

УДК 621.762 : 621.777 + 620.178.15 + 544.45
DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-12-19

СВС-компактирование керметов на основе TiC с использованием механически активированных смесей

© 2021 г. Ю.В. Богатов, В.А. Щербаков

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН (ИСМАН),
г. Черноголовка, Россия

Статья поступила в редакцию 01.12.20 г., доработана 31.01.21 г., подписана в печать 03.02.21 г.

Аннотация: Настоящая работа относится к области получения металлокерамических композиционных материалов методом СВС-компактирования. Изучено влияние механической активации (МА) металлических компонентов, содержащихся в реакционных смесях на основе системы Ti + C + Cr + Ni, при обработке размольными телами в шаровой мельнице на структуру и свойства получаемых композитов. Были использованы два способа МА металлических порошков Ti, Cr и Ni. В первом случае порошки Cr и Ni активировали размольными телами отдельно от остальных компонентов реакционных смесей, а затем смешивали с порошками титана и сажи. Показано, что предварительная МА инертных компонентов снижает температуру и скорость горения, приводя к росту среднего размера карбидных зерен. Второй способ МА заключался в совместной обработке в шаровой мельнице порошковых смесей Ti + Cr, Ti + Ni и Ti + Cr + Ni, которые затем смешивали с сажей. В этом случае обеспечивалась механическая активация частиц титана при минимальном воздействии размольных тел на порошки Cr и Ni. Это обуславливало увеличение скорости и температуры горения, уменьшение среднего размера карбидных зерен и повышение однородности структуры композитов. Предложен механизм взаимодействия реагентов (Ti + C) с участием активированных частиц Cr и Ni в зонах горения и структурообразования, согласно которому МА инертных компонентов приводит к их непосредственному участию в реакционном взаимодействии титана с углеродом, что определяет снижение скорости и температуры горения и влияет на дисперсность и однородность структуры компактных композитов. Полученные результаты были использованы для повышения однородности и измельчения структуры композита СТИМ-3Б (синтетического твердого инструментального материала марки 3Б).

Ключевые слова: СВС-компактирование, СВС-композиты, TiC–Cr–Ni, механическая активация, скорость и температура горения, дисперсность и однородность микроструктуры.

Богатов Ю.В. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории энергетического стимулирования физико-химических процессов ИСМАН (142432, Московская обл., Ногинский р-н, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8).
E-mail: xxbroddy@gmail.com.

Щербаков В.А. – докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией энергетического стимулирования физико-химических процессов ИСМАН. E-mail: vladimir@ism.ac.ru.

Для цитирования: Богатов Ю.В., Щербаков В.А. СВС-компактирование керметов на основе TiC с использованием механически активированных смесей. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. No. 4. С. 12–19. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-12-19.

SHS compaction of TiC cermets using mechanically activated mixtures

Yu.V. Bogatov, V.A. Shcherbakov

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN),
Chernogolovka, Russia

Received 01.12.2020, revised 31.01.2021, accepted for publication 03.02.2021

Abstract: This paper focuses on obtaining cermet composite materials by SHS compaction. The study covers the effect of mechanical activation of metal components contained in reaction mixtures based on the Ti + C + Cr + Ni system when treated with grinding media in a ball mill. Two mechanical activation methods were used for Ti, Cr and Ni metal powders. In the first method, Cr and Ni powders were activated with grinding media separately from other reaction mixture components, and then

mixed with titanium and carbon black powders. It is shown that the preliminary mechanical activation of inert components reduces the temperature and rate of combustion and increases the average size of carbide grains. In the second method, Ti + Cr, Ti + Ni, and Ti + Cr + Ni powder mixtures were jointly processed in a ball mill, and then mixed with carbon black. This method provided mechanical activation of titanium particles with a minimum effect of grinding media on Cr and Ni powders. This led to an increase in the combustion rate and temperature, a decrease in the average size of carbide grains, and an increase in the composite structure homogeneity. A mechanism is proposed for the interaction of reagents (Ti + C) with the participation of activated Cr and Ni particles in combustion and structure formation zones, according to which the mechanical activation of inert components leads to their direct participation in the reaction interaction of titanium with carbon, which determines a decrease in the combustion rate and temperature and affects the fineness and structural homogeneity of compact composites. The results obtained were used to increase the structural homogeneity and fineness of the STIM-3B composite (Grade 3B synthetic hard tool material).

Keywords: SHS compaction, SHS composites, TiC–Cr–Ni, mechanical activation, combustion rate and temperature, microstructure fineness and homogeneity.

Bogatov Yu.V. – Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Laboratory of energy stimulation of physical and chemical processes of Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN) (142432, Russia, Moscow region, Noginsk district, Chernogolovka, Academician Osip'yan str., 8). Email: xxbroddy@gmail.com.

Shcherbakov V.A. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of the Laboratory of energy stimulation of physical and chemical processes, ISMAN. E-mail: vladimir@ism.ac.ru.

For citation: Bogatov Yu.V., Shcherbakov V.A. SHS compaction of TiC cermets using mechanically activated mixtures. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 4. P. 12–19 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-12-19.

Введение

Одним из перспективных способов получения композиционных материалов на основе тугоплавких соединений является метод СВС-компактирования [1–7]. Он включает подготовку смесей реагентов, экзотермический синтез и прессование горячего целевого продукта без использования внешних источников нагрева. Предварительное механическое активирование (МА) компонентов реакционных порошковых смесей в планетарных мельницах [8, 9] позволяет оказывать влияние на параметры синтеза и изменение микроструктуры получаемых СВС-композитов. Механоактивация обеспечивает повышение скорости реакции, расширение концентрационных пределов горения, понижение температуры воспламенения, изменение дисперсности, структуры и фазового состава металлокерамических композитов [10–16]. Нами обнаружено, что процесс МА возможно осуществлять не только в планетарных, но и в шаровых мельницах, используемых для смешения реагентов, при увеличении массы размольных тел и времени обработки [15, 16].

Цель настоящей работы — исследование влияния режимов МА металлических компонентов реакционных смесей на основе системы Ti–C–

Cr–Ni в шаровой мельнице на закономерности горения, структуру и свойства композиционных материалов.

Методика эксперимента

Реакционные смеси готовили смешиванием металлических порошков титана (марки ПТМ), хрома (ПХ-1М) и никеля (ПНЭ-1) с сажей (П804Т) в шаровой мельнице объемом 2,0 л в течение $\tau = 20$ ч при соотношении масс шихты и шаров $M_{\text{шх}}/M_{\text{шр}} = 1 : 4$ и угловой скорости вращения барабана 60 об/мин. Основное содержание компонентов в металлических порошках было не ниже 98 % с размером частиц менее 50 мкм. Доля углерода в саже составляла не менее 99 %, удельная поверхность находилась в пределах 12–15 м²/г, размер частиц — менее 0,2 мкм. Материал шаров — сталь ШХ15, диаметр — 20 мм.

Смеси готовили двумя способами. Первый включал предварительное активирование размольными телами в шаровой мельнице порошков Cr и Ni при $M_{\text{шх}}/M_{\text{шр}} = 1 : 15$ ($\tau = 40$ ч) и последующее смешивание их с титаном и сажей при $M_{\text{шх}}/M_{\text{шр}} = 1 : 4$ ($\tau = 20$ ч). Второй вариант состоял в совместной обработке порошков Ti + Cr и Ti + Ni

размольными телами при $M_{\text{шх}}/M_{\text{шр}} = 1 : 15$ ($\tau = 40$ ч) и дальнейшем смешении с сажой при $M_{\text{шх}}/M_{\text{шр}} = 1 : 4$ ($\tau = 20$ ч).

Исходные реакционные смеси массой 30 г предварительно прессовали в пресс-форме диаметром 30 мм под давлением 150–200 МПа до относительной плотности 0,55–0,60. Высота (толщина) прессованных образцов изменялась в интервале 18–22 мм, затем их помещали в реакционную пресс-форму.

Компактные образцы композитов получали методом СВС-прессования [1] в «песчаной пресс-форме» с внутренним диаметром 105 мм. Реакцию горения инициировали вольфрамовой спиралью, раскаленной электрическим током. Горячий продукт синтеза уплотняли с помощью гидравлического пресса усилием 160 т. Давление прессования 100 МПа прикладывали к образцу через 1–2 с после инициирования реакции горения и выдерживали в течение 3–5 с.

Температуру (t_r) и скорость (u_r) горения измеряли термопарным способом по методике, описанной в [17]. В экспериментах использовали вольфрам-рениевые термопары диаметром 200 мкм. Определение t_r и u_r осуществляли на прессованных шихтовых образцах диаметром 30 мм, помещенных в реакционную пресс-форму в среде дисперсного теплоизолятора (SiO_2). Параметры горения усредняли по результатам не менее 3 измерений. Ошибка измерений не превышала 5 %.

Микроструктурный и рентгенофазовый (РФА) анализ образцов проводили с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения «UltraPlus» (Carl Zeiss, Германия) и дифрактометра «ДРОН-3» (НПО «Буревестник», г. Санкт-Петербург) с использованием монохроматического $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Идентификацию фазового состава выполняли с помощью компьютерной программы «Crystallographica Search Match» и базы дифракционных данных «Power Diffraction File» (PDF-2, ICDD, USA, Release 2011). Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) и величину микронапряжений оценивали путем профильного анализа рентгеновских линий в специализированном программном пакете «Size&Strain» НПО «Буревестник» методом вторых моментов [18].

Микрофотографии структур шлифованных образцов исследовали с помощью методик количественной металлографии [19] по выборке не менее 150 зерен. Измерения среднего размера зерен ($R_{\text{ср}}$) проводили методом хорд. Отношение среднеквад-

ратичного отклонения длин хорд к среднему размеру зерен ($\Delta r^2/R_{\text{ср}}$) использовали для оценки однородности структуры. Металлографическую пористость (P , %) определяли точечным методом.

Экспериментальные результаты

Приготовление реакционных смесей

Предварительные эксперименты по механической активации смеси порошков титана, хрома, никеля и сажи в шаровой мельнице показали, что характеристики порошков после смешения, исследованные с помощью рентгеноструктурного анализа, практически не отличаются от аналогичных характеристик исходного порошков. Низкая эффективность воздействия размольных тел на частицы металлических порошков в ходе смешивания связана с демпфирующим действием сажи. В расчете на стехиометрическое соотношение загрузочный объем сажи в шаровой мельнице в 2,0–2,5 раза превышает объем металлических порошков. Поэтому окружающая металлические частицы сажа, как мягкая оболочка, уменьшает интенсивность действия размольных тел.

С учетом полученного результата МА порошков титана, хрома и никеля проводили отдельно на предварительной стадии.

Эффективность активации металлических порошков определяли по результатам РФА. В табл. 1 представлены структурные характеристики частиц Ti, Cr и Ni в зависимости от времени МА. Видно, что с ростом τ область когерентного рас-

Таблица 1. Структурные характеристики частиц порошков Ti, Cr и Ni

Table 1. Structural properties of Ti, Cr and Ni powder particles

Порошок	τ , ч	ОКР, Å	ρ , МПа	h , град	I , имп.
Ti	0	630	0	0,203	1270
	24	520	300	0,400	720
	48	380	350	0,440	670
	72	480	420	0,480	630
Cr	0	450	250	0,263	1580
	24	320	310	0,350	1420
	48	310	450	0,340	1440
Ni	0	650	210	0,220	2200
	24	550	320	0,410	1680
	48	420	380	0,420	1550

сеяния (ОКР) уменьшается, микронапряжения (σ) растут, полуширина (h) 100 %-ной дифракционной линии увеличивается, а ее интенсивность (I) снижается. Указанные изменения связаны с уменьшением размеров кристаллитов, повышением концентрации дефектов и микронапряжений в металлических частицах при их обработке размольными телами в шаровой мельнице. После МА металлических компонентов реакционные смеси 1–10 готовили вышеописанными двумя способами.

Параметры синтеза и микроструктуры образцов

В табл. 2 представлены параметры синтеза, микроструктуры и значения микротвердости композитов, полученных из смесей 1–10 методом СВС-компактирования. Смесь 1 обеспечивает экзотермический синтез карбида титана. Смеси 1–3 без МА использовали в качестве эталонов, с параметрами которых сравнивали характеристики активированных смесей и компактных образцов. Результаты экспериментов показали, что наличие инертных компонентов в смесях 2 и 3 (Cr или Ni), по сравнению со смесью 1, приводит к снижению скорости (u_r) и температуры (t_r) горения, при этом также уменьшается пористость (Π) и размер карбидных зерен (R_{cp}). Отметим, что для смесей 1–3 отношение среднеквадратичного отклонения к среднему размеру зерен ($\Delta r^2/R_{cp}$), характеризующее однородность микроструктуры, не меняется.

Смесь 4 была приготовлена смешиванием предварительно активированного титанового порошка с порошком сажи в стехиометрическом соотношении при отношении шихты и шаров $M_{шх}/M_{шр} = 1 : 4$. Как видно из табл. 2, МА титанового порошка приводит к повышению скорости (с 12 до 50 см/с) и температуры горения (с 2800 до 3050 °C), снижению пористости (с 16 до 8 %) и измельчению структуры образцов (R_{cp} уменьшается с 5,1 до 3,9 мкм).

В смесях 5 и 6 в качестве инертных компонентов использовали предварительно активированные хром и никель, которые смешивали с титаном и сажей при соотношении $M_{шх}/M_{шр} = 1 : 4$.

Из табл. 2 видно, что применение предварительно активированных Cr и Ni (смеси 5, 6) приводит к уменьшению скорости и температуры горения. Размер карбидных зерен в этом случае увеличивается с 4,7 и 4,5 мкм до 5,2 и 5,5 мкм. Показатель неоднородности микроструктуры ($\Delta r^2/R_{cp} = 0,47 \div 0,48$) практически не изменяется. Повышение микротвердости образцов TiC–20%Ni из смеси 6 (21000 МПа) по сравнению со смесью 3 (20000 МПа) связано со снижением пористости. Микротвердость измерялась только для компактных образцов, пористость которых не превышала 5,0 %.

Для приготовления смесей 7 и 8 использовали предварительно совместно активированные Ti и Cr и Ti и Ni с последующим смешиванием их с сажей при $M_{шх}/M_{шр} = 1 : 4$. При совместном акти-

Таблица 2. Параметры горения и характеристики композитов

Table 2. Combustion parameters and properties of composites

№ смеси	Состав смеси	u_r , см/с	t_r , °C	Π , %	R_{cp} , мкм	Δr^2 , мкм	$\Delta r^2/R_{cp}$	HV, ГПа
1	Ti + C	12,0	2700	16,0	5,1	2,4	0,47	–
2	(Ti + C) + 20 % Cr	5,0	2100	9,0	4,7	2,2	0,47	–
3	(Ti + C) + 20 % Ni	4,5	2200	0,8	4,5	2,1	0,47	20,0
4	Ti _{МА} + C	50,0	3050	8,0	3,9	1,5	0,38	–
5	(Ti + C) + 20 % Cr _(МА)	2,8	2000	12,0	5,2	2,5	0,48	–
6	(Ti + C) + 20 % Ni _(МА)	1,5	1900	0,6	5,5	2,6	0,47	21,0
7	(Ti + 20 % Cr) _{МА} + C	20,0	2200	7,0	3,1	1,2	0,39	–
8	(Ti + 20 % Ni) _{МА} + C	25,0	2300	0,5	3,3	1,2	0,36	21,5
9	СТИМ-3Б (Ti + C + 18 % Cr + 10 % Ni)	2,5	1900	0,7	4,0	2,0	0,50	22,8
10	СТИМ-3Б _{МА} (Ti + 18 % Cr + 10 % Ni) _{МА} + C	12,0	2050	0,7	1,5	0,5	0,33	21,5

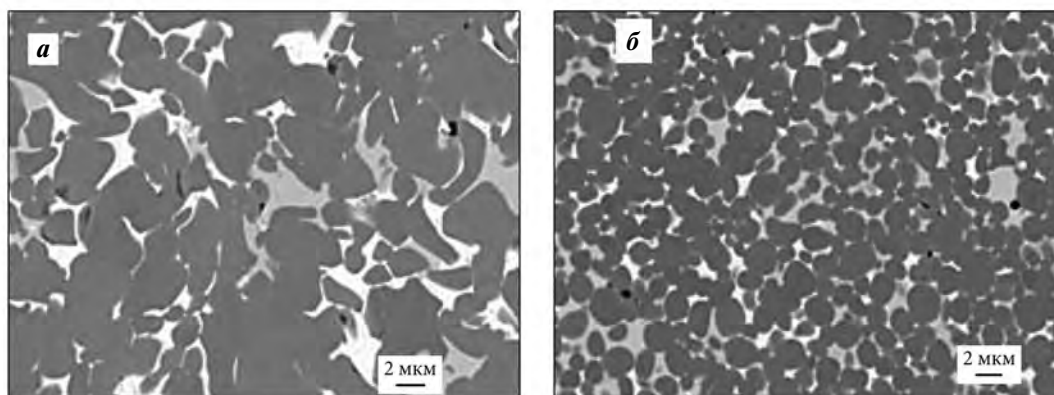


Рис. 1. Микроструктура образцов из смесей 9 (а) и 10 (б)

Fig. 1. Microstructure of samples from Mixture 9 (a) and Mixture 10 (b)

вировании металлических компонентов частицы Cr и Ni подвергаются минимальному воздействию размоленных шаров по сравнению с титаном, поскольку объем титана в несколько раз превышает объем порошков хрома и никеля. То есть при совместной обработке порошков титана и хрома (никеля) в основном происходит МА титанового порошка. По данным РФА, изменений полуширины пиков Ni и Cr не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии их активирования при совместной обработке. Однако при совместной обработке металлических компонентов обеспечивается их более однородное перемешивание и распределение частиц титана и хрома (никеля) в смеси, что подтверждается улучшением показателя однородности структуры ($\Delta r^2/R_{cp}$) — от 0,47 для компактных образцов 2 и 3 до 0,39 и 0,36 для образцов 7 и 8. Более низкие значения $\Delta r^2/R_{cp}$ соответствуют более однородной структуре и уменьшению разброса по размерам зерен относительно среднего значения (R_{cp}).

Более высокие значения скорости и температуры горения для смесей 7 и 8 связаны с МА титанового порошка, что подтверждается характеристиками горения для смеси 4 ($Ti_{MA} + C$). Совместная предварительная активация титана с инертными компонентами приводит к снижению пористости, измельчению и повышению однородности структуры. Микротвердость образца $TiC-20\%Ni$ из смеси 8 выше по сравнению с образцами, полученными из смесей 3 и 6. Увеличение микротвердости для образцов из смеси 8, вероятно, связано с уменьшением пористости.

Результаты РФА показали, что значительных различий по фазовому составу между композита-

ми, полученными из активированных и неактивированных компонентов, нет. Образцы из смесей 1 и 4 ($Ti + C$) содержали фазу $TiC_{0,98-1,0}$, из смесей 2, 5 и 7 ($Ti + C + 20\% Cr$) — фазы $TiC_{0,98-1,0}$, Cr_3C_2 , $Cr_{23}C_6$, из смесей 3, 6 и 8 ($Ti + C + 20\% Ni$) — $TiC_{0,98-1,0}$ и Ni, образцы 9, 10 (СТИМ 3Б) — $TiC_{0,98-1,0}$, Cr_3C_2 и Ni.

Полученные результаты были использованы для изменения микроструктуры композита СТИМ-3Б. Смесей 9 и 10 по составу соответствуют сплаву СТИМ-3Б ($Ti + C + 18\% Cr + 10\% Ni$) [1]. Смесь 9 приготовлена без предварительной МА компонентов. Для измельчения структуры композита проводили предварительную совместную активацию порошков титана, хрома и никеля в соответствующих пропорциях (смесь 10). Как видно из табл. 2, предварительная совместная активация металлических компонентов увеличивает скорость и температуру горения, измельчает микроструктуру, повышает однородность. Средний размер карбидных зерен снижается с 4,0 до 1,5 мкм. Критерий однородности ($\Delta r^2/R_{cp}$) уменьшается с 0,5 до 0,33. Однако микротвердость у композита 10 снижается с 22,8 ГПа (композит 9) до 21,5 ГПа. Уменьшение микротвердости металлокерамического композита 10 связано с изменением формы карбидных зерен. Микроструктура композита 9 характеризуется неправильной формой карбидных зерен (рис. 1, а) в отличие от композита 10, который содержит зерна округлой формы (рис. 1, б).

Обсуждение результатов

Было изучено влияние способов МА реакционных смесей на основе $Ti + C$ в шаровой мельнице

на структуру и свойства получаемых композитов. Первый способ включал предварительное активирование в шаровой мельнице порошков Cr и Ni отдельно от остальных порошковых компонентов с последующим перемешиванием с порошками титана и сажи. Во втором случае порошки Ti + Cr и Ti + Ni в соответствующих пропорциях (см. табл. 2) обрабатывались совместно размольными телами в шаровой мельнице и затем перемешивались с порошком сажи. При использовании первого способа происходит МА порошков Cr и Ni, что подтверждается данными РФА (см. табл. 1), а при втором — активация только титанового порошка. Воздействие размольных тел на порошки хрома и никеля, по данным РФА, минимально, поскольку объем титана в шаровой мельнице при заданных концентрациях компонентов (см. табл. 2) в несколько раз превышает объемы хрома и никеля. Предварительное активирование смесей металлических порошков Ti + Cr и Ti + Ni позволяет уменьшить средний размер карбидных зерен (R_{cp}) и повысить однородность микроструктуры композитов (о чем судят по показателю $\Delta r^2/R_{cp}$).

При первом варианте приготовления смесей, как видно из табл. 2 (смеси 5 и 6), снижаются скорость и температура горения (по сравнению со смесями 2 и 3 без МА компонентов), а также пористость и увеличивается средний размер карбидных зерен. Изменение микроструктуры, по-видимому, связано с тем, что взаимодействие углерода происходит не с чистым титаном, а с Ti—Cr- или Ti—Ni-расплавами. Отметим, что размер карбидных зерен возрастает при использовании активированных компонентов (смеси 5 и 6) по сравнению с неактивированными инертными (смеси 2 и 3). На основании теоретических представлений о горении и структурообразовании в системе Ti + C [4, 20—23] увеличение R_{cp} может быть связано с более длительным временем существования жидкой фазы на основе Ti—Cr—C и Ti—Ni—C (по сравнению с Ti—C), в которой формируются и растут зерна карбида титана. В случае с активированным никелем консолидированные образцы обладают более крупными зернами (см. табл. 2) по сравнению с образцами, для приготовления которых применяли активированный хром. Вероятно, это связано с различающимся временем роста карбидных зерен в расплавах Ti—Ni—C и Ti—Cr—C: в первом расплаве оно больше, чем во втором, из-за разницы в температурах плавления Ni (1453 °C) и Cr (1857 °C).

Второй способ предварительного совместного активирования металлических компонентов (Ti + Cr и Ti + Ni) смесей позволил синтезировать металлокерамические композиты с более мелкодисперсной структурой (7 и 8 по сравнению с 2 и 3). Основной причиной измельчения структуры сплавов являются использование МА титановых частиц и практическое отсутствие активирования частиц хрома и никеля. Сравнение характеристик смесей и компактных образцов 1 и 4 (см. табл. 2) показывает, что МА титановых частиц для состава Ti + C существенно увеличивает скорость и температуру горения, приводит к уменьшению пористости и размеров карбидных зерен.

Из представленных данных следует, что применение второго способа приготовления смесей является более эффективным для получения композитов с мелкодисперсной и однородной микроструктурой. Полученные результаты были использованы для синтеза сплава СТИМ-3Б [1] с целью измельчения его структуры. Композит СТИМ-3Б (9 в табл. 2) синтезирован из смеси компонентов без предварительной МА. Композит СТИМ-3Б (10 в табл. 2) синтезирован из совместно активированных металлических компонентов (Ti + Cr + Ni). Данный способ позволил уменьшить средний размер зерен и улучшить структурную однородность ($\Delta r^2/R_{cp}$).

Выводы

1. Изучено влияние механической активации металлических компонентов, содержащихся в реакционных смесях Ti + C + (Cr + Ni), при обработке размольными телами в шаровой мельнице на структуру и свойства получаемых композитов. Были использованы два способа механической активации металлических порошков Ti, Cr и Ni: в первом варианте порошки Cr и Ni активировали размольными телами отдельно от остальных компонентов реакционных смесей, а затем смешивали с порошками титана и сажи; во втором случае проводили совместную предварительную обработку металлических компонентов в шаровой мельнице: Ti + Cr, Ti + Ni и Ti + Cr + Ni.

2. Показано, что предварительная МА инертных компонентов (Cr и Ni) снижает температуру и скорость горения и увеличивает средний размер карбидных зерен.

3. Установлено, что после совместной предварительной обработки металлических порошков в

шаровой мельнице повышаются скорость и температура горения, уменьшается средний размер карбидных зерен и улучшается однородность структуры СВС-композитов.

4. Полученные результаты использованы для повышения однородности и измельчения структуры композита СТИМ-3Б.

Литература/References

1. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *Int. J. SHS*. 2008. Vol. 17. P. 242–265.
2. Питюлин А.Н. Силовое компактирование в СВС-процессах. В кн.: *Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика*. Черноголовка: Территория, 2001. С. 333–353.
Pityulin A.N. Power compaction in SHS processes. In: *Self-propagating high-temperature synthesis: theory and practice*. Chernogolovka: Territoriya, 2001. P. 333–353 (In Russ.).
3. Федотов А.Ф. Закономерности уплотнения и формообразования при СВС-прессовании с сыпучей оболочкой. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2008. No. 1. С. 16–23.
Fedotov A.F. Regularities of compaction and shaping during SHS pressing with a free-flowing shell. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2008. No. 1. P. 16–23 (In Russ.).
4. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: Учеб. пос. М.: МИСиС, 2011. С. 218–308.
Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yukhvid V.I. Advanced materials and technologies for self-propagating high-temperature synthesis. Moscow: MISIS, 2011. P. 218–308 (In Russ.).
5. Zhang W.N., Wang H.Y., Wang P.J., Zhang J., He L., Jiang Q.C. Effect of Cr content on the SHS reaction of Cr–Ti–C system. *J. Alloys Compd.* 2008. Vol. 465. No. 1–2. P. 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.092>.
6. Xinghong Zhang, Xiaodong He, Jiecai Han, Wei Qu, Kvanin V.L. Combustion synthesis and densification of large-scale TiC–xNi cermets. *Mater. Lett.* 2002. Vol. 56. No. 3. P. 183–187.
7. Xing-Hong Zhang, Jie-Cai Han, Xiao-Dong He, Kvanin V.L. Combustion synthesis and thermal stress analysis of TiC–Ni functionally graded materials. *J. Mater. Synth. Process.* 2000. Vol. 8. No. 1. P. 29–34.
8. Болдырев В.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. Под ред. Е.Г. Аввакумова. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2009. Вып. 19. С. 10–28.
Boldyrev V.V. Fundamental principles of mechanical activation, mechanosynthesis and mechanochemical technologies. Ed. E.G. Avvakumov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2009. Iss. 19. P. 10–28 (In Russ.).
9. Левашов Е.А., Курбаткина В.В., Колесниченко К.В. Закономерности влияния предварительного механического активирования на реакционную способность СВС-смесей на основе титана. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2000. No. 6. С. 61–67.
Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Kolesnichenko K.V. Regularities of the effect of preliminary mechanical activation on the reactivity of titanium-based SHS mixtures. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2000. No. 6. P. 61–67 (In Russ.).
10. Korchagin M.A., Grigorieva T.F., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. The effect of mechanical treatment on the rate and limits of combustion in SHS processes. *Int. J. SHS*. 2000. Vol. 9. No. 3. P. 307–320.
11. Maglia F., Anselmi-Tamburini U., Deida C., Delogu F., Cocco G., Munir Z.F. Role mechanical activation in SHS synthesis of TiC. *J. Mater. Sci.* 2004. Vol. 39. P. 5227–5230.
12. Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Погужев Ю.С. Влияние способа механического активирования реакционной смеси на скорость распространения волны СВС-реакций и микроструктуру твердого композита TiC–Ni. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2009. No. 3. С. 31–35.
Kochetov N.A., Rogachev A.S., Pogozhev Yu.S. The influence of the method of mechanical activation of the reaction mixture on the wave propagation velocity of SHS reactions and the microstructure of the TiC–Ni alloy. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2009. No. 3. P. 31–35 (In Russ.).
13. Khachatur V. Manukyan, Ya-Cheng Lin, Sergei Rouvimov, Paul J. McGinn, Alexander S. Mukasyan. Microstructure-reactivity relationship of Ti + C reactive nanomaterials. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. Art. 024302. <https://doi.org/10.1063/1.4773475>.
14. Alam M.S., Shafirovich E. Mechanically activated combustion synthesis of molybdenum silicides and borosilicides for ultrahigh-temperature structural applications. *Proc. Combust. Inst.* 2015. Vol. 35. P. 2275–2281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.019>.
15. Bogatov Yu.V., Shcherbakov V.A. Forced SHS compaction of Ti–B blends: Influence of mixing conditions and sam-

- ple mass. *Int. J. SHS*. 2020. Vol. 29. No. 2. P. 100–103. DOI: 10.3103/S106138622002003X.
16. Bogatov Yu.V., Shcherbakov V.A. TiC–20%Cr(Ni) composites by forced SHS compaction: Influence of mechanical activation mode. *Int. J. SHS*. 2021. Vol. 30. No. 1. P. 58–59. DOI: 10.3103/S1061386221010039.
17. Богатов Ю.В., Баринов В.Ю., Шербаков В.А. Влияние морфологии порошков титана на параметры СВС и структуру компактного диборида титана. *Перспект. материалы*. 2020. No. 3. С. 50–60. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-50-60.
Bogatov Yu.V., Barinov V.Yu., Shcherbakov V.A. The effect of the morphology of titanium powders on the SHS parameters and the structure of compact titanium diboride. *Perspektivnye materialy*. 2020. No. 3. P. 50–60 (In Russ.). DOI: 10.30791 / 1028-978X-2020-3-50-60.
18. Дымченко Н.П., Шишлянникова Л.М., Ярославцева Н.Н. Применение ЭВМ при расчете тонкой кристаллической структуры поликристаллов методом вторых и четвертых моментов. В сб.: *Аппаратура и методы рентгеновского анализа*. Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1974. Вып. 15. С. 37–45.
Dymchenko N.P., Shishlyannikova L.M., Yaroslavtseva N.N. The use of computers in calculating the fine crystalline structure of polycrystals by the second and fourth moments method. In: *Equipment and methods of X-ray analysis*. Leningrad: Mashinostroenie, 1974. Iss. 15. P. 37–45 (In Russ.).
19. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. М.: Металлургия, 1977.
- Chernyavskii K.S. Stereology in metal science. Moscow: Metallurgiya, 1977 (In Russ.).
20. Шкиро В.М., Боровинская И.П. Капиллярное растекание жидкого металла при горении смесей титана с углеродом. *Физика горения и взрыва*. 1976. Т. 12. No. 6. С. 945–949.
Shkiro V.M., Borovinskaya I.P. Capillary spreading of liquid metal during combustion of titanium-carbon mixtures. *Fizika gorennya i vzryva*. 1976. Vol. 12. No. 6. P. 945–949 (In Russ.).
21. Рогачев А.С., Мержанов А.Г. К теории эстафетного механизма распространения волны горения в гетерогенных средах. *Докл. РАН*. 1999. Т. 365. No. 6. С. 788–791.
Rogachev A.S., Merzhanov A.G. On the theory of the relay-race mechanism of combustion wave propagation in heterogeneous media. *Doklady RAN*. 1999. Vol. 365. No. 6. P. 788–791 (In Russ.).
22. Сеплярский Б.С., Вадченко С.Г. Роль конвективного теплопереноса в процессах «безгазового» горения (на примере горения системы Ti + C). *Докл. РАН*. 2004. Т. 398. No. 1. С. 72–76.
Seplyarsky B.S., Vadchenko S.G. The role of convective heat transfer in the processes in gasless combustion by the example of combustion of the Ti–C system. *Doklady Physical Chemistry*. 2004. Vol. 398. Pt. 1. P. 203–207. <https://doi.org/10.1023/B:DOPC.0000041487.87644.26>.
23. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion for material synthesis. CRC Press, 2012.