

**Алина Вячеславовна Нохрина^{1,2*}, Наталия Борисовна Пугачева^{1,2},
Дмитрий Иванович Вичужанин¹, Татьяна Михайловна Быкова^{1,2}**

¹ Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**nokhrina2000@mail.ru*

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ СВС-КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Ni-Fe-Cr-Ti-B- C ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Исследовано влияние процесса пластической деформации на структурное состояние СВС-композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C. Структура полученного композита состоит из матрицы, представляющей собой механическую смесь твердых растворов: аустенита и феррита, а также упрочняющих частиц карбида и диборида титана. Пластическая деформация осуществлялась методом горячей прокатки при температуре 1000°C в условиях всестороннего сжатия. Истинная пластическая деформация составила $\varepsilon=0,6$. По данным EBSD-анализа в аустенитных зернах активно происходит динамическая рекристаллизация, в ферритных преобладает динамическая полигонизация.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композит, микроструктура, прокатка, пластическая деформация, динамическая рекристаллизация, динамическая полигонизация.

Alina V. Nokhrina^{1,2}, Nataliya B. Pugacheva^{1,2}, Dmitry I. Vichuzhanin¹, Tatyana M. Bykova^{1,2}

¹ E.S. Gorkunov Institute of Mechanical Engineering, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

STRUCTURE CHANING OF THE SHS COMPOSITE SYSTEM AFTER PLASTIC DEFORMATION

The composite of the Ni-Fe-Cr-Ti-B-C system is made by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The microstructure of the composite is studied. The matrix of the composite consists of the mixture of solid solutions: austenite and ferrite. Hot plastic deformation of the composite performs by means of dynamic recrystallization of austenite and ferrite grains in matrix.

Key words: self-propagating high-temperature synthesis, composite, matrix, microstructure, deformation heat treatment, dynamic recrystallization.

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является одним из перспективных методов получения новых порошковых и монокристаллических материалов [1-3]. Достоинствами данного метода

является получение композитов с высокой прочностью, твердостью и износостойкостью в условиях тяжелого контактного нагружения. Технологии изготовления таких композитов также включают в себя метод СВС-экструзии для придания им определенных форм и размеров. Наличие большого количества упрочняющих фаз в композите затрудняет пластическую деформацию при комнатной температуре. Таким образом, сочетание деформации и нагрева является единственным способом реализации пластической деформации твердых и износостойких СВС-композитов.

Целью работы было исследование изменения структурного состояния композита Ni-Fe-Cr-Ti-B-C после горячей пластической деформации для определения пластичной структурной составляющей, которая обеспечивает протекание пластической деформации композита без разрушения.

Композит системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C был получен методом СВС [4]. Материалами для изготовления были выбраны порошки: титана ПТМ-1, карбида бора М20, углерода технического П-804Т, железа ПЖРВ-3, никеля ПНК-УТЗ, хрома ПХ1М. Порошки Fe, Ni, Cr формируют матрицу композита, а порошки Ti, С и В₄С являются термореагирующими компонентами (ТРК). Исходя из проведенных ранее исследований [5] было взято оптимальное, с точки зрения получения минимальной пористости, содержание ТРК равное 30 масс. %.

Порошковая смесь была засыпана в стальную трубу марки Ст3. Первичное компактирование проводили с помощью специальной оснастки, нагрев до температуры начала экзотермических реакций (1030°С) осуществляли в электрической печи. Горячая заготовка после завершения синтеза была подвергнута прессованию на гидравлическом прессе при нагрузке 250 МПа. В результате образовался монолитная сэндвич-пластина, внутри которой сформировался композит, окруженный стальной оболочкой. Для исследований микроструктуры после пластической деформации были вырезаны образцы с центральной части пластины.

Структуру композита исследовали до и после пластической деформации на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGAII XMU с энергодисперсионной приставкой фирмы OXFORD. EBCD-анализ выполнен с помощью программного комплекса к приставке Oxford Nklnordlys+. Фазовый рентгеноструктурный анализ получен на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU в k_α излучении хрома.

Микротвердость измеряли на приборе Fischerscope HM2000 XYm по стандарту ISO 14577 с максимальной нагрузкой на индентор Виккерса 0,980 Н, временем нагружения 20 сек, выдержкой 15 сек и временем разгрузки 20 сек.

Деформация была проведена на прокатном стане дуо конструкции ЦНИИТ-МАШ. Образец перед осуществлением деформации был запрессован в стальную оболочку толщиной 10 мм, а сверху и снизу были приварены стальные пластины толщиной 6 мм (рис. 1 а, б). Образец нагревали до 1000°С в печи электросопротивления в течении 40 мин. Затем деформировали в горячем состоянии в два прохода [6].



Рис. 1. Внешний вид композита: *а* – в стальной оболочке, *б* – с приваренными пластинами

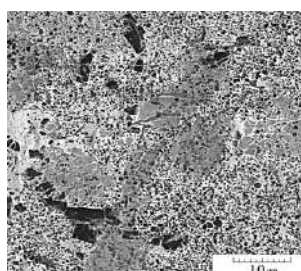
Химический состав полученного композита определяли путем усреднения результатов сканирования поверхности десяти участков площадью 2×2 мм (табл. 1).

Таблица 1

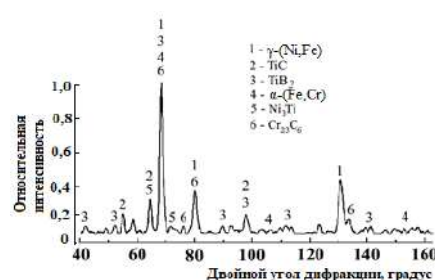
Химический состав композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C, масс. %

Ni	Fe	Cr	Ti	B	C
26	20	11	28	8	6

Матрица композита состоит из твердых растворов: феррита, легированного хромом, и аустенита, обогащенного никелем (рис. 2). Упрочняющими фазами являются частицы карбида и диборида титана. Рентгеноструктурный анализ показал, что в композите присутствуют шесть фаз (рис. 2 б). При определении химического состава выделили четыре структурные составляющие, представляющие собой механические смеси нескольких фаз: 1 – α -(Cr,Fe) + TiB₂ + TiC + Cr₂₃C₆; 2 – γ -(Ni,Fe) + TiC + Cr₂₃C₆ + Ni₃Ti, 3 – γ -(Ni,Fe) + TiC + TiB₂ + Cr₂₃C₆ + Ni₃Ti; 4 – γ -(Ni,Fe) + TiB₂ + TiC + Ni₃Ti. Минимальной твердостью характеризуется структурная составляющая 1 с ферритной матрицей (табл. 2).



а



б

Рис. 2. Микроструктура (*а*) и фрагмент дифрактограммы (*б*) композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C

Таблица 2

Микротвердость структурных составляющих композита, HV_{0,1} (±5)

1	2	3	4
590	724	938	1200

Сразу после синтеза композит подвергли горячему прессованию. По результатам EBSD-анализа замечено, что в аустените преобладают деформационные процессы, а в ферритной составляющей матрицы рекристаллизационные. Основа аустенитной составляющей матрицы следующая: деформационные зерна (71 %), субструктура (28 %), рекристаллизационные зерна (1 %) (рис. 3 а). В ферритной составляющей преобладает субструктура (80 %), рекристаллизационные зерна составляют 7 % матрицы, деформационные 13 %.

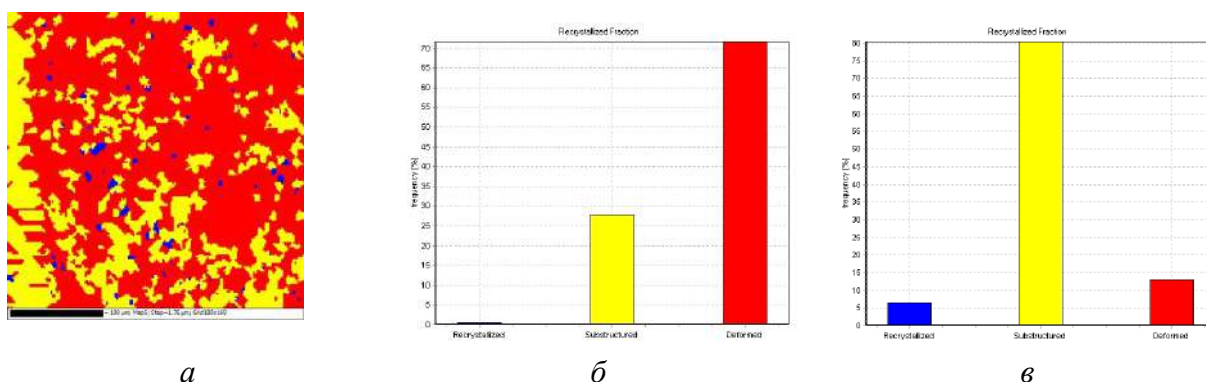


Рис. 3. Карта рекристаллизации (а) композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C после горячего прессования; б – график рекристаллизации зерен аустенита γ -(Ni,Fe); в - график рекристаллизации зерен феррита α -(Fe,Cr)

После горячей прокатки на величину $\varepsilon=0,6$ в феррите стало 48 % деформированных зерен, 48 % субструктуры и 4 % рекристаллизационных зерен, в аустените 92 % деформированных зерен, 5 % субзерен и 3 % рекристаллизованных зерен (рис. 4).

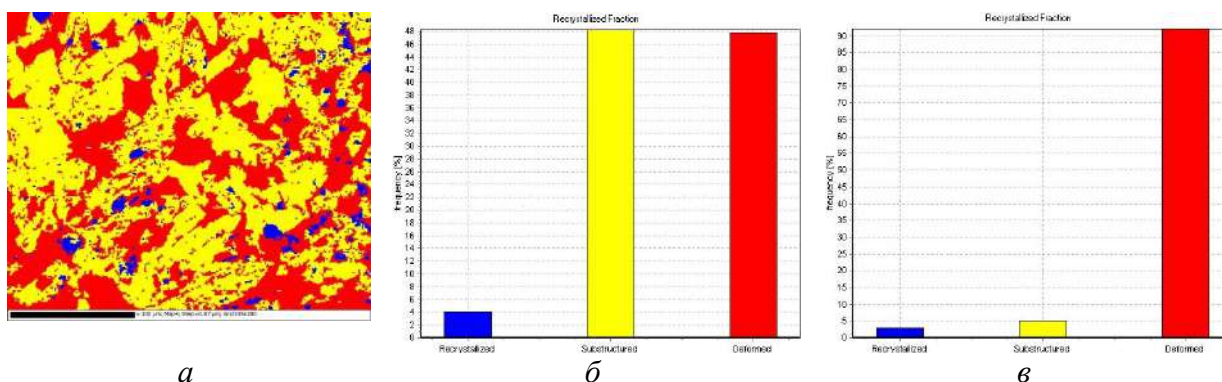


Рис. 4. Карта рекристаллизации (а) композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C после горячей прокатки; б – график рекристаллизации зерен аустенита γ -(Ni,Fe), в - график рекристаллизации зерен феррита α -(Fe,Cr)

Заключение

В ходе исследования были получены результаты изменения структуры СВС-композита системы Ni-Fe-Cr-Ti-B-C при горячей прокатке (1000°C). Минимальной твердостью обладает механическая смесь α -(Cr,Fe) + TiB_2 + TiC + Cr_{23}C_6 . Выявлено, что деформация происходит благодаря динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. В аустените наиболее

активно развивается пластическая деформация, поэтому при горячей прокатке преобладает динамическая рекристаллизация, в феррите же происходит динамическая полигонизация.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов : учебное пособие. – Москва : Машиностроение-1, 2007. 472 с.
2. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение – Черноголовка: Изд-во ИСМАН, 2000. 224 с.
3. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез /под ред. А.Е. Сычева: сборник статей. – Черноголовка: Территория, 2001. 432 с.
4. Патент на изобретение №2680489. Способ изготовления многослойной износостойкой пластины/ Николин Б.В., Матевосян М.Б., Кочугов С.П., Пугачева Н.Б; Приоритет от 10.11.2017 до 10.11.2037.
5. Pugacheva N.B., Nikolin Tu.V., Malygina I. Yu., Trushina E.B. Formation of the structure of Fe-Ni-Ti-C-B composites under self-propagating hightemperature synthesis. AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 2053. P. 020013. DOI: 10.1063/1.5084359.
6. Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N. Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.

REFERENCES

1. Amosov A.P., Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G. Powder technology of self-propagating high-temperature synthesis of materials : textbook. – Moscow : Mashinostroenie-1, 2007. 472 p.
2. Merzhanov A.G. Solid flame gorenje – Chernogolovka: ISMAN Publishing House, 2000. 224 p.
3. Self-propagating high-temperature synthesis / edited by A.E. Sychev: collection of articles. – Chernogolovka: Territory, 2001. 432 p.
4. Patent for invention No. 2680489. Manufacturing method of multilayer wear-resistant plate/ Nikolin B.V., Matevosyan M.B., Kochugov S.P., Pugacheva N.B.; Priority from 10.11.2017 to 10.11.2037.
5. Pugacheva N.B., Nikolin Tu.V., Malygina I. Yu., Trushina E.B. Formation of the structure of Fe-Ni-Ti-C-B composites under self-propagating hightemperature synthesis. AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 2053. P. 020013. DOI: 10.1063/1.5084359.
6. Salikhyanov D., Kamantsev I., Michurov N. Technological shells in rolling processes of thin sheets from hard-to-deform materials. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023. DOI: 10.1007/s11665-023-07834-4.