

3. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov / N. N. Rykalin [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 496 s.

4. Veremejchik, A. I. Temperaturnoe pole v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomerno-raspredelennym po pryamougol'noj ploshchadke potokom / A. I. Veremejchik, B. G. Holodar' // Fundamental'nye i prikladnye zadachi mekhaniki : materialy Mezhdunar. nauch. konf., Moskva, 6–9 dek. 2022 g. : v 2 ch. / Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N. E. Baumana ; sost.: P. M. SHkapov, A. I. Ignatov. – M. : MGTU im. N. E. Baumana, 2023. – CH. 1, – С. 66–71.

5. Veremejchik, A. I. Modelirovanie teplovyh processov v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomerno-raspredelennym teplovym potokom / A. I. Veremejchik, B. G. Holodar' // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi, Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 4. – S. 318–330.

УДК 669.79

ВЫПЛАВКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

***В. А. Калинин**, к. т. н., доцент, доцент кафедры машины и технология литейного производства, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: kvlad@bntu.by*

***А. А. Андрушевич**, к. т. н., доцент, доцент кафедры машины и технология металлов, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: andru49@mail.ru*

***Л. П. Долгий**, к. т. н., заведующий научно - исследовательской инновационной лабораторией литейных технологий, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : dolgi@bntu.by*

***С. В. Марцева** Старший преподаватель кафедры экономики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : dolgi@bntu.by*

Реферат

В работе рассмотрены преимущества индукционной плавки в среде вакуума, обеспечивающие получение высоколегированных сплавов на основе тугоплавких компонентов, свободных от вредных примесей с заданными свойствами. Рассмотрены процессы, происходящие в сплавах при плавке, выдержке и разливе. Получаемые сплавы в первую очередь планируется использовать в качестве защитных покрытий композиционных материалов. К числу указанных сплавов относятся тугоплавкие износостойкие сплавы, например, системы Cu – Ti и высокоэнтропийные сплавы, представляющие собой композиции, содержащие от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями. Представлена структура получаемого материала и распределение элементов по сечению слитка.

Ключевые слова: Индукционная плавка, футеровка, дегазация, рафинирование, композиционные материалы, сложнолегированные тугоплавкие сплавы, высокоэнтропийные сплавы.

SMELTING OF MULTICOMPONENT ALLOYS FOR SPECIAL COATINGS

V. A. Kalinichenko, A. A. Andrushevich, L. P. Dolgiy, S. V. Martseva

Abstract

The paper considers the advantages of induction melting in a vacuum environment, ensuring the production of high-alloy alloys based on refractory components, free from harmful impurities with specified properties. The processes occurring in alloys during melting, holding and pouring are considered. The resulting alloys are primarily planned to be used as protective coatings for composite materials. These alloys include refractory wear-resistant alloys, such as the Cu-Ti system and high-entropy alloys, which are compositions containing from 5 to 13 elements with approximately equal concentrations. The structure of the resulting material and the distribution of elements over the ingot cross-section are presented.

Keywords: Induction melting, lining, degassing, refining, composite materials, complex-alloyed refractory alloys, high-entropy alloys.

Введение

В промышленности применяется широкая номенклатура литых композиционных материалов (ЛКМ). Не все из них должны обладать равномерными свойствами по всей толщине литых деталей, что связано со спецификой их эксплуатации. Наибольшее воздействие отрицательных факторов принимает та часть ЛКМ, которая вступает во взаимодействие с окружающей средой или контртелом. Для повышения функциональных свойств рабочих поверхностей могут быть применены покрытия на основе таких материалов, как высокоэнтропийные сплавы и тугоплавкие износостойкие сплавы. Их получение рационально с использованием процесса выплавки в вакуумных печах.

В вакуумных индукционных печах используют обычно средний вакуум от 133,3 Па. Преимуществом плавки в вакуумных печах является пониженное содержание газов и неметаллических включений в полученном металле. При плавке в вакууме ряд физико-химических процессов имеет специфические особенности, интенсивно выделяются газы из металла, заметно испаряются как основные компоненты сплава, так и их примеси с высокой упругостью пара [1]. Основные физико-химические процессы, протекающие в жидком расплаве при плавке в вакууме – дегазация и испарение летучих веществ и восстановление металла.

Основная часть

Вакуумная выплавка многокомпонентных сплавов.

Дегазация металла от водорода и азота. Для получения содержания водорода в металле $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, достаточно, чтобы остаточное давление при $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ составляло около 133,3 Па [2]. Азот имеет более низкий коэффициент диффузии, чем водород, в результате чего он удаляется при вакуумной плавке значительно труднее. Одновременное рафинирующее действие на расплав заключалось в том, что при понижении давления, по закону термодинамики, из него активно выделяется водород. Поскольку в жидком расплаве водород

адсорбирован на неметаллических включениях, то он увлекает их на поверхность или, если имеют высокую плотность, они оседают на дно.

Наиболее благоприятные условия для раскисления металла в вакууме создаются в том случае, когда продукты раскисления образуются в виде газа, например, при раскислении углеродом, который непрерывно удаляется из объема печи. Однако в действительности раскислительная способность углерода резко падает даже при снижении давления до 133,3 Па. Объясняется это тем, что в газовых пузырьках, которые образуются на шероховатых поверхностях футеровки, парциальное давление монооксида углерода гораздо более высокое, чем в расплаве. В результате этого затрудняется агрегация давления монооксида углерода.

Испарение компонентов жидкого металла зависит как от упругости пара и скорости испарения при данных значениях температуры, так и от давления газовой фазы над расплавом. Наиболее высокой упругостью пара в условиях плавки в вакууме обладают такие компоненты, как марганец и в меньшей степени хром и кремний. Из примесей известных металлов наиболее благоприятные условия для удаления испарением имеют примеси олова и меди. Заметные потери хрома путем испарения наблюдаются при повышенном его содержании. Молибден и вольфрам не испаряется в жидкой стали. Потери этих элементов могут иметь место при повышенном содержании в стали кислорода, при этом окислы молибдена и вольфрама весьма летучи. Такие элементы как титан и алюминий также испаряются при вакуумной плавке, но весьма легко окисляются и всплывают на поверхность расплава [3].

Восстановление и удаление неметаллических включений. Термодинамические расчеты показывают [4], что в условиях вакуума углерод, находящийся в расплаве, способен восстанавливать Mn и Cr из оксидов (MnO , Cr_2O_3) и в меньшей степени Si и SiO_2 . При этом уменьшается количество крупных неметаллических включений. Для возможности восстановления тугоплавких оксидов таких элементов как Ti, Al, В, Се, плавку ведут при повышенной температуре. Уменьшение количества неметаллических включений объясняется не только более успешным восстановлением и более интенсивным всплыванием их вместе с пузырьками газа CO, но и самостоятельно в результате снижения вязкости металла и его перемешивания.

При вакуумной плавке металла происходит разрушение футеровки в результате механического воздействия жидкого металла, повышенной диссоциации в вакууме некоторых компонентов, а также восстановление отдельных компонентов футеровки при химическом взаимодействии с элементами, находящимися в составе сплава.

В связи с этим создана возможность выплавки с использованием вакуумной индукционной плавильной установки фирмы Zhengzhou Brother Furnace Co. Ltd (рисунок 1).

Для создания специальных покрытий, улучшающих эксплуатационные свойства ЛКМ, могут быть использованы высокоэнтропийные сплавы (ВЭС). Данный класс материалов представляют собой сплавы, содержащие обычно от 5 до 13 элементов с примерно равными концентрациями от 5 до 35 ат. % [5].



Рисунок 1 – Вакуумная 10-килограммовая индукционная плавильная установка фирмы Zhengzhou Brother Furnace Co. Ltd

В большинстве случаев ВЭС получают путем плавления материалов с последующей их кристаллизацией в вакууме с применением индукционного нагрева [6]. При этом, с целью повышения степени однородности отливок, их переплавляют несколько раз. Слитки, полученные в вакуумной печи, деформируют прокаткой, после чего они готовы для наплавки на композиционную подложку. В результате получаемый материал обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью [7], характеризуется повышенной пластичностью при низких температурах, коррозионной стойкостью, термической стабильностью [10], устойчивостью к ионизирующим излучениям, которые улучшают поверхностные характеристики деталей из литых композиционных материалов.

Уникальные свойства многокомпонентных ВЭС обусловлены проявлением рядом эффектов [8]. Один из них связан с высокой энтропией сплава, второй – с искажениями кристаллической решетки, третий – с замедленной диффузией компонентов сплава.

Эффект высокой энтропии, определяется уровнем конфигурационной энтропии. При этом поиск составов высокоэнтропийных стабильных сплавов осложняется рядом обстоятельств [8]. Одно из них заключается в том, что применимость зависимостей, надежно описывающих условия стабильности идеальных растворов, по отношению к реальным твердым растворам неочевидна.

Использование большого числа компонентов ВЭС вызывает эффект искажений кристаллической решетки, который обусловлен различием размеров атомов, образующих многокомпонентную систему. Искажения кристаллической решетки в значительной степени определяют уровень прочностных свойств ВЭС. Степень искажений минимальна при соседстве атомов, близких по своим размерам. В сплавах, состоящих из атомов, существенно различающихся по размерам, формируются более крупные пустоты – междоузлия. В этих пустотах могут располагаться внедренные атомы, формирующие область локальных напряжений [8]. Источниками искажений являются также

крупные атомы, расположенные в узлах кристаллической решетки и окруженные более мелкими атомами, положение которых также соответствует узлам решетки.

Замедленная диффузия представляет собой третий эффект, определяющий стабильность структуры и комплекс свойств высокоэнтропийных сплавов. Благоприятное влияние низкой скорости диффузии отражается в повышении термической и химической стабильности ВЭС [9]. В качестве факторов, объясняющих торможение диффузионных процессов, отмечают искажения кристаллической решетки и иные особенности, характерные для ВЭС [9].

Перспективными материалами, выплавляемыми с помощью вакуумной индукционной плавки, можно назвать тугоплавкие сплавы, например, системы Cu – Ti – C. Основные области применения сплавов этой системы – различные типы контактных соединителей в автомобилестроении, замена обычных медно-бериллиевых сплавов, применяющихся, в том числе, в качестве матрицы для производства литых композиционных материалов, из-за растущего спроса на замену бериллия с его крайне вредными свойствами. По причине того, что титан сильно реагирует почти со всеми атмосферными газами, со значительными потерями качества и выхода годного, необходимо использование технологии вакуумной индукционной плавки. При этом должна быть предусмотрена возможность одновременной плавки и заливки металла в форму.

Были получены образцы системы Cu – Ti (70 % Cu и 30 % Ti) + C. Данные образцы были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа. На рисунке 2 показана фотография образца после выплавки в индукционной вакуумной печи.

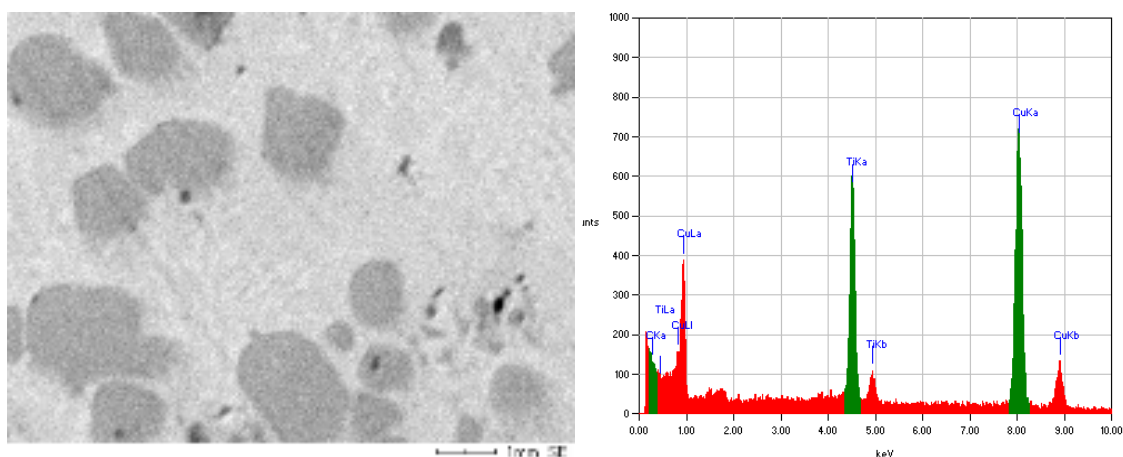


Рисунок 2 – Микроструктура и спектр основных элементов образца системы Cu – Ti – C

Результаты сканирования показали, что медь как основной компонент матричного сплава (более 70 % по массе), присутствует относительно равномерно по всей сканируемой плоскости. Однако в областях присутствия титана находятся обедненные им области, Титан также распределен равномерно, но есть и включения с его повышенной концентрацией, Углерод, вводимый для карбидизации титана, распределен равномерно по площади, что, скорее всего, связано с его низкой реакционной активностью с медью.

Заключение

Плавка тугоплавких сплавов в индукционных вакуумных печах позволяет значительно ограничить контакт расплава с активными газами из атмосферы, добиться глубокой дегазации металла, дает возможность удаления растворенных примесей ряда цветных металлов и возможность выплавки высокотемпературных терморепактивных сплавов практически любого состава.

Рассмотренные примеры не исчерпывают возможные области эффективного применения покрытий, способных повысить качество поверхности макронеоднородных литых композиционных материалов, однако свидетельствуют о больших перспективах использования этих сплавов при изготовлении различных деталей современной техники.

Наиболее эффективным и технически целесообразным на основании проведенных исследований является использование в качестве материалов для таких покрытий высокоэнтропийных и высокоизносостойких тугоплавких сплавов.

Полученные экспериментальные данные показали, что использование вакуумной индукционной плавки дает возможность получения сплавов системы Cu – Ti – C без присутствия растворенных в них газов, в том числе кислорода, и, как результат, получаемые отливки обладают высокой плотностью без газовой пористости и раковин. Качество и плотность получаемого материала определяются типом растворенных элементов и температурно-временным режимом плавки.

Список цитированных источников

1. Чередниченко, А. С. Вакуумные плазменные электропечи : монография / А. С. Чередниченко, Б. И. Юдин. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 583 с.
2. Выбор и применение материалов : учебное пособие : в 5 т. / Минск : Беларуская навука. – Т. 3 : Выбор и применение специальных сталей и сплавов / Н. А. Свидуневич [и др.]. – 2019. – 529 с.
3. Качанов, Е. Б. Методы спецметаллургии – основа производства высококачественных сталей и сплавов / Е. Б. Качанов // *Сталь*. – 2088, № 12. – С. 81–83.
4. Лущик, П. Е. Определение параметров кинетики затвердевания и моделирование литейных процессов при получении отливок из модифицированных сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Лущик Павел Евгеньевич. – Минск, 2018. – 26 с.
5. Otto, F. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys / F. Otto, Y. Yang, H. Bei, E. P. George // *Acta Materialia*. – 2013, № 61 (7). – P. 2628–2638.
6. Yeh, J.-W. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303.
7. Андрушевич, А. А. Особенности получения композиционных материалов с матрицей на основе меди Материалы МНТК «Белагро-2019». Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК / А. А. Андрушевич, В. А. Калиниченко. – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 151–156.
8. Рогачев, А. С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов / А. С. Рогачев // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121, № 8. – С. 807–841.
9. Башев, В. Ф. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава CoCrCuFeNiSn_x / В. Ф. Башев, А. И. Кушнерев // *Физика металлов и металловедение*. – 2014. – Т. 115, № 7. – С. 737–741.

References

1. Cherednichenko, A. S. Vakuumnye plazmennye elektropechi : monografiia / A. S. Cherednichenko, B. I. Iudin. – M. : INFRA-M, 2018. – 583 s.

2. Vybor i primenenie materialov : uchebnoe posobie, T,3, Vybor i primenenie spetsial'nykh stalei i splavov / N, A, Svidunovich [idr.], – Minsk : Belaruskaja navuka, 2019. – 529 c.
3. Kachanov E. B. Metody spetsmetallurgii. – osnova proizvodstva vysokokachestvennykh stalei i splavov / E. B. Kachanov // Stal. – 2088, № 12. – S. 81–83.
4. Lushchik, P. E. Opredelenie parametrov kinetiki zatverdevaniia i modelirovanie liteinykh protsessov pri poluchenii otlivok iz modifitsirovannykh splavov: Avtoref, dis, kand, tekhn, nauk, – Minsk, 2018. – 26 s.
5. Otto, F.; Yang, Y.; Bei, H.; George, E. P. (April 2013), "Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys", Acta Materialia, 61 (7): 2628–2638,
6. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.-W, Yeh, S.-K, Chen, S.-J, Lin, J.-Y, Gan, T.- S, Chin, T.-T, Shun, C.-H, Tsau, S.-Y, Chang // Advanced Engineering Materials, – 2004, – Vol, 6, – P, 299–303, – DOI: 10,1002/adem,200300567,
7. Andrushevich A. A. Kalinichenko V. A. Osobennosti polucheniia kompozitsionnykh materialov s matritsei na osnove medi Materialy MNTK «Belagro-2019», Sovremennye problemy osvoeniia novoi tekhniki, tekhnologii, organizatsii tekhnicheskogo servisa v APK, – Minsk: BGATU, 06-07,06,2019, S,151-156,
8. Rogachev A. S. Struktura, stabil'nost' i svoistva vysokoentropiinykh splavov // Fizika metallov i metallovedenie, – 2020, – T, 121, № 8, – S, 807– 841,
9. Bashev V. F. Kushnerev A. I. Struktura i svoistva vysokoentropiinogo splava CoCrCuFeNiSnx // Fizika metallov i metallovedenie, – 2014, – T, 115, №7, – C,737–741,

УДК 621.83.06

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛЯ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

А. В. Капитонов, к. т. н., доцент, доцент кафедры технология машиностроения, Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь, e-mail: kavbru@gmail.com

Реферат

В статье рассмотрены вопросы оценки точности изготовления и контроля профиля беговых многопериодных дорожек планетарных редуцирующих механизмов с телами качения. Разработаны методы оценки точности профиля многопериодной дорожки с использованием технологии координатных измерений на координатно-измерительной машине. Методы заключаются в измерении изготовленного реального профиля многопериодной дорожки с некоторым линейным шагом, получении массива координат точек профиля в результате измерений и проведении вычислений погрешностей профиля дорожки в соответствии с назначенными показателями точности, характеризующими угловое положение координат точек и линейное отклонение профиля дорожки. Разработаны компьютерные программы для обработки экспериментальных результатов измерений и расчета погрешностей, определяющих точность профиля многопериодной дорожки. Для оценки влияния точности изготовления профиля беговых дорожек на кинематическую погрешность планетарных механизмов с телами качения использовался гармонический анализ с построением амплитудно-частотных спектров кинематических погрешностей установленных показателей.

Ключевые слова: беговая многопериодная дорожка, методы оценки точности, показатели точности, планетарные передачи.