

ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СВС-МЕТАЛЛУРГИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В.И. Юхвид*, Д.Е. Андреев, В.Н. Санин, Д.М. Икорников

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН,
ул. Академика Осипьяна, 8, Черноголовка, Россия

АННОТАЦИЯ

Проведен обзор результатов, полученных авторами по синтезу литых жаропрочных сплавов методами СВС-металлургии. Основное внимание уделено синтезу жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов никеля и титана, кобальта и силицидов ниобия. Определены параметры, позволяющие управлять процессами горения исходных смесей термитного типа, гравитационной сепарацией в расплаве продуктов горения, формированием состава и структуры литых жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: центробежная СВС-металлургия, жаропрочные сплавы, горение, фазоразделение, формирование структуры, химического и фазового состава.

1. Введение

Жаропрочные сплавы (ЖС) используют для изготовления газотурбинных двигателей и газотурбинных установок, поэтому они должны обладать высокой прочностью и жаростойкостью при высоких температурах [1-6]. В настоящее время для изготовления газотурбинных двигателей и установок используют жаропрочные стали [6,7] и титановые сплавы [1, 7] с рабочей температурой 550–700 °С, а также жаропрочные никелевые сплавы с рабочей температурой 1100–1150 °С [1, 3-10]. ЖС на основе Со используют для защиты контактирующих поверхностей рабочих лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) от износа при высокой температуре и нагрузке [3, 13]. Был разработан литейный износостойкий сплав на основе кобальта с карбидом ниобия ХТН-61 [13-16]. Внедрение сплава ХТН-61, обладающего целым рядом преимуществ по сравнению с ранее разработанными сплавами, увеличило ресурс работы ГТД с 4000 до 9000 часов при температурах до 1100 °С.

Современный этап развития жаропрочных сплавов направлен на создание новых материалов, отличающихся существенно более высокой рабочей температурой. Это достигается заметным усложнением легирования и,

что весьма важно, введением в составы перспективных материалов таких элементов, как рений, рутений, платина и других РЗМ [17]. Значительные возможности для повышения параметров перспективных двигателей дают новые материалы на основе высокотемпературных интерметаллидов TiAl (до 900–1000 °С), Ni₃Al и NiAl (до 1250–1500 °С) [1, 6, 16, 17].

В настоящее время возросло количество публикаций по созданию жаропрочных материалов на основе Nb-Si, Mo-Si, Nb-Al др., с рабочей температурой до 1600–1900 °С [3, 18, 19, 20].

Для получения ЖС в промышленных масштабах используют вакуумно-индукционную плавку (ВИП) и вакуумно-дуговой переплав (ВДП) [21-25]. ВИП является базовой и хорошо подходит для получения металлических материалов на основе железа, никеля, кобальта и других. Несмотря на многочисленные преимущества, ВИ-плавка имеет и ряд недостатков, среди которых можно выделить следующие: современные печи ВИП производятся за рубежом, сплавы имеют высокую себестоимость за счет использования дорогих высокочистых шихтовых компонентов, трудность получения литых металлических материалов, склонных к образованию ликваций по химическому составу в объеме выплавленного слитка, а также содержащих в своем составе высокоактивные

*Ответственный автор
E-mail: yukh@ism.ac.ru (В. Юхвид)

легирующие компоненты (Ti, Zr, Mg, Hf, В др.) [21, 23-26]. ВДП является одним из основных при получении слитков не только из никелевых жаропрочных и титановых сплавов, но и таких тугоплавких металлов, как Mo, W, Nb, Ta, Zr и др. ВДП хорошо очищает расплав от газов и неметаллических включений. Повышение свойств металла достигается благодаря высокотемпературной вакуумной обработке и направленной снизу-вверх последовательной послойной кристаллизации слитка без образования крупных ликвационных объемов и при сравнительно малом количестве пор и рыхлостей [1, 26-28].

Целью исследования в работах, включенных в данный обзор является определение возможности центробежной СВС-металлургии для получения литых ЖС на основе интерметаллидов никеля и титана, силицида ниобия и разработка технологических подходов для их производства. Формирование технологического подхода включает следующие этапы: разработку многокомпонентных высокоэкзотермических составов, способных к горению, целевыми продуктами которых являются литые композиционные материалы; проведение исследований, направленных на управление процессом СВС-металлургии, составом и структурой литых композиционных материалов; разработку опытного оборудования, определение оптимальных условий синтеза, наработку опытных партий керамики для исследований в промышленности.

Химическую схему СВС-металлургии ЖС можно представить в виде:



где, OM – оксиды металлов (NiO, TiO₂, Nb₂O₅, CoO, MoO₃ и др.); B – восстановители (Al, Ca, Mg и др.); NM – неметаллы (C, B, Si и др.); ЖС – жаропрочные сплавы; OB – окислы восстановителей (Al₂O₃, CaO, MgO и др.).

Для получения целевого продукта (ЖС) методом СВС-металлургии в литом виде необходимо выполнение условий:

1. Смеси способны гореть;
2. Целевым продуктом горения является ЖС с заданным составом;
3. Температура горения превышает температуру плавления целевого (ЖС) и шлакового (OB) продуктов;
4. Удельный вес целевого продукта превышает удельный вес шлакового продукта.

При выполнении условий (1) – (4) реализу-

ется процесс СВС-металлургии, включающий следующие основные стадии.

- воспламенение и горение исходной смеси;
- гравитационная сепарация расплавов целевого и шлакового продуктов;
- охлаждение и кристаллизация расплавов.

После воспламенения формируется фронт горения, который распространяется по смеси. Во фронте горения протекает химическое превращение исходной смеси в конечные продукты. Целевым продуктом химического превращения является ЖС, а шлаковым продуктом – раствор оксидов металлов-восстановителей.

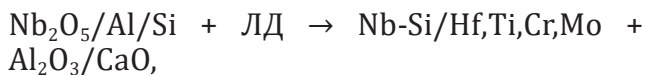
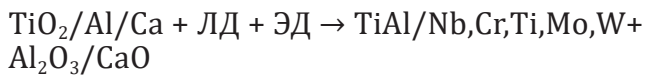
Высокая температура горения термитных смесей (до 3500 К) приводит к плавлению исходных реагентов и продуктов горения. Под действием гравитации происходит сепарация расплавов металлической и оксидной фаз продуктов горения. На завершающей стадии происходит формирование фазового состава и структуры ЖС и шлакового слоя.

2. Экспериментальная часть

Для синтеза композиционных материалов методами СВС-металлургии в качестве исходного сырья используют способные к горению смеси оксидов металлов (NiO, TiO₂, Nb₂O₅ и др.), неметаллов (C, B, Si и др.) и восстановителей (Al, Ca, Mg и др.).

Наиболее часто в качестве восстановителей используют алюминий, кальций и магний. Высокая температура горения приводит к интенсивному газообразованию и разбросу расплава при атмосферном давлении. Повышенное давление и центробежное воздействие позволяют подавить разброс, поэтому СВС-металлургию осуществляют в реакторах под давлением газа или в центробежных установках. Перед началом горения смеси помещают в тугоплавкие формы, графитовые или кварцевые, и уплотняют. Обычно горение смеси инициируют электрической спиралью, которая разогревает поверхностный слой смеси до температуры воспламенения. После завершения синтеза продукты синтеза извлекают из формы и анализируют. Для исследования микроструктуры, химического и фазового состава структурных составляющих композиционных материалов используют автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55 и рентгеновскую установку TermoFisher Scientist ARL X'TRA.

В настоящее время одним из перспективных направлений является создание жаропрочных сплавов (ЖС) на основе алюминидов никеля и титана, а также – силицидов ниобия [29, 30, 31-35]. Для их синтеза методами СВС-металлургии используют следующие химические схемы:



где ЛД – легирующие добавки ($\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}$, CoO/Al , $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Al}$ и др.), ЭД – энергетические добавки (CaO_2/Al и др.).

В общем случае исходные смеси включающие базовые составы, легирующие и энергетические добавки. Как правило для получения ЖМ используют центробежный вариант СВС-металлургии, в котором процесс осуществляют под воздействием перегрузки до 300 г.

2.1. СВС-металлургия ЖМ на основе NiAl [36-38]

Для синтеза ЖМ на основе NiAl с легирующими добавками (Cr и Co) используют смесь NiO, Cr_2O_3 , CoO с Al. Температура горения таких смесей составляет более 3000 К, удельные веса расплавов ЖМ и шлаковой фазы заметно отличаются, что позволяет осуществить их гравитационную сепарацию. При перегрузке более 50 г выход ЖМ в слиток достигает расчетного значения, при перегрузке более 200 г формируется беспористый слиток с однородной микроструктурой, рис. 1. Интегральный химический состав слитка близок к расчетному, табл. 1.

Из анализа полученных результатов можно предположить, что химическое превращение исходной смеси в волне горения протекает в режиме слияния химических стадий. Химическое превращение включает, восстановление металлов из их окислов и последующее взаим-

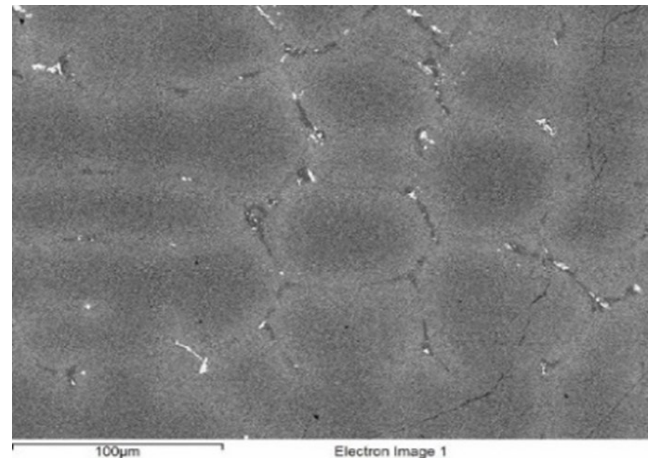


Рис. 1. Микроструктура ЖМ NiAl/Cr-Co.

На рентгенограмме выявлены пики двух фаз, NiAl и твердый раствор на основе Cr (рис. 2). Локальный микроанализ показал, что из NiAl формируется основа сплава, а раствор Co в Cr образует границы.

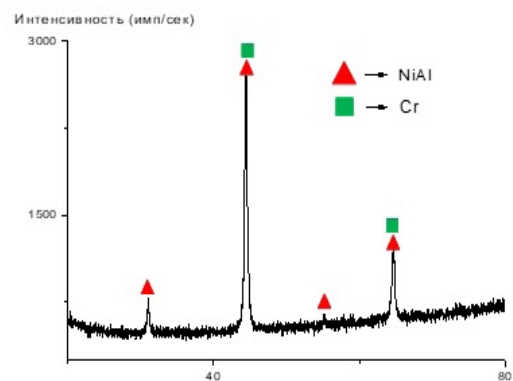


Рис. 2. Фазовый состав ЖМ NiAl/Cr-Co.

ное растворение металлических продуктов и образование крупных капель, которые распределены в оксидной (шлаковой) среде. После гравитационной сепарации расплавов ЖМ и шлака, в процессе последующего охлаждения и кристаллизации формируется двухфазная структура ЖМ.

СВС-металлургия ЖМ на основе TiAl [39-42]. В отличие от рассмотренного выше примера, смеси для получения сплава на основе TiAl с легирующими добавками Nb и Cr, использующие TiO_2 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 и Al, малоэкзотермичны и не позволяют получать литые материалы. Следует отметить также проблемы, связанные с близкими удельными весами ЖМ и шлаковой фазы, а также неполнота восстановления TiO_2 алюминием.

Таблица 1. Интегральный химический состав ЖМ NiAl/Cr-Co

Ni	Al	Cr	Co
55,9	19,8	15,2	8,5

Для повышения полноты восстановления TiO_2 и увеличения температуры горения часть восстановителя (Al) была заменена на Ca и в исходную смесь был введен высокоэнергетический состав пероксида кальция с алюминием, продуктами горения которого являются оксиды алюминия и кальция. При введении энергетической добавки более 20% продукты горения плавятся, а в интервале от 30 до 40% при перегрузке более 250 g полнота восстановления TiO_2 и полнота гравитационной сепарации достигают расчетной величины. При большем содержании энергетической добавки полнота гравитационной сепарации снижается, вследствие интенсивного разброса при горении.

Полученные слитки имеют однородную микроструктуру, рис. 3. Интегральный химический состав слитка близок к составу промышленного сплава 4822, таблица 2.

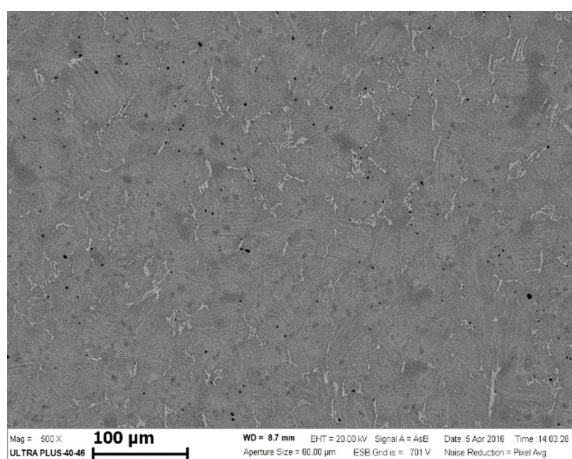


Рис. 3. Микроструктура ЖМ TiAl/Nb-Cr.

Таблица 2. Интегральный химический состав ЖМ TiAl/Nb-Cr

Ti	Al	Nb	Cr
59,2	31,7	5,4	2,8

На рентгенограмме выявлены пики двух фаз, TiAl – основная и Ti_3Al – примесная, рис. 4. Локальный микроанализ показал, что из TiAl формируется основа сплава, а границы содержат легирующие элементы (Nb и Cr), а также Ti и Al. Следует отметить, что продукты горения энергетического состава были обнаружены лишь в составе дискретных частиц шлаковой фазы. В состав целевого продукта они не входят.

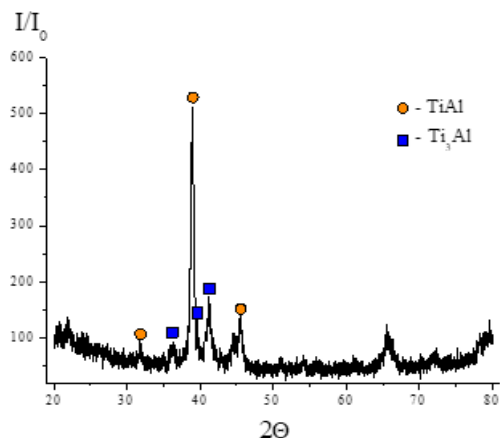


Рис. 4. Фазовый состав ЖМ TiAl/Nb-Cr.

СВС-металлургия ЖС на основе Nb-Si [43, 44]. Для синтеза ЖС на основе Nb-Si с легирующими добавками Hf, Ti и Al используют смеси оксидов ниобия с Al, Si, Ti, Hf или $HfAl_3$. Расчетная температура горения смесей превышает 3000 °C и удельные веса ЖС и шлаковой фазы заметно отличаются, что позволяет получать целевой продукт в виде слитков.

В экспериментальных исследованиях было показано, что Hf активно участвует в восстановлении Nb_2O_5 , что усложняет его введение их в сплав, а также приводит к избытку Al в ЖС. При замене Hf на менее активный $HfAl_3$ его потери снижаются, а содержание в ЖС возрастает. После кристаллизации расплава ЖС формируется композиционная структура, рис. 5. Содержание Nb, Ti и Si в ЖМ приведено в табл. 3.

Рентгенофазовый анализ выявил 3 фазы: Nb_5Si_3 , Nb_3Si и раствор Hf, Ti и Al в Nb, рис. 6.

Примеры практического использования ЖМ, полученных методами СВС-металлургии [45-49]. В 2000-2005 годы в совместных ис-

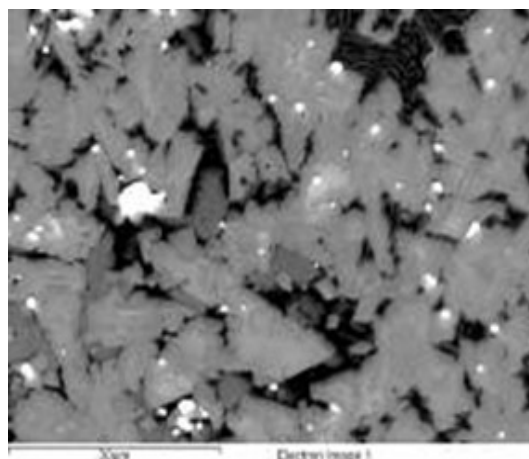
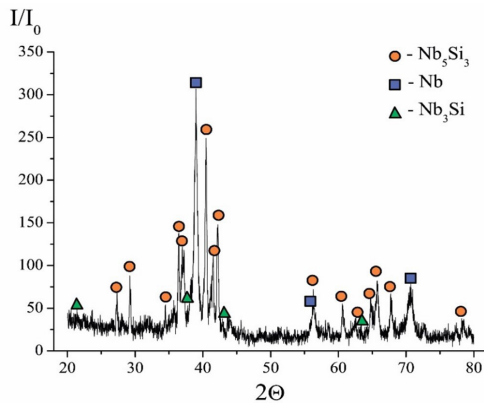


Рис. 5. Макроструктура ЖМ Nb-Si/Hf-Ti-Al.

Таблица 3. Интегральный химический состав ЖМ Nb-Si/Hf-Ti-Al

Nb	Hf	Ti	Cr	Si	Al
67,5	6,7	6,9	1,7	6,5	8,2

Рис. 6. Фазовый состав ЖМ Nb₅Si₃, Nb₃Si/Hf-Ti-Al.

следованиях ИСМАН с ММПП Салют методом СВС-металлургии были получены аналоги промышленных ЖС на кобальтовой основе (ХТН-61) и никелевой (ЖС6У). Оба ЖС были успешно опробованы для упрочнения бандажных полок (ХТН-61) и для заварки технологических отверстий (ЖС6У) лопаток ГТД.

В последнее время основные исследования были направлены на разработку новых ЖМ. Для реализации 2D и 3D-технологий в аэрокосмическом комплексе [46,47] необходимо создание производства широкого спектра гранул из новых жаропрочных материалов. Наиболее перспективными новыми материалами являются ЖМ на основе алюминидов никеля и титана, силицидов ниобия и молибдена. Преимуществами таких материалов является плотность (меньше на 20%) по сравнению с традиционно-применяемыми ЖМ и более высокая температура плавления. Лопатки из подобного ЖМ могут длительно работать при более высоких температурах (выше на 200–250 °С), чем аналогичные детали из никелевых жаропрочных сплавов [35]. В совместных исследованиях ИСМАН, МИСИС и Композит был разработан вариант технологии получения гранул, включающий: 1 – синтез полуфабрикатов в виде слитков, рис. 7 и 8, с использованием методов центробежного СВС-литья; 2 – вакуумный индукционный переплав СВС – слитков и получение массивного электрода для распыления, рис. 9; 3 – получение

гранул сферической формы методом центробежного распыления вращающегося электрода, рис. 10.



Рис. 7. Опытная партия ЖМ NbAl/Cr-Co.



Рис. 8. Опытная партия ЖМ TiAl/Cr-Co.



Рис. 9. Электрод для изготовления гранул ЖМ TiAl/Cr-Co.

Из анализа, табл. 4-7, следует, что в процессе передела слитков в гранулы состав ЖМ, практически, не изменяется.

Таблица 4. Химический состав литых ЖМ NiAl/Nb-Co

Состав ЖМ Ni-Al-Cr-Co, %						
Ni	Al	Cr	Co	O	C	N
Основа	19,2-19,5	14,6-15,3	8,5-8,7	0,12-0,13	0,03-0,04	0,005-0,004

Таблица 5. Химический состав литых ЖМ TiAl/Cr-Co

Состав ЖМ Ni-Al-Cr-Co, %						
Ti	Al	Nb	Cr	O	C	N
59,2	30,2	7,2	2,8	0,2	0,1	0,08

Таблица 6. Химический состав исходного ЖМ и электрода из него

Исходный ЖМ				Электрод			
Ti	Al	Nb	Cr	Ti	Al	Nb	Cr
65,0	27,3	4,3	3,4	61,3	30,6	4,9	3,2

Таблица 7. Химический состав гранул ЖМ TiAl/Cr-Co

Гранулы			
Ti	Al	Nb	Cr
61,8	30,1	4,8	3,3

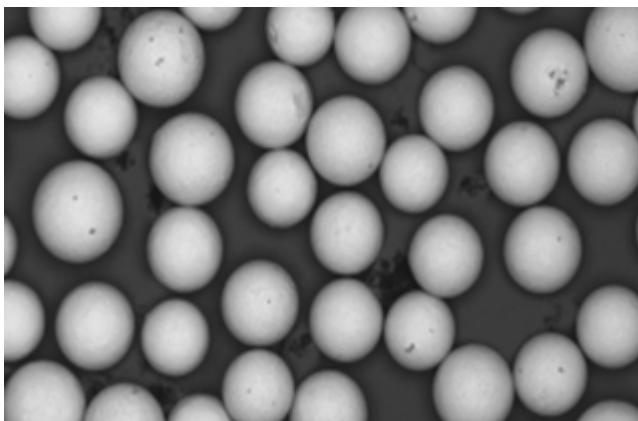


Рис. 10. Гранулы ЖМ TiAl/Cr-Co, полученные при распылении электрода.

3. Заключение

Исследования показали широкие возможности СВС-металлургии для получения различных композиционных материалов и перспективу их практической реализации.

Литература

- [1]. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин // М.: Газотурбинные технологии, 2017. – 854 с.
- [2]. Логунов А.В., Тесликов Б.Ф., Яцык С.И. [и др.] Получение отливок из жаропрочных сплавов с использованием вакуумной-индукционной плавки в холодном тигле с донным сливом // Технология легких сплавов. – 1992. – №6. – С.21-22.
- [3]. Reed R.S. The superalloys. Fundamentals and Applications. – Cambridge: University Press, 2006. – 372 p.
- [4]. Коллект. авт.; под ред. чл.-корр. РАН, проф. Каблова Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия. – М.: Наука, 2006. – 633 с.
- [5]. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С.36-52.
- [6]. Pelleg J. Basic. Compounds for Superalloys // Mechanical Properties Elsevier. – 2018. – P.95.
- [7]. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications // Cambridge, 2008. – 392 p.
- [8]. Фадеев А.В., Белов В.Д. Опыт изготовления в России крупногабаритных отливок из титановых сплавов // Литейщик России. – 2016. – №7. – С.28-31.
- [9]. Bazhenov V., Kolygin A., Belov V. Effect of iron and magnesium on alloy Al₃M structure and properties // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – Vol.59. – P.346-351.
- [10]. Kaplanskii Yu. Yu., Zaitseva A.A., Levashov E.A., Loginova P.A., Sentyurina Zh.A. NiAl based alloy produced by HIP and SLM of prealloyed spherical powders. Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperatures // Materials Science and Engineering:A. – 2018. – Vol.717. – P.48-59.
- [11]. Дмитриева Г.П., Черепова Т.С., Косорукова Т.А. [и др.] Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия // Металлофизика новейшие технологии. – 2015. – №7. – С.973-986.
- [12]. Gui W., Zhang X., Zhang H., Sun X., Qi Zh. Melting of primary carbides in a cobalt-base superalloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol.787. – P.152-157.

- [13]. Пейчев Г.И., Милосердов А.Б., Андрейченко Н.В. Исследование легкоплавких эвтектик в микроструктуре износостойкого сплава ХТН-61 // Вестник двигателестроения. – 2012. – №1. – С.211-214.
- [14]. Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Роголев А.М. Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД // Труды ВИАМ. – 2016. – №9(45). – С.53-60.
- [15]. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений // Вестник Московского университета, серия 2 Химия. – 2005. – №3. – С.155-167.
- [16]. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида NiAl // Металлы. – 1999. – №1. – С.58-65.
- [17]. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминида никеля // Двигатель. – 2010. – №4. – С.24-25.
- [18]. Drawin S. The European ULTMAT Project: Properties of New Mo- and Nb Silicide Based Materials // MRS Online Proceedings Library Archive. – 2008. – Vol.711. – P.1128
- [19]. Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb-Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // Двигатель. – 2010. – №5. – С.36.
- [20]. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb-Si композиты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – №SP2. – С.164-173.
- [21]. Syngellakis S., Connor J. Advanced Methods and Technologies in Metallurgy in Russia. – Springer, 2018. – 196 p.
- [22]. Линчевский Б.В. Вакуумная металлургия стали и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 258 с.
- [23]. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М: Металлургия. 1995. – 272 с.
- [24]. Борисенко К.Г., Попов И.С. Вакуумные технологии в современной промышленности // Сбор. науч. труд. 5-й Международной молодежной научной конференции. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – С.216-221.
- [25]. Виноградова Н.В., Паршин А.М., Петкова А.П. Влияние качества металла и применения вакуумной металлургии на структуру и свойства аустенитных твердорастворноупрочняемых сталей // Вопросы материаловедения. – 2005. – №2. – С.110-119.
- [26]. Sankar M. [et al.] Effect of vacuum arc remelting and processing parameters on structure and properties of high purity niobium // Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Vol.50. – P.120-125.
- [27]. Risacher A., Chapelle P., Jardy A., Escaffre J., Poisson H. Electric current partition during vacuum arc remelting of steel: An experimental study // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol.213. – P.291-299.
- [28]. Mitchel A. Solidification in remelting processes // Materials Science and Engineering: A. – 2005. Vol.413-414. – P.10-18.
- [29]. Карабасов Ю.С. Новые материалы. – М: Изд-во МИСИС, 2002. – 736 с.
- [30]. Под ред. Каблова Е.Н. Авиационные материалы // Научно-технический сборник. №1. – М.: ВИАМ, 2007.
- [31]. Jackson M.R., Bewley B.P., Rowe R.G., Skelly D.W. et al. High Temperature Refractory Metall Intermetallic Composites // JOM. – 1996. – Vol.48. – P.39-44.
- [32]. Subramanian P.R., Mendiratta M.G., Dimidak D.M. Development of Nb based Advanced Intermetallic Alloys for Structural Application // JOM. – 1996. – Vol.48. – P.33-38.
- [33]. Bewlay B.P., Jackson M.R., Subramanian P.R. Processing High Temperature Refractory Metall Silicide in situ Comp // JOM. – 1999. – Vol.51. – P.32-36.
- [34]. Bewlay B.P., Jackson M.R., Zhao J.C., Subramanian P.R. A Review of Very «High Temperature Nb «Silicide» based Composites // Metall. Mater. Trans. – 2003. – Vol.34. – P.2043-2052.
- [35]. Светлов И.Л., Бабищ Б.Н., Власенко С.Я., Ефимочкин И.Ю. и др. Высокотемпературные ниобиевые композиты, упрочненные силицидами ниобия // Журнал функциональных материалов. – 2007. – Т.1, №2. – С.48-53
- [36]. Санин В.Н., Икорников Д.М., Андреев Д.Е., Юхвид В.И. Центробежная СВС-металлургия эвтектических сплавов на основе алюминида никеля // ПМ и ФП. – 2013. – №3. – С.35-42.
- [37]. Санин В.Н., Икорников Д.М., Юхвид В.И., Левашов Е.А. Центробежная СВС-металлургия литых сплавов на основе алюминида никеля, высоколегированных бором // Цветные металлы. – 2014. – №11 – С.83-88.
- [38]. Yukhvid V., Alymov M., Sanin V., Andreev D. SHS Metallurgy of NiAl-Based Alloy // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol.684. – P.353-358.
- [39]. Sanin V., Yukhvid V., Sychev A., Andreev D. Combustion synthesis of cast intermetallic Ti-Al-Nb alloys in a centrifugal machine. // Kovove mater. – 2006. – Vol.44. – P.49-55.
- [40]. Andreev D.E., Sanin V.N., Yukhvid V.I. Cast alloy production on the basis of titanium aluminide

- with centrifugal SHS method // *Inorganic Materials*. – 2009. – Vol.45. – P.867-872.
- [41]. Andreev D.E., Sanin V.N., Yukhvid V.I., Kovalev D.Yu. Regular features of combustion of CaO₂/Al/Ti/Cr/B hybrid mixtures. // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2011. – Vol.47. – P.671-676.
- [42]. Yuxhvid V., Andreev D., Sanin V., Sentyurina Zh., Pogozhev Yu., Levashov E. Centrifugal SHS of cast Ti–Al–Nb–Cr Alloys. // *Int. J. SHS*. – 2015. – Vol.24. – P.176-180.
- [43]. Alymov M.I., Yuxhvid V.I., Andreev D.E., Sanin V.N. Chemical Transformations of Multicomponent Thermite-Type Mixtures in Combustion Waves. // *Doklady Physical Chemistry*. – 2015. – Vol.460. – P.6-9.
- [44]. Yuxhvid V.I., Alymov M.I., Sanin V.N., Andreev D.E., Sachkova N.V. Self-propagating high-temperature synthesis of niobium silicide-based composite materials // *Inorganic Materials*. – 2015. – Vol.51. – P.1251-1257.
- [45]. Санин В.Н., Юхвид В.И. Центробежная СВС-технология литых электродов для заварки технологических отверстий и дефектов в деталях ГТД // Труды Всероссийской конференции “Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов”. – Москва, 2002. – С.347-351.
- [46]. Pogozhev Yu., Sanin V., Ikornikov D., Andreev D., Yuxhvid V., Levashov E., Sentyurina Zh., Logacheva A., Timofeev A. NiAl-Based Electrodes by Combined Use of Centrifugal SHS and Induction Remelting. // *International Journal SHS*. – 2016. – Vol.25. – P.186-199.
- [47]. Zaitsev A.A., Sentyurina Zh.A., Pogozhev Yu.S., Levashov E.A., Sanin V.N., Yuxhvid V.I., Andreev D.E., Mikhailov M.A., Kaplanskii Yu.Yu. Fabrication of Cast Electrodes from Nanomodified Nickel Aluminide-Based High-Boron Alloy to Fabricate Spherical Powders Using the Plasma Rotating Electrode Process. // *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. – 2015. – №4. – P.15-24
- [48]. Sanin V., Anikin Yu., Yuxhvid V., and Filonov M. Structural Heredity of Alloys Produced by Centrifugal SHS: Influence of Remelting Temperature. // *Int. J. SHS*. – 2015. – Vol.24. – P.210-214.
- [49]. Санин В.В., Филонов М.Р., Юхвид В.И., Аникин Ю.А., Михайлов А.М. Получение литых шихтовых заготовок из сплава на основе алюминид никеля с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и методов электрометаллургии // Перспективные материалы. – 2016. – № 8. – С.74-83.

References

- [1]. Logunov AV (2017) High-temperature nickel alloys for gas turbine blades and discs. [Zharoprochnye nikel'evye splavy dlya lopatok i diskov gazovyh turbin]. Publishing House «Gas Turbine Technologies», Moscow, P.854. (in Russian)
- [2]. Logunov AV, Teslikov BF, Yatsyk SI [and etc.] (1992) Light Alloy Technology [Tekhnologia legkih splavov] 6:21-22. (in Russian)
- [3]. Reed RS (2006) The superalloys. Fundamentals and Applications. University Press. Cambridge, UK. P.372. ISBN 978-0-511-24546-6.
- [4]. A team of authors; edited by Corresponding Member RAS, prof. Kablova EN (2006) Cast blades of gas turbine engines. Alloys, technology, coatings [Litye lopatki gazoturbinnyyh dvigatelej. Splavy, tekhnologiya, pokrytiya] Science, Moscow. (in Russian)
- [5]. Kablov EN, Petrushin NV, Svetlov IL [and etc] (2012). New generation nickel casting heat-resistant alloys. Aviation materials and technologies [Tekhnologii legkih splavov] 5:36-52. (in Russian)
- [6]. Pelleg J (2018) Basic. Compounds for Superalloys: Mechanical Properties. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. P.95. eBook ISBN 9780128162323.
- [7]. Reed RC (2008). The Superalloys: Fundamentals and Applications. University Press. Cambridge, UK. ISBN 9780521070119.
- [8]. Fadeev AV, Belov VD (2016) Foundry of Russia [Liteyshchik Rossii] 7:28-31. (in Russian)
- [9]. Bazhenov V, Koltygin A, Belov V (2017) Metal Science and Heat Treatment 59:346-351 <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0154-5>
- [10]. Kaplanskii YuYu, Zaitseva AA, Levashov EA, Loginova PA, Sentyurina ZhA (2018) Materials Science and Engineering:A. 717:48-59. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.057>
- [11]. Dmitrieva GP, Cherepova TS, Kosorukova TO, Nichiporenko VI (2015) Metal physics latest technologies [Metallofizika novejschie tekhnologii] 7:973-986. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.07.0973> (in Russian)
- [12]. Gui W, Zhang X, Zhang H, Sun X, Qi Zh (2019) Journal of Alloys and Compounds 787:152-157. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.041>
- [13]. Peichev GI, Miloserdov AB, Andreichenko NV (2012) Engine Herald [Vestnik dvigatelestroeniya] 1: 211-214. (in Russian)
- [14]. Farafonov DP, Bazyleva OA, Rogalev AM (2016) VIAM Proceedings [Trudy VIAM.]. 9(45): 53-60. (in Russian)
- [15]. Kablov EN (2005) Moscow university chemistry bulletin 3:155- 167. eISSN: 1935-0260.
- [16]. Kablov EH, Buntushkin VP, Povarova KB [and etc.] (1999) Metals 1:58-65. (in Russian)

- [17]. Kablov EN, Ospennikova OG, Bazyleva OA (2010) Engine [Dvigatel] 4:24-25. (in Russian)
- [18]. Drawin S (2009) MRS Online Proceedings Library Archive 1128:214. <https://doi.org/10.1557/PROC-1128-U07-11>
- [19]. Svetlov IL (2010) Engine [Dvigatel] 5:36. (in Russian)
- [20]. Kablov EN, Svetlov IL, Efimochkin IYu (2011) Bulletin MGTU im. N.E. Bauman. Series: Mechanical Engineering [Vestnik MGTU im. N.E. Baumana] SP2:164-173. (in Russian)
- [21]. Syngellakis S, Connor J (2018) Advanced Methods and Technologies in Metallurgy in Russia. Springer, Berlin, Germany 196:206 ISBN 978-3-319-66354-8
- [22]. Linchevsky B (1970). Vacuum metallurgy of steel and alloys [Vakuumnaya metallurgiya stali i splavov] Metallurgy, Moscow, Russia. (in Russian)
- [23]. Efimov V, Eldarkhanov A (1995) Physical methods of influencing the solidification processes of alloys [Fizicheskie metody vozdeystviya na processy zatverdevaniya splavov] Metallurgy, Moscow ISBN 5-229-01188-2 (in Russian)
- [24]. Borisenko KG, Popov IS (2018) Vacuum technologies in modern industry [Vakuumnye tekhnologii v sovremennoj promyshlennosti] Collect. of scien. papers of the 5th International Youth Scientific Conference. ZAO «University Book», Kursk, Russia. P.216-221. (in Russian)
- [25]. Vinogradova NV, Parshin AM, Petkova AP (2005) Problems of Materials Science [Voprosy materialovedeniya] 2: 110-119. (in Russian)
- [26]. Sankar M et al. (2015) Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials 50:120-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.12.001>
- [27]. Risacher A, Chapelle P, Jardy A, Escaffre J, Poisson H (2013) J. of Materials Processing Technology 213:291-299 DOI:10.1016/j.jmatprotec.2012.09.003
- [28]. Mitchel A (2005) Materials Science and Engineering: A. 413-414:10-18 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.157>
- [29]. Karabasov Yu (2002) New materials [Novye materialy] Publishing house MISIS, Moscow, Russian Federation. ISBN 978-5-4468-4122-6 (in Russian)
- [30]. Ed. Kablova E (2007) Aviation materials. Scientific and technical collection. № 1. [Aviacionnye materialy. Nauchno-tekhnicheskij sbornik] VIAM, Moscow, Russian Federation. (in Russian)
- [31]. Jackson MR, Bewlay BP, Rowe RG, Skelly DW et al. (1996) JOM 48:39-44. <https://doi.org/10.1007/BF03221361>
- [32]. Subramanian P, Mendiratta M, Dimidak D (1996) JOM 48:33-38. <https://doi.org/10.1007/BF03221361>
- [33]. Bewlay B, Jackson M, Subramanian P (1999) JOM 51:32-36. <https://doi.org/10.1007/s11837-999-0077-8>
- [34]. Bewlay B, Jackson M, Zhao J., Subramanian P (2003) Metall. Mater. Trans. 34:2043-2052. doi 10.1007/s11661-003-0269-8
- [35]. Svetlov IL, Abuzin YuA, Babich BN et al. (2007) Journal «Functional Materials» 1:48-53 (in Russian)
- [36]. Sanin VN, Ikornikov DM, Andreev DE, Yukhvid VI (2013) Powder metallurgy and functional coatings [Izvestiya vuzov Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya] 3:35-42. (in Russian) <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2013-3-35-42>
- [37]. Sanin VN, Ikornikov DM, Yukhvid VI, Levashov EA (2014) Non-ferrous metals [Cvetnye metally] 11:83-88 (in Russian)
- [38]. Yukhvid V, Alymov M, Sanin V, Andreev D (2016) Key Engineering Materials 684:353-358. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.353
- [39]. Sanin V, Yukhvid V, Sychev A, Andreev D (2006) Kovove mater. 44:49-55. ISSN 0023-432X
- [40]. Andreev DE, Sanin VN, Yukhvid VI (2009) Inorganic Materials 45:867-872. DOI 10.1134/S0020168509080081
- [41]. Andreev DE, Sanin VN, Yukhvid VI, Kovalev DYU (2011) Combustion, Explosion, and Shock Waves 47:671-676. DOI 10.1134/S0010508211060074
- [42]. Yukhvid V, Andreev D, Sanin V, Sentyurina Zh, Pogozhev Yu, Levashov E (2015) Int. J. SHS 24:176-180. DOI: 10.3103/S1061386215040159
- [43]. Alymov MI, Yukhvid VI, Andreev DE, Sanin VN (2015) Doklady Physical Chemistry 460:6-9. DOI 10.1134/S0012501615010029
- [44]. Yukhvid VI, Alymov MI, Sanin VN et al. (2015) Inorganic Materials 51:1251-1257. DOI 10.1134/S0020168515110151
- [45]. Sanin VN, Yukhvid VI (2002) Centrifugal SHS-technology of cast electrodes for welding technological holes and defects in GTE parts [Centrobezhnaya SVS-tekhnologiya lityh elektrodov dlya zavarki tekhnologicheskikh otverstij i defektov v detalyah GTD]. In the Proceedings of the All-Russian Conference "Combustion and Explosion Processes in Physicochemistry and Technology of Inorganic Materials", Moscow, Russia. P.347-351. (in Russian)
- [46]. Pogozhev YuS, Sanin VN, Ikornikov DM et al. (2016) Int. J. SHS. 25:186-199. DOI: 10.3103/S1061386216030092
- [47]. Zaitsev AA, Sentyurina ZhA, Pogozhev YuS, Levashov EA, Sanin VN, Yukhvid VI, Andreev DE, Mikhailov MA, Kaplanskii YuYu (2015) Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy [Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya] 4:15-24. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-4-15-24

- [48]. Sanin V, Anikin Yu, Yuxhvid V, and Filonov M (2015) Int. J. SHS. 24:210-214. DOI: 10.3103/S106138621504010X
- [49]. Sanin VV, Filonov MR, Yuxhvid VI et al. (2016) Journal of Advanced Materials [Perspektivnye materialy]. 8:74-83 (in Russian)

Centrifugal SHS-metallurgy of heat resistant alloys

V.I. Yuxhvid, D.E. Andreev, V.N. Sanin, D.M. Ikornikov

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN), Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Russia

Abstract

A review of the results obtained by the authors on the synthesis of cast heat-resistant alloys by SHS metallurgy methods is carried out. The main attention is paid to the synthesis of heat-resistant alloys based on intermetallic compounds of nickel and titanium, cobalt and niobium silicides. The parameters are determined that allow controlling the combustion processes of the initial mixtures of the thermite type, the gravitational separation of the combustion products in the melt, the formation of the composition and structure of cast heat-resistant alloys. *Keywords:* centrifugal SHS metallurgy, heat-resistant alloys, combustion, phase separation, formation of structure, chemical and phase composition.

Ыстыққа төзімді қорытпалардың орталықтан тепкіш ӨЖС – металлургиясы

В.И. Юхвид, Д.Е. Андреев, В.Н. Санин, Д.М. Икорников

РФА, А.Г. Мержанов атындағы Құрылымдық макрокинетика және материалтану мәселелері институты, көш. Академик Осипян, 8, Черноголовка, Ресей

Аңдатпа

ӨЖС металлургия әдістерімен құйылған ыстыққа төзімді қорытпалардың синтезі бойынша авторлардың алған нәтижелері бойынша шолу жүргізілді. Негізгі назар никель мен титан, кобальт пен ниобий силицидтерінің металлаларлық қосылыстары негізінде ыстыққа төзімді қорытпалардың синтезіне аударылды. Термит түріндегі бастапқы қоспалардың жану процестерін, балқымадағы жану өнімдерінің гравитациялық бөлінуін, құйылған ыстыққа төзімді қорытпалардың құрамы мен құрылымын қалыптастыруға мүмкіндік беретін параметрлер анықталады.

Кілт сөздер: орталықтан тепкіш ӨЖС – металлургиясы, жоғары температуралы қорытпалар, жану, фазалық бөліну, құрылымның түзілуі, химиялық және фазалық құрамы.