

УДК 669.017

Н.Н. Трофименко¹, И.Ю. Ефимочкин¹, И.В. Осин¹, Р.М. Дворецков¹

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА VNbMoTaW
ПУТЕМ СМЕШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОРОШКОВ
С ДАЛЬНЕЙШИМ КОМПАКТИРОВАНИЕМ
МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20

Рассмотрена возможность синтеза высокоэнтропийного сплава VNbMoTaW методом гибридного искрового плазменного спекания из эквиатомной смеси элементарных порошков, полученной сухим смешиванием. Методами сканирующей электронной микроскопии проведено исследование микроструктуры, микрорентгеноспектральным анализом проведена оценка элементного состава, микродюрометрическим анализом исследована микротвердость образовавшихся фаз. Установлено, что, несмотря на влияние температуры спекания на протекание диффузионных процессов, проявляется значительная неравномерность структурообразования.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, искровое плазменное спекание, порошковая металлургия, диффузия, спекание с жидкой фазой.

N.N. Trofimenko¹, I.Yu. Efimochkin¹, I.V. Osin¹, R.M. Dvoretsov¹

**THE RESEARCH OF THE POSSIBILITY
OF HIGH ENTROPY ALLOY VNbMoTaW PRODUCTION
BY MIXING ELEMENTARY POWDERS
WITH FURTHER HYBRID SPARK PLASMA SINTERING**

The paper considers the possibility of synthesis of a high-entropy alloy VNbMoTaW by the method of hybrid spark plasma sintering from an equiatomic mixture of elemental powders obtained by dry mixing. The microstructure was examined by scanning electron microscopy, the X-ray microscopic analysis was used to evaluate the elemental composition, and the microhardness of the resulting phases was studied by microdurometric hardness testing. It has been determined that in spite of the influence of sintering temperature on the diffusion processes, a significant unevenness of structure formation is manifested.

Keywords: high entropy alloy, spark plasma sintering, powder metallurgy, diffusion, sintering with liquid phases.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Исследования высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) привлекают внимание материаловедов по всему миру, поэтому в настоящее время их вполне можно отнести к перспективному исследовательскому направлению в области технологии металлических сплавов. Согласно проведенному научному поиску в реферативной базе данных Scopus за период 1996–2018 гг., повышенный интерес исследовательских коллективов к данному научному направлению подтверждается стремительным ростом количества публикаций за последние 5–6 лет (рис. 1, а) [1].

Резкое падение кривой по количеству публикаций на графике, возможно, объясняется тем, что в базе данных Scopus в настоящее время учте-

ны не все научные работы за 2018 г. Распределение всех рефератов статей по типу документа можно представить следующим образом: статьи – 86,1%; тезисы докладов конференций – 10,1%; обзоры – 2,3%; книги – 0,6% и другое – 0,9%. Необходимо отметить повышенный интерес к данному типу материалов в Китае и США (рис. 1, б). Работы в области высокоэнтропийных сплавов ведутся и в других странах. Обращает на себя внимание малое количество публикаций в России.

Особенности формирования структуры сплава путем повышения конфигурационной энтропии (искажение кристаллической решетки, образование однофазных твердых растворов вследствие снижения энергии Гиббса) позволяют получать

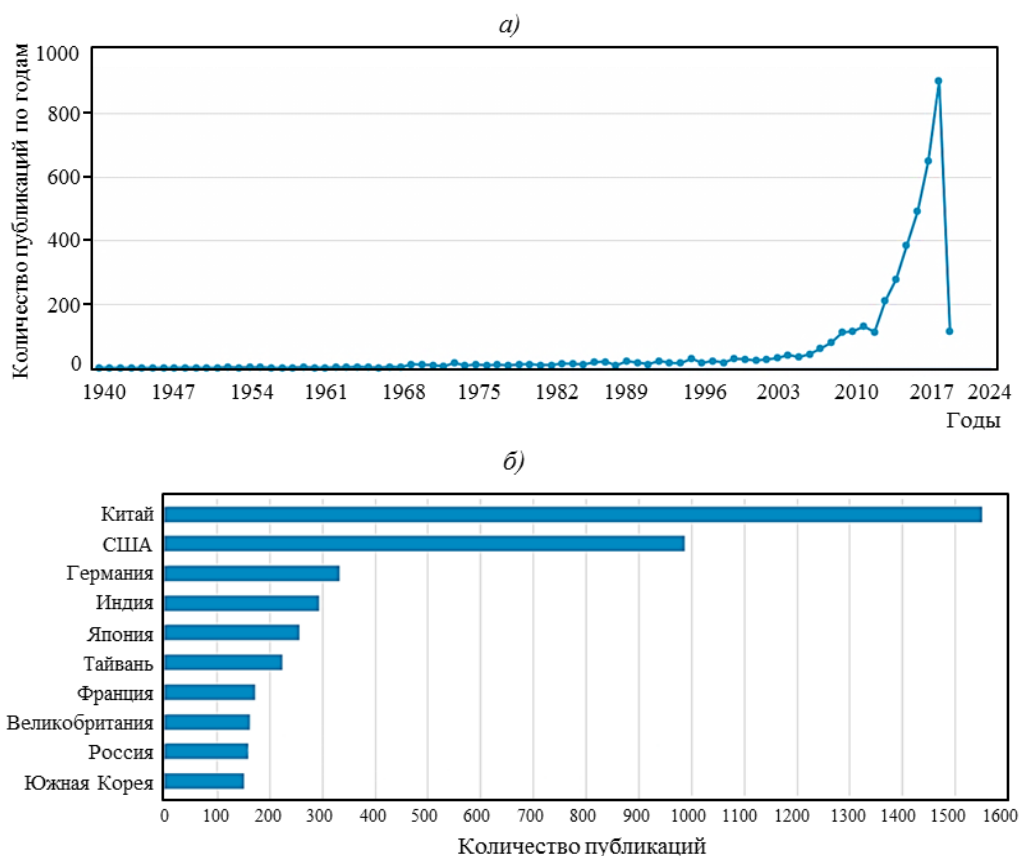


Рис. 1. Распределение количества публикаций по высокоэнтروпийным сплавам по годам (а) и по странам (б), согласно реферативной базе данных Scopus

уникальные свойства материалов, такие как высокие механические характеристики при температурах $>1200^{\circ}\text{C}$, повышенная твердость и износостойкость [2]. Например, новые семейства сплавов на основе таких элементов, как Al, Be, Li, Mg, Sc, Si, Sn, Ti, Zn, могут использоваться в транспортной отрасли и в энергетических секторах экономики, где востребованы легкие высокопрочные материалы [3]. Многокомпонентные эквиатомные системы на основе элементов с высокой температурой плавления, таких как V, Nb, Mo, Ta, W, могут использоваться в авиационной и космической отраслях в качестве материалов, способных работать в условиях повышенных температур и агрессивных газовых сред [2].

В настоящее время одними из основных материалов, применяемых в упомянутых отраслях, являются жаропрочные никелевые сплавы, оптимизированные за счет легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, хром, кобальт, гафний, титан, ниобий [4–8]. В качестве перспективных специалистами рассматриваются материалы двойных систем Nb–Si и Nb–Mo с дисперсионным упрочнением интерметаллидами [9, 10].

Существуют также исследования, в которых изучались свойства жаропрочных ВЭС в качестве покрытий материалов, работающих в условиях

повышенного ионизирующего излучения. Результаты, полученные в ходе этих работ, позволяют сделать вывод, что данный тип ВЭС может в дальнейшем использоваться и в атомной промышленности [11].

В качестве компонентов матрицы в сплавах с высокой энтропией смешения используют взятые в эквиатомных или эквимольных концентрациях элементы с содержанием каждого – от 5 до 35% (атомн.) Согласно исследованию, представленному в работе [12], такой подход к составу сплавов позволяет снижать возможность образования интерметаллидов и получать однофазные твердые растворы, т. е. сложность композиции в данном случае не приводит к сложности структуры. Однако в более поздних работах показано, что в определенных композициях в результате могут образовываться дополнительные фазы (например, фазы Лавеса) [13], также оказывающие влияние на свойства. В настоящее время исследовано множество композиций ВЭС на основе переходных элементов с образованием большого разнообразия микроструктур: твердых растворов замещения с объемно- и гранцентрированными кубическими решетками, дендритных и междендритных структур, морфологических переходов – от дендритов к равноосным зернам и т. д. [14]. Большое

количество проведенных исследований свидетельствует о необходимости углубленных исследований в этой области знаний. Полученные оптимистические результаты относительно свойств изученных систем ВЭС позволяют предположить, что в дальнейшем может существенно возрасти возможность применения данного типа металлических материалов в тех отраслях, где использование имеющихся сплавов ограничено вследствие проявления ими низких механических свойств в условиях высоких рабочих температур [15–17]. Так, применение промышленно используемых жаропрочных никелевых сплавов не способно обеспечить необходимое развитие высокотемпературной техники при увеличении рабочих температур [9].

В последнее десятилетие проведено несколько исследований по изучению жаропрочных ВЭС с матрицей из тугоплавких элементов, показавших высокую термическую стабильность и износостойкость в сочетании с удовлетворительной стойкостью к окислению [17–20]. Поскольку все уникальные свойства ВЭС в основном проявляются благодаря образованию многокомпонентных твердых растворов, исследователи предприняли попытки разработать правила, регулирующие формирование тех или иных фаз в эквивалентных сплавах. Предложены пути статистического анализа разности атомных величин, значений энтальпии смешения и энтропии смешения среди элементов, входящих в состав твердых растворов [21].

Для композиции жаропрочного ВЭС на основе тугоплавких элементов V, Nb, Mo, Ta, W исследователями получены положительные результаты по созданию эквивалентного сплава состава $V_{20}Nb_{20}Mo_{20}Ta_{20}W_{20}$ с образованием однофазного твердого раствора [22, 23]. При этом следует отметить, что в работах [14, 24] авторы наблюдают значительную фазовую сегрегацию. Это явление связано с неравновесными условиями затвердевания, которые приводят к неравномерному распределению элементов, вовлеченных в растущие твердые фазы. Подтверждено также, что сегрегация связана с различиями в температурах сплавления используемых элементов. Такой материал получали с помощью неоднократных переплавов в вакуумной среде.

В работе [14] авторы предполагают, что в изучаемом сплаве системы Mo–W–Hf–Zr–Ti проявляется тенденция к разделению на две фазы – Hf–Zr–Ti и Mo–W–Hf–Zr–Ti, которые могут характеризоваться как наиболее стабильные, согласно рассматриваемым в этой работе моделям. Исследователи, соглашаясь с авторами работ [25, 26], приходят к выводу, что полипараметрические модели формирования простых твердых растворов не всегда отражают полученные в результате экспериментов фактические данные, и поэтому догматическое воззрение на формирование однофазной структуры должно быть по крайней мере пересмотрено.

В качестве основных методов получения данного ВЭС предлагаются литье в вакууме (многоразовые переплавы для достижения однородности структуры) [24] или порошковая металлургия (механохимический синтез) [23]. Возможность получения материала путем смешивания порошков компонентов с последующим высокотемпературным гибридным искровым плазменным спеканием в мировой научной литературе практически не освещена. Привлекательность данного подхода состоит в том, что он исключает такую трудоемкую операцию, как механическое легирование, сокращая тем самым длительность технологического цикла получения материала. Данный способ позволяет получать из порошковой смеси компакты высокой плотности с заданной микроструктурой. Изменение параметров процесса спекания под давлением с воздействием искровой плазмы позволяет влиять как на рост зерна, так и на протекание диффузии [27], поэтому возможен подбор таких параметров, которые позволили бы получить композицию жаропрочного ВЭС на основе тугоплавких элементов путем смешивания элементарных порошков с последующим искровым плазменным спеканием.

При принятии данной гипотезы первоочередной задачей становится исследование диффузионных процессов в эквивалентных многокомпонентных сплавах, состоящих из элементов с различающейся температурой плавления.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9, 28].

Материалы и методы

В данной работе методом порошковой металлургии синтезированы образцы следующего фракционного состава:

Элемент	V	Nb	Mo	Ta	W
Размер гранул, мкм	20–63	20–70	40–80	4–20	2–7

Компоненты матрицы (см. таблицу) выбирали согласно концепции, предложенной в работе [12]: количество каждого вида элементарных порошков – по 20% (атомн.). На валковой мельнице осуществляли сухое перемешивание трех одинаковых смесей с массой каждой шихты по 200 мг. Получение конечных образцов 1–3 осуществляли методом искрового плазменного спекания (Spark Plasma Sintering – SPS) на установке гибридного искрового спекания (модель H-HP D 25-SD, FAST/SPS+индукционный нагрев) при температурах 1700, 1750 и 2000°C соответственно. Данный подход вследствие особенностей протекания процесса спекания (возникновение эффекта плазмы) позволяет снизить температуру спекания порошков

Температура плавления, атомный радиус, электроотрицательность элементов, составляющих матрицу исследуемого ВЭС с кристаллической решеткой типа ОЦК

Элемент	Температура плавления, °С	Атомный радиус, нм	Электроотрицательность по Полингу
V	1920	0,187	1,45
Nb	2468	0,216	1,23
Mo	2620	0,139	1,30
Ta	3017	0,209	1,33
W	3422	0,202	1,40

и ускорить диффузию компонентов. Продолжительность спекания составила 60 мин. Поскольку температура плавления ванадия составляет 1920°С, то в образце 3 процесс спекания происходил в присутствии жидкой фазы ванадия, что к моменту окончания компактирования привело к образованию трещины вдоль тела графитовой матрицы и ее фактическому разрушению.

Полученные заготовки из ВЭС сплава представляют собой цилиндры Ø1,5 мм и высотой 10 мм.

Микроструктуру образцов исследовали на шлифах методом сканирующей электронной микроскопии на установке Hitachi SU 8010, оснащенной приставкой микроанализа Oxford Instruments X-MaxN для исследования структуры и качественного состава фаз. На этой же установке микрорентгеноспектральным анализом проведена оценка элементного состава. Шлифы образцов сплава изготавливали параллельно направлению прессования на плоскошлифовальном станке Struers Tegamin-25.

Микродюротметрический анализ осуществлен с помощью установки измерения микротвердости Tukon 2500 Instron согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 20018-74.

Результаты и обсуждение

Исследование микроструктуры образцов

Результаты микроструктурного исследования, проведенного на сканирующем микроскопе, пред-

ставлены на рис. 2. Очевидно, что сплав состоит из темных и светлых областей с промежуточными серыми зонами.

Данные микрорентгеноспектрального анализа образцов сплава позволяют выявить распределение элементов в структуре: Mo, Nb, V – в темных областях, Ta и W – в светлых, а также равномерное распределение Mo, V, Ta и W в переходных серых областях на образцах 1–3, представленных на рис. 3–5 соответственно.

По данным микрорентгеноспектрального анализа образцов 1–3 с использованием линейного микрокартирования с шагом 20 мкм, представленным на рис. 6–8 соответственно, сегрегация становится более очевидной.

Наблюдаемые экспериментальные результаты (рис. 6–8) для высокоэнтропийного жаропрочного сплава системы V–Nb–Mo–Ta–W, полученного гибридным искровым плазменным спеканием, показывают, что увеличение температуры спекания с 1700 до 1750°С ведет к уширению зоны диффузии с образованием пятикомпонентного твердого раствора, близкого по составу к эквивалентным пропорциям (20% (атомн.) каждого), заданным при смешивании компонентов. При этом между данными зонами формируются фазы с повышенным содержанием ниобия (образец 1) и вольфрама (образец 2). На рис. 6 представлен элементный состав образца 1 – высокие пики концентрации ниобия чередуются с пиками концентрации вольфрама, что, скорее всего, связано с равномерным распределением частиц компонентов в смеси. Очевидно, что температуры спекания, равной 1700°С,

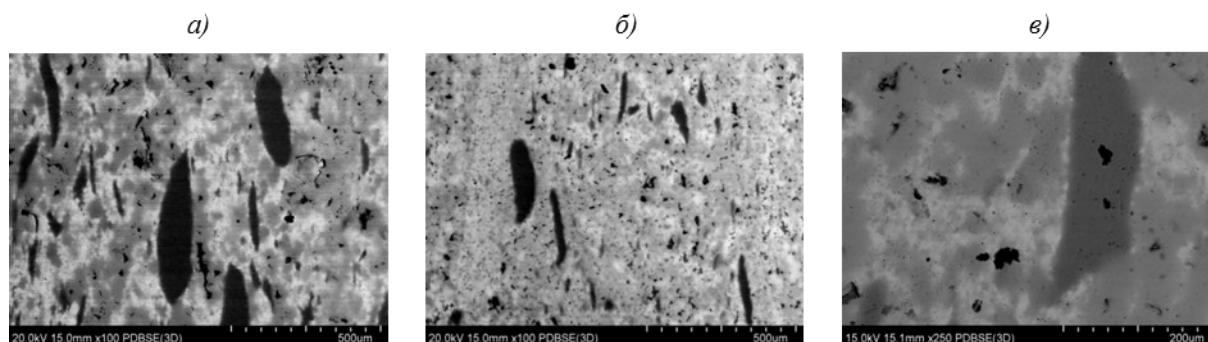


Рис. 2. Микроструктура образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в), полученных при температурах спекания 1700, 1750 и 2000°С соответственно

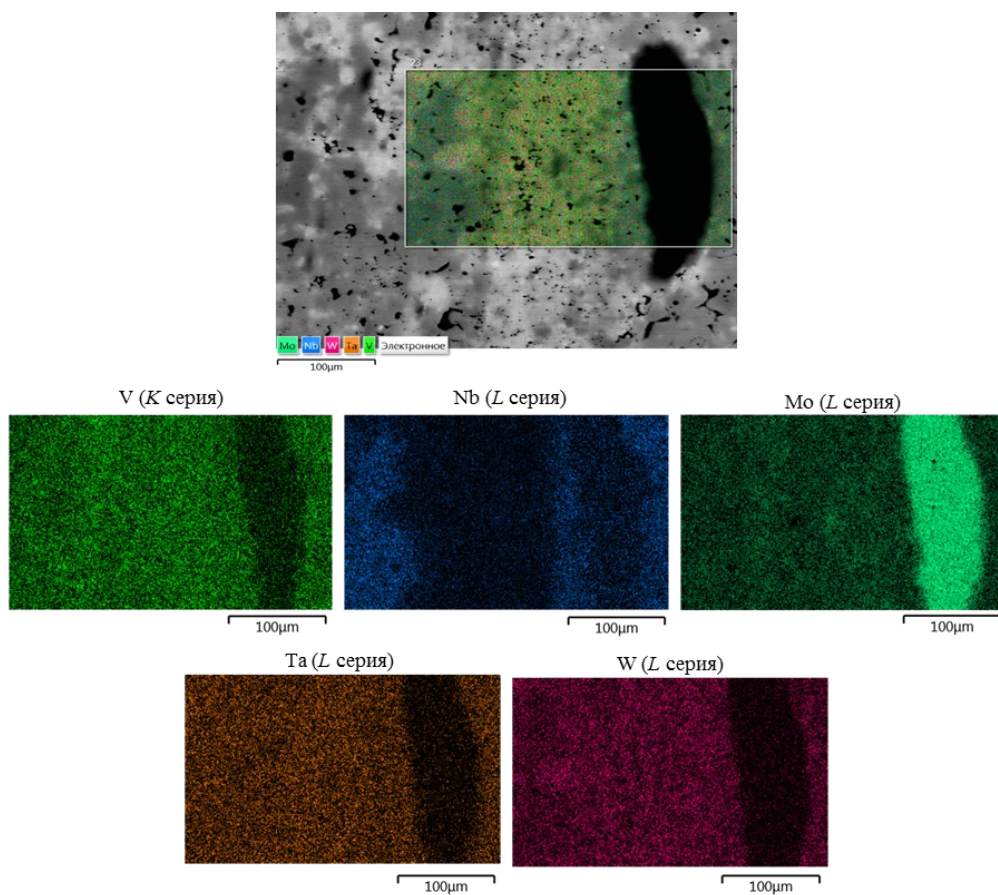


Рис. 3. Карта распределения элементов в структуре образца 1

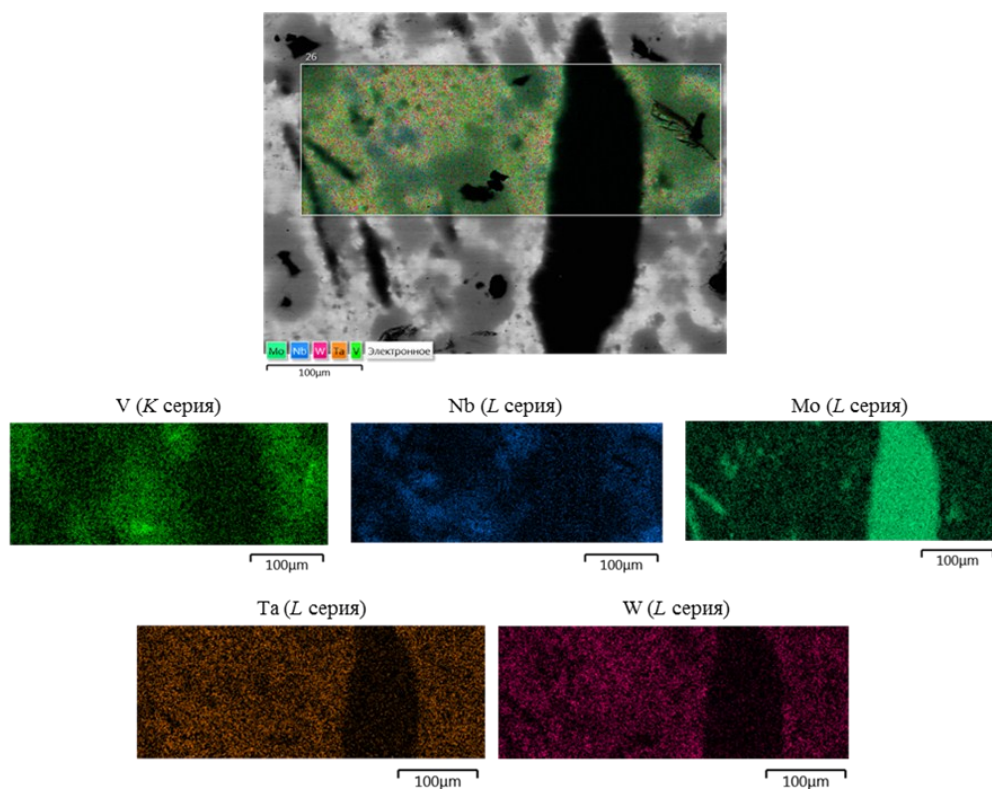


Рис. 4. Карта распределения элементов в структуре образца 2

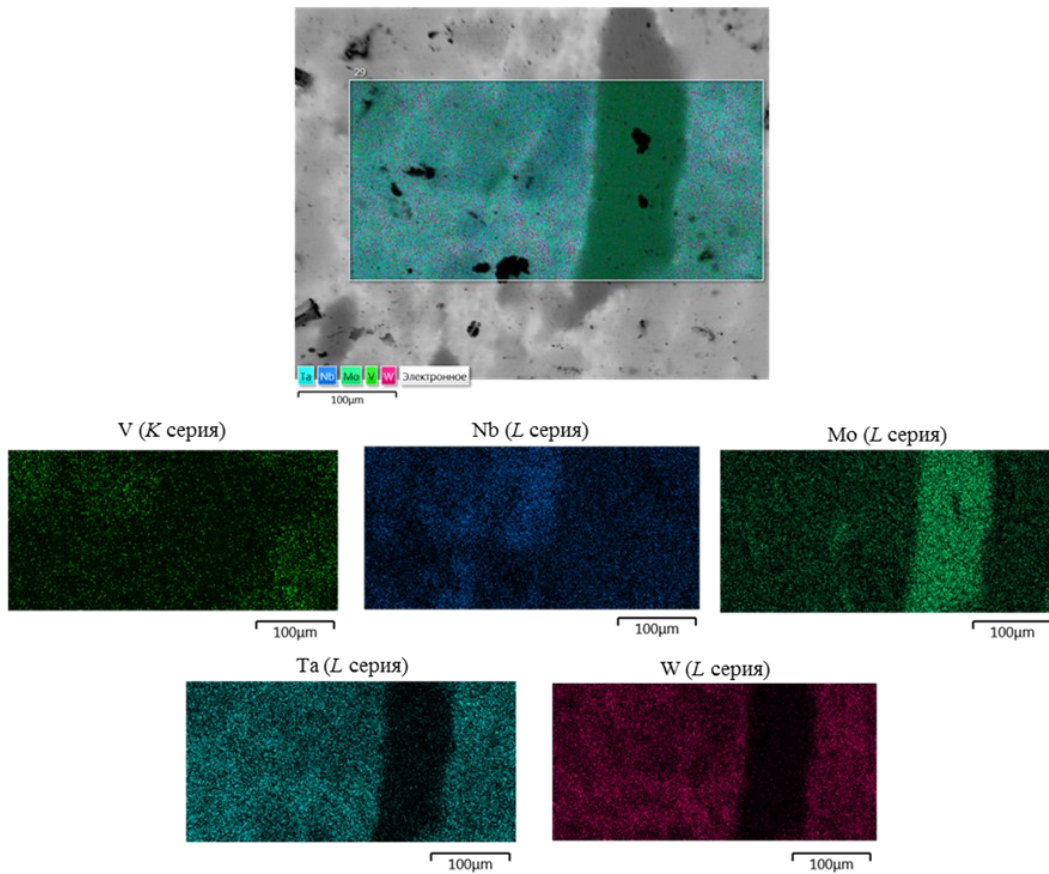


Рис. 5. Карта распределения элементов в структуре образца 3

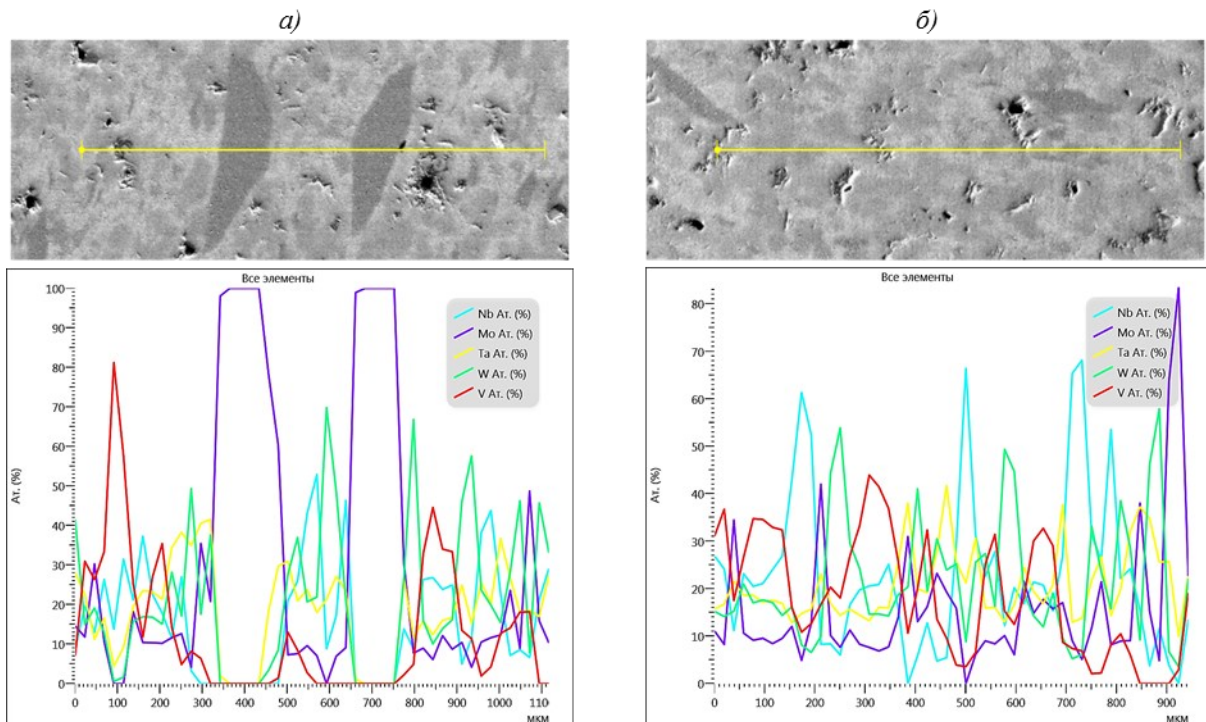


Рис. 6. Данные линейного микрокартирования образца 1, полученного при температуре спекания 1700°C, параллельно (а) и перпендикулярно (б) направлению прессования

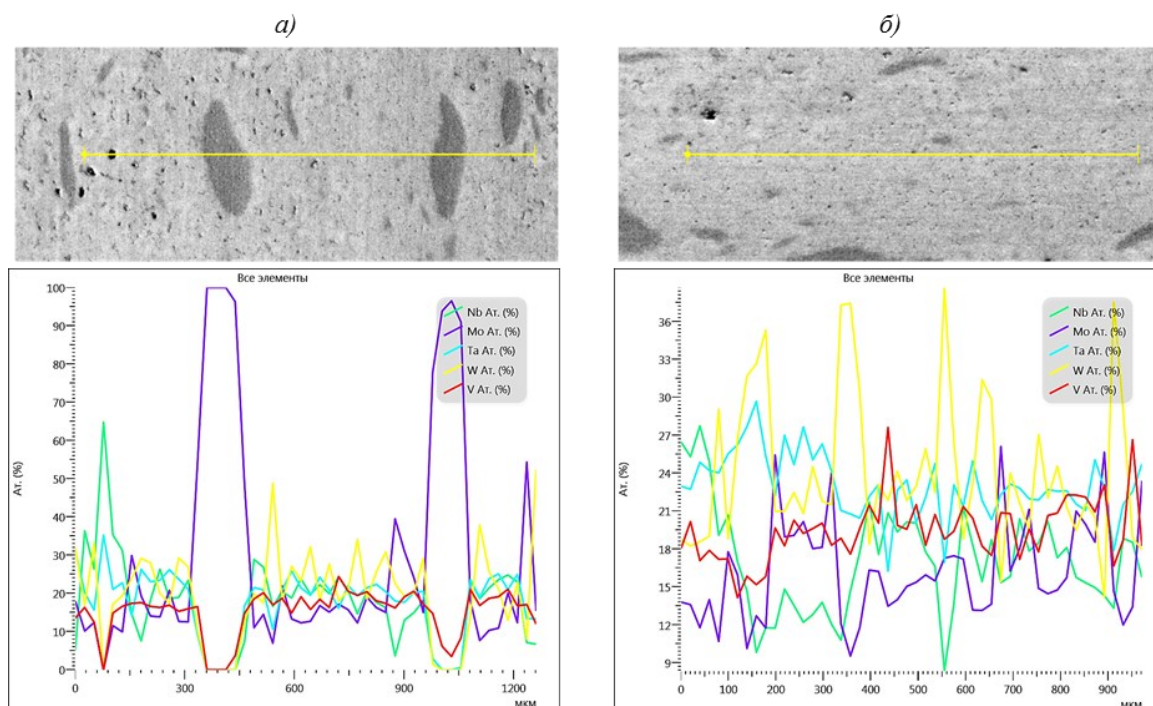


Рис. 7. Данные линейного микрокартирования образца 2, полученного при температуре спекания 1750°C, параллельно (а) и перпендикулярно (б) направлению прессования

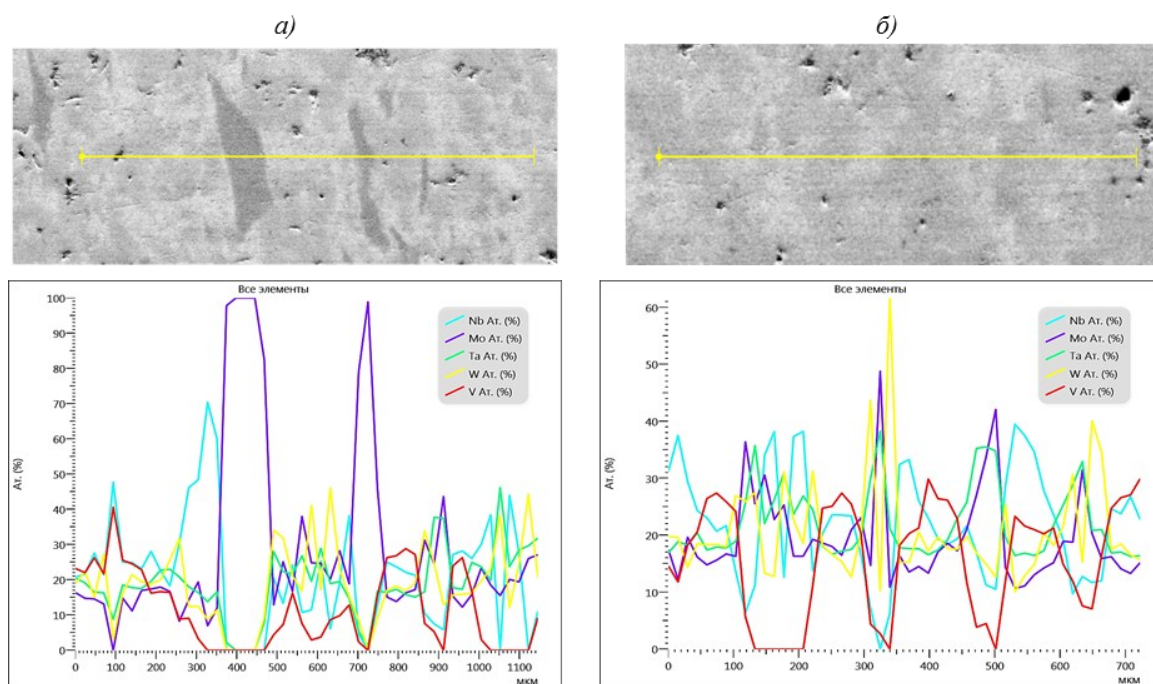


Рис. 8. Данные линейного микрокартирования образца 3, полученного при температуре спекания 2000°C, параллельно (а) и перпендикулярно (б) направлению прессования

недостаточно для возникновения условий формирования равномерной структуры простого раствора. На рис. 7 представлен элементный состав образца 2 – наблюдается снижение амплитуды пиков концентрации элементов до значений, приближающихся к эквипотенциальным, но при этом обра-

зуются фазы с повышенной концентрацией вольфрама. Между данными участками концентрация элементов стабилизируется в пределах значений 15–27% (атомн.). По данным элементного анализа образца 3 (рис. 8, б), в его составе концентрация ванадия снижается до нулевых значений в областях,

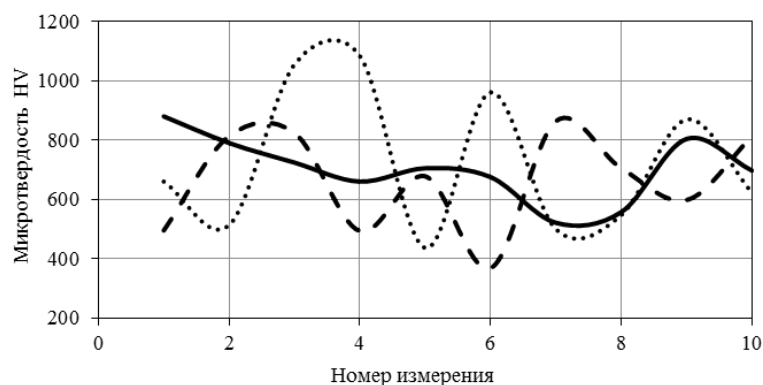


Рис. 9. Значения микротвердости для экспериментальных образцов 1 (···), 2 (—) и 3 (— · —)

где присутствует повышенное количество (до 60% (атомн.)) молибдена или вольфрама, по направлению, перпендикулярному процессу прессования. Возможно, такая сегрегация связана с неравновесными условиями затвердевания.

Во всех трех образцах также наблюдается образование обширных фаз (>200 мкм в широкой части) с преобладанием молибдена (вплоть до 100% (атомн.)), вытянутых перпендикулярно направлению движения пуансона установки SPS. Можно предположить, что такая микроструктурная особенность связана с дисперсностью частиц исходного элементарного порошка и их коагуляцией в процессе спекания. Вероятно, использование в дальнейших экспериментах нанодисперсных порошков исходных компонентов шихтовой смеси позволит преодолеть данное обстоятельство и приведет к более интенсивной диффузии элементов.

МикродюрOMETРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Исследование микротвердости представлено на рис. 9. Большой разброс значений на всех трех экспериментальных образцах подтверждает фазовую сегрегацию в микроструктуре. При этом кривая значений твердости образца 2 имеет пологий вид, что также позволяет сделать вывод о более глубоком протекании диффузии компонентов с образованием твердых растворов и более равномерной микроструктурой.

Для оценки процесса спекания также измеряли плотность полученных экспериментальных образцов методом гидростатического взвешивания:

Условный номер образца	1	2	3
Плотность, г/см ³	11,968	11,712	11,868

По результатам измерений плотности оказалось, что у образцов 1 и 3 она выше, чем у образца 2. При этом температура спекания образца 3 составляла 2000°C. Возможно, вследствие уширения зоны диффузии в процессе структурообразования, выявленной на образце 2, при спекании эквивалентной смеси происходит формирование твердых растворов с сильными искажениями кристаллической решетки, что приводит к повышению порообразования. В данном случае силы давления в 50 МПа, прилагаемой в процессе спекания, недостаточно для преодоления возникающего сопротивления сдвиговой деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Методом сухого смешивания с последующим гибридным электроискровым плазменным спеканием получены экспериментальные образцы высокоэнтропийного сплава системы V–Nb–Mo–Ta–W. Компактирование осуществлено при различных температурах спекания, в том числе больше температуры плавления ванадия.

Изменение температуры спекания хотя и оказывает влияние на протекание диффузионных процессов, но не устраняет неравномерность структурообразования, что подтверждают данные исследования микроструктуры и разброс значений микротвердости на всех трех экспериментальных образцах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реферативная база данных Scopus [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=af2e51c4730a53b69e33ed16fd86be0f&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28high-entropy+alloys%29&sort=plf&sd=t=b&sot=b&sl=34&count=2646&analyze Results=Analyze+results&txGid=ba293e30ac82532f82ed84c80b61c72d> (дата обращения: 13.12.2018).
2. Svensson D.O. High Entropy Alloys: Breakthrough Materials for Aero Engine Applications?: Diploma work. Chalmers University of Technology. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/214141/214141.pdf> (дата обращения 13.12.2018).
3. Miracle D., Miller J.D., Senkov O.N. et al. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications // Entropy. 2014. Vol. 16. P. 494–525.

- Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 19–36.
- Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 36–52.
- Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-3-3.
- Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние лантана на качество и эксплуатационные свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
- Шейн Е.А. Тенденции в области легирования и микролегирования жаропрочных монокристаллических сплавов на основе никеля (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №3 (39). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.
- Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
- Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 164–173.
- Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Константинов С.В. Радиационная стойкость высокоэнтропийных наноструктурированных покрытий (Ti, Hf, Zr, V, Nb)N // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 105–110.
- Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. P. 299–303.
- Шайсултанов Д.Г. Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX (X=Mn, V, Mn и V, Al и Cu): дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015. URL: <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/34643/1/urfu1501.pdf> (дата обращения: 13.12.2018).
- Karantzalis A.E., Poulia A., Georgatis E. et al. New MoWbHfZrTi Refractory High Entropy Alloy System: A Microstructural Verification of Phase Formation Criteria Approach // *Research and Reports on Metals*. 2017. Vol. 1 (2). P. 1–6.
- Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V. et al. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy // *The Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. P. 4062–4074.
- Gorr B., Azim M., Christ H.J. et al. Phase equilibria, microstructure, and high temperature oxidation resistance of novel refractory high-entropy alloys // *The Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 624. P. 270–278.
- Juan C.C., Tsai M.H., Tsai C.W. et al. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory highentropy alloys // *Intermetallics*. 2015. Vol. 62. P. 76–83.
- Poulia A., Georgatis E., Lekatou A., Karantzalis A. Dry-sliding wear response of MoTaWNbV high entropy alloy // *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 19. P. 1–10.
- Liu C.M., Wang H.M., Zhang S.Q. et al. Microstructure and oxidation behaviour of new refractory high entropy alloys // *The Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 583. P. 162–169.
- Tsai M.H., Wang C.W., Tsai C.W. et al. Thermal stability and performance of NbSiTaTiZr high-entropy alloy barrier for copper metallization // *Journal of the Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158. P. 1161–1165.
- Guo S., Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase // *Progress in Natural Science*. 2011. Vol. 21. P. 433–446.
- Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 698–706.
- Юркова А.И., Чернявский В.В., Кравченко А.И. Получение нанокристаллических тугоплавких Nb–Mo–Ta–W–V и Nb–Mo–Ta–W–Hf высокоэнтропийных сплавов методом механического легирования. URL: http://compnano.kpi.ua/pdf_files/sams-2014n/sams-2014-nat-p-150.pdf (дата обращения: 10.12.2018).
- Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B. et al. Refractory high-entropy alloys // *Intermetallics*. 2010. Vol. 18. P. 1758–1765.
- Tsai M.H., Li J.H., Fan A.C., Tsai P.H. Incorrect predictions of simple solid solution high entropy alloys: cause and possible solution // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 127. P. 6–9.
- Pickering E.J., Jones N.G. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. P. 183–202.
- Оглезнева С.А., Каченюк М.Н., Порталов М.Н. и др. Исследование диффузионных процессов при обычном и плазменно-искровом спекании систем с нанодисперсными порошками // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16014> (дата обращения: 17.12.2018).
- Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.