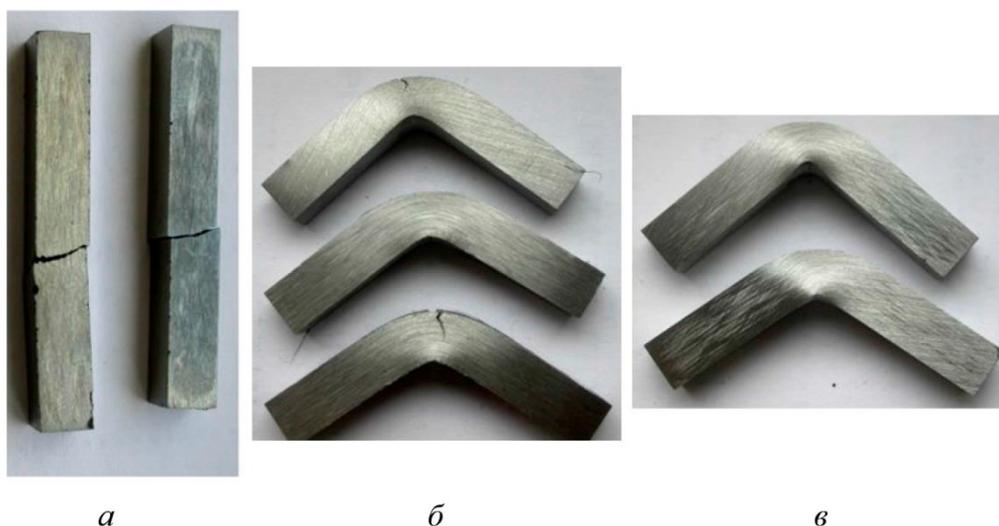


Рис. 6. Внешний вид образцов после поперечного изгиба: СВС-композит (а); 40Х (б); Hardox 500 (в)

Таблица 2

Результаты испытаний на поперечный изгиб

Материал	Высота/ширина	$R_{bm30}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}^{изг}$ , МПа
40X	5,01/5,06	1590	16,7	660
	5,01/5,06	1590	17,0	660
	5,00/5,00	1590	16,3	650
Hardox 500	5,05/5,05	3020	12,8	2010
	5,05/5,05	2970	12,8	1960
СВС-композит	4,87/4,95	220	–	–
	4,83/4,90	800	–	–
	4,86/4,95	670	–	–

#### 2.4. Ударная вязкость СВС-композиата

По проведенным испытаниям на ударную вязкость КСЧУ замечено, что сталь 40Х и композит имеют низкую ударную вязкость по сравнению со сталью Hardox 500 (табл. 3). При этом композит более хрупкий, чем сталь 40Х. Поверхность макроизлома после испытаний композита на ударную вязкость матовая, однородная, соответствует бархатистому излому (рис. 7 а). Такой излом характеризуется мелкокристаллическим строением, трудно различимым визуалью, поверхностью разрушения серого цвета с тусклым металлическим отливом, напоминающим бархат. При рассмотрении на микроуровне в изломе выявляются фасетки скола и квазискола. Бархатистый излом обычно встречается у закаленных инструментальных сталей, высокопрочных низкоотпущенных конструкционных сталей с мелкозернистой структурой в литом и деформированном состояниях. Излом стали Hardox 500 неоднородный, имеются следы сильной пластической деформации по краям образцов, так как разрушение происходило с большим усилием и высокой работой разрушения (рис. 7 б). В центральной части образца морфология поверхности разрушения имеет характер волокнисто-чешуйчатого излома. Излом стали 40Х по макрогеометрии имеет однородную блестящую поверхность (рис. 7 в). По морфологии поверхности разрушения излом является камневидным. Такой излом характеризуется грубозернистым строением и имеет место у перегретых материалов или в стали при распространении трещины по границам зерен. При рассмотрении на микроуровне выявляются фасетки межзеренного разрушения. На поверхности фасеток могут наблюдаться ямки, глубина и диаметр которых невелики.

Таблица 3

Результаты испытаний на ударную вязкость

Материал	№ образца	H, мм	h <sub>0</sub> , мм	B, мм	L, мм	S <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup>	КСЧУ, МДж/м <sup>2</sup>	A, Дж
СВС-композит	1	9,72	7,76	9,72	54,53	75,43	0,02	1,74
	2	9,73	7,76	9,72	54,56	75,43	0,02	1,56
Эталон Hardox 500	1	10,03	8,05	10,02	54,84	80,66	1,58	127,22
	2	10,04	8,09	10,02	54,85	81,06	1,52	123,25
	3	10,01	8,12	10,04	54,87	81,52	1,59	129,39
Сталь 40Х	1	9,98	8,23	9,97	54,90	82,05	0,34	27,85
	2	9,96	8,22	9,94	54,92	81,71	0,35	28,86
	3	9,96	8,16	9,95	54,85	81,19	0,32	26,14

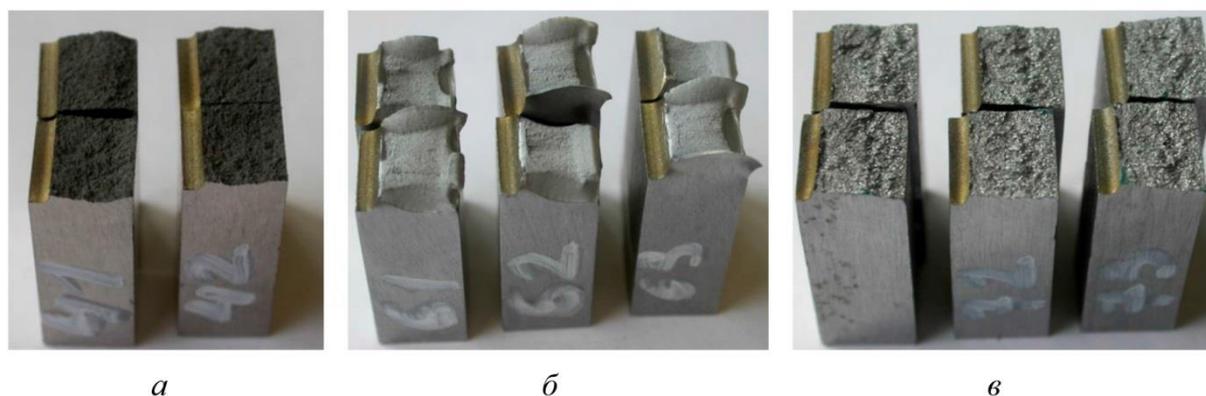


Рис. 7. Внешний вид поверхности излома образцов после поперечного изгиба: СВС-композит (а); Hardox 500 (б); 40Х (в)

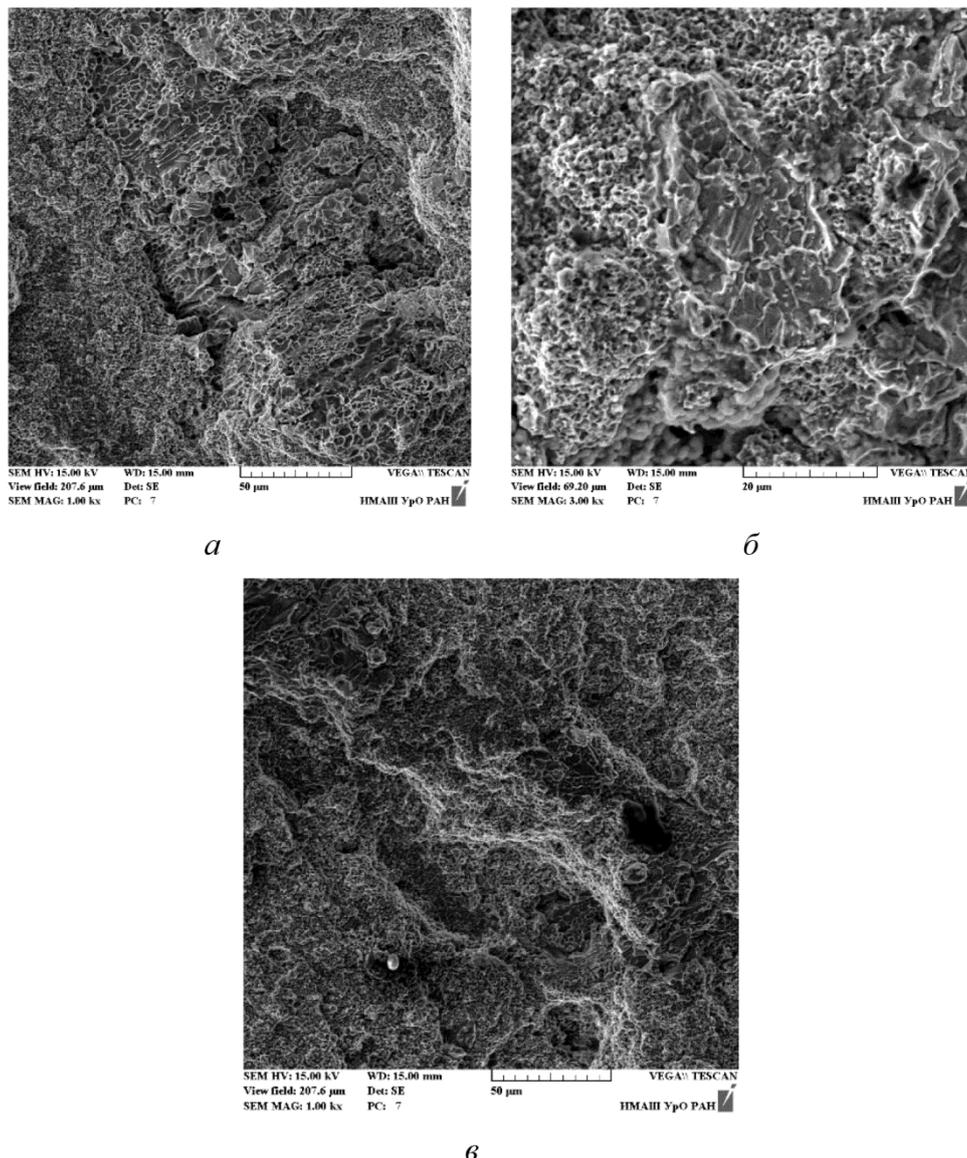


Рис. 8. Микрорельеф излома СВС-композита:  
сотовый рельеф (а); фасетки скола (б); гребни (в)

Микрорельеф изломов СВС-композита имеет вид мелких плоских ямок, называемый сотовым рельефом (рис. 8 а). Такой рельеф говорит о малой доле локальной пластической деформации. Также в микрорельефе замечены фасетки скола, которые характеризуют внутризеренное хрупкое разрушение (рис. 8 б). Кроме всего перечисленного, в микрорельефе СВС-композита присутствуют гребни (рис. 8 в), образующиеся в результате пластической деформации и разрушения перемычек ямок. Излом СВС-композита имеет в основном хрупкий характер разрушения с элементами вязкого. Низкая ударная вязкость, очевидно, обусловлена большим количеством упрочняющих фаз в композите, а также внутренними порами.

По результатам испытания максимальную ударную вязкость КСУ, равную 1,59 МДж/м<sup>2</sup>, показала сталь Hardox 500. В микрорельефе этого образца преобладают вытянутые глубокие ямки (рис. 9). Глубина ямок характерна для условно высокой работы разрушения (п. 2.6.3 РД 50-672-88). Такой микрорельеф характерен для вязкого излома.

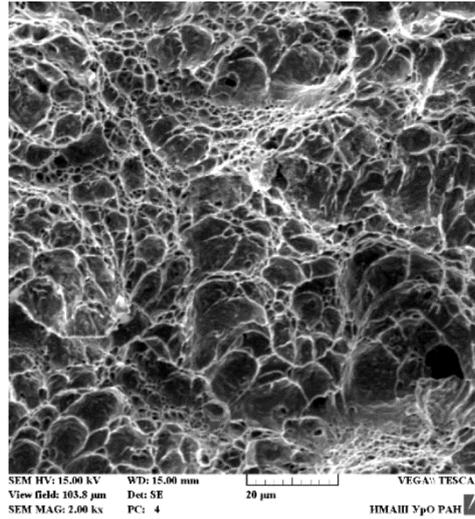
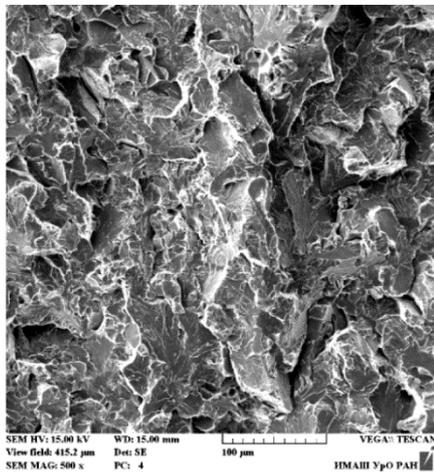
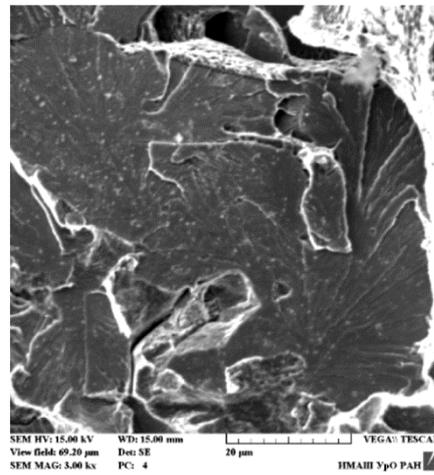


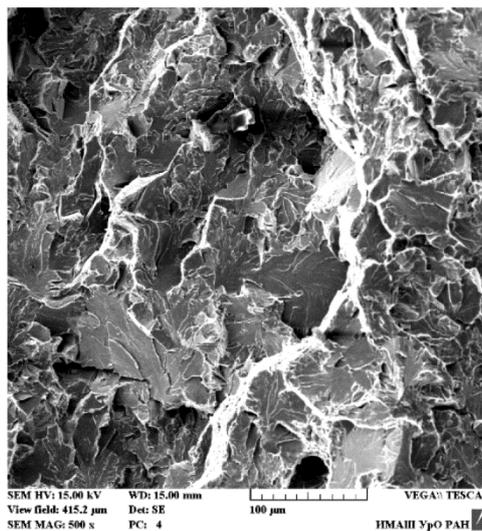
Рис. 9. Микрорельеф излома стали Hardox 500



*а*



*б*



*в*

Рис.10. Микрорельеф излома стали 40Х:  
фасетки скола (*а*); ручьистые узоры (*б*); ступеньки (*в*)

Образцы из стали 40X разрушились хрупко, тем не менее ударная вязкость KCU выше, чем у композита, и равна  $0,35 \text{ МДж/м}^2$ . Микрорельеф состоит из фасеток скола, свидетельствующих о внутризеренном хрупком разрушении (рис. 10 а). Размер фасеток скола гораздо больше, чем у композита. На поверхности фасеток имеются ручьиобразные (веерообразные) узоры (рис. 10 б). Ступеньки в микрорельефе соответствуют изменению направления роста трещин (рис. 10 в). Сталь 40X имеет хрупкий излом.

### 3. Заключение

Полученные данные в ходе испытаний на поперечный изгиб и на ударную вязкость позволяют сделать вывод о том, что СВС-композит системы Fe–Ti–Ni–B–C нельзя использовать при конструировании деталей, работающих на изгиб и испытывающих ударные нагрузки, однако он отлично подойдет для защиты поверхностей элементов конструкций, подверженных интенсивному абразивному износу. В результате испытания на износостойкость СВС-композит системы Fe–Ti–Ni–B–C продемонстрировал достаточно высокий показатель износостойкости  $\epsilon = 1,39$ , что не намного отличается от показателей одной из самых износостойких сталей – шведской стали Hardox 500.

### Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020700063-3.*

### Литература

1. Амосов А. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. – М. : Машиностроение–1, 2007. – 472 с.
2. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. – Черноголовка : ИСМАН, 2000. – 238 с.
3. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика : сборник статей / под ред. А. Е. Сычева. – Черноголовка : Территория, 2001. – 432 с.
4. The structure of SHS composites of the Fe–Ni–Ti–C–B system / N. B. Pugacheva, Yu. V. Nikolin, E. I. Senaeva, I. Yu. Malygina // Physics of Metals and Metallurgy. – 2019. – Vol. 120, No. 11. – P. 1174–1180. – DOI 10.1134/S0015323019110135.
5. Structure and properties of a SHS Cu–Ti–C–B composite / N. B. Pugacheva, Yu. V. Nikolin, T. M. Vykova, E. I. Senaeva // Physics of Metals and Metallurgy. – 2022. – Vol. 123 (1). – P. 43–49. – DOI: 10.1134/S0031918X22010100.
6. Получение металлокерамических СВС-композитов на основе механохимически обработанных систем / Н. Н. Мофа, Б. С. Садыков, А. Е. Баккара, Г. С. Журанова, З. Л. Султанова, З. А. Мансуров // Горение и плазмохимия. – 2018. – Т. 16 (3–4). – С. 159–171.
7. СВС композиционных материалов на основе сплава Ti–Co / А. Е. Сычев, О. К. Камынина, Л. М. Умаров, А. С. Щукин, М. В. Жидков // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 1912–1916.
8. Self-propagating high temperature combustion synthesis of TiB/Ti composites / Z. Xinghong, X. Qiang, H. Jiecai, V. L. Kvanin // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 348 (1–2). – P. 41–46. – DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00635-4.
9. Fan Q., Chai H., Jin Z. Role of iron addition in the combustion synthesis of TiC–Fe cermet // Journal of Materials Science. – 1997. – Vol. 32. – P. 4319–4323. – DOI: 10.1023/A:1018667722150.
10. LaSalvia J. C., Meyers M. A. Combustion synthesis in the Ti–C–Ni–Mo system. Part II. Analysis // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1995. – Vol. 26. – P. 3011–3019. – DOI: 10.1007/BF02669657.

11. Combustion synthesis and densification of large-scale TiC–xNi cermets / X. Zhang, X. He, J. Han, W. Qu, V. L. Kvalin // *Materials Letters*. – 2002. – Vol. 56 (3). – P. 183–187. – DOI: 10.1016/S0167-577X(02)00437-8.
12. Effect of Fe on the phases and microstructure of TiC–Fe cermets by combustion synthesis/quasi-isostatic pressing / W. Zhang, X. Zhang, J. Wang, C. Hong // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 381 (1–2). – P. 92–97. – DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.026.
13. Синтез и свойства композитов на основе боридов циркония и хрома / В. А. Щербаков, А. Н. Грядунов, Ю. Н. Баринов, О. И. Ботвина // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2018. – № 1. – С. 18–25.
14. Коррозионная стойкость СВС- металлокерамического композита Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–30об. % TiN в тройной смеси серная кислота–фосфорная кислота–вода / А. Г. Манучарян, С. Л. Киканян, Э. А. Хачатрян // *Молодой ученый*. – 2014. – № 2 (61). – С. 260–263.
15. Патент № 2680489 Рос. Федерация. Способ изготовления многослойной износостойкой пластины : № 2017139013 : заявл. 10.11.2017 : опубл. 21.02.2019 / Николин Ю. В., Матвоян М. Б., Кочугов С. П., Пугачева Н. Б. – 11 с.