

УДК 669.046:669.2/8:546.8

Т. Л. Кузнецова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

e-mail: pisar@ipms.kiev.ua

Н. П. Бродниковский, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом,

e-mail: brodnikovsky@ipms.kiev.ua

Н. А. Крапивко, канд. физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр.,

e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НИОБИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Nb–Ti–Al, ЛЕГИРОВАННЫХ Cr, Zr, Mo, Si

Приведена методика аналитического прогнозирования технологии выплавки многокомпонентных сплавов ниобия, основанная на взаимосвязи между физико-химическими, теплофизическими свойствам и особенностями рафинирования сплавов, подтвержденная особенностями формирования дендритной литой структуры и дендритной ликвации в экспериментальных образцах сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si. Рекомендована технологическая схема выплавки сплавов в промышленных условиях с полным использованием отходов производства.

Ключевые слова: *состав многокомпонентного сплава, технология плавки, рафинирование, диаграммы состояния, интервал кристаллизации, дендритная структура, дендритная ликвация.*

Разработка сплавов на основе ниобия с низким удельным весом ($\leq 7 \text{ г/см}^3$), имеющих предел текучести при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ не ниже 500 МПа , является одним из наиболее перспективным направлением работ для повышения рабочих характеристик изделий в ракетно-космической сфере. Использование системы Nb–Ti–Al в качестве основы сплавов позволяет создавать жаропрочные сплавы с плотностью менее 7 г/см^3 .

Разрабатываемые авторами ниобиевые сплавы системы Nb–Ti–Al, легированные Cr, Zr, Mo, Si, которые обладают комплексом уникальных физико-механических свойств, являются, в то же время, одними из наиболее сложных в технологическом плане выплавки высокочистых, бездефектных литых передельных заготовок. Вызвано это особыми физико-химическими и теплофизическими характеристиками ниобиевых сплавов этой системы, особенностями рафинирования от примесей внедрения, а также пониженными технологическими свойствами [1].

Физико-химические особенности сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si (широкий интервал кристаллизации, существование высокотемпературных, высокопрочных интерметаллидов и низкотемпературных эвтектик, а также наличие непрерывных твердых растворов с максимальными начальными температурами кристаллизации), обуславливают высокую склонность их к кристаллизационной хрупкости и образованию в объеме слитков и отливок литейных дефектов. Улучшать качество литых сплавов в структурном плане возможно как за счет очищения границ зерен, так и за счет создания мелкозеренной структуры. В литых сплавах это, в первую очередь, зависит от состава сплава, а также от технологических параметров выплавки – степени рафинирования и равномерности распределения легирующих компонентов.

Кроме того, в результате проведенных авторами аналитических исследований [2, 3], основанных на взаимосвязи между физическими свойствами элементов сплавов, энтальпией смешения, составом сплавов, диаграммами состояния и физико-химическими свойствами двойных систем сплавов, установлены следующие технологические особенности сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si, которые должны быть учтены при разработке технологии их выплавки: наличие широкого интервала кристаллизации сплавов – от 300 (для высокоэнтальпийных ниобиевых сплавов) до 130 °С (для усовершенствованных ниобиевых сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si), формирование в сплавах дендритной структуры и наличие объемной и дендритной (до 20 %) ликвации компонентов. Экспериментально, на установке ВДТА-8М3 (дифференциально-термический анализ сплавов) и на установке «Camebax – SX-50» (электронно-зондовый рентгеновский микроанализатор) подтверждены предпосылки аналитических исследований авторов: теплофизические особенности сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si (сравнительно низкая теплопроводность и повышенная теплоемкость), уменьшают зависимость кристаллизации сплавов от скорости охлаждения, которая характерна для ряда тугоплавких металлов, таких, как хром, цирконий, молибден и др.

Предыдущие исследования авторов [4] показали, что улучшать качество литых сплавов в структурном плане возможно за счет проведения специальной обработки расплава в процессе кристаллизации – вибрации и ультразвука и применения модификаторов для увеличения скорости зарождения центров кристаллизации, что требует введения дополнительных технологических операций и установки спецоборудования в плавильной камере

Поэтому методика аналитического прогнозирования технологии выплавки многокомпонентных сплавов ниобия должна базироваться на взаимосвязи между физическими свойствами элементов сплавов, энтальпией смешения, составом сплавов, диаграммами состояния и физико-химическими свойствами двойных систем сплавов, теплофизическими характеристиками и особенностями рафинирования сплавов, что способствует осуществлению целенаправленного повышения технологичности сплавов.

Очистка сплавов от примесей (кислорода, углерода, азота, фосфора) является одним из наиболее эффективных методов предупреждения охрупчивания и повышения коррозионной стойкости ниобиевых сплавов [5]. Способ плавки влияет на чистоту металла и его физико-химические и технологические свойства.

Известно [5], что ниобий, как и другие тугоплавкие металлы в расплавленном состоянии, активно взаимодействует с печными газами и большинством огнеупорных материалов. Ниобий окисляется на воздухе при температуре выше 200 °С, взаимодействует с азотом при температуре выше 400 °С, с водородом – при температуре выше 250 °С. Предел растворимости кислорода в ниобии при 1200 °С равен 0,52, азота – 0,05, углерода – 0,014 %вес. Наличие в ниобии незначительного количества примесей (сотые доли процента) кислорода, азота, водорода и углерода приводит к образованию оксидов, нитридов, карбидов и других сложных фаз, которые, выделяясь по границам и внутри зерен, резко снижают пластичность и повышают прочность и твердость ниобия. Увеличение содержания примесей внедрения вызывает также повышение температуры перехода ниобия из пластичного в хрупкое состояние.

В связи с этим выплавку ниобия необходимо производить в вакууме или в защитной атмосфере. В зависимости от сложности сплавов и конфигурации отливок плавку ниобия возможно проводить в дуговых, индукционных и электронно-лучевых печах с применением медных кристаллизаторов и тиглей с гарнисажем.

В табл. 1 приведены механические свойства ниобия различной чистоты [5].

Получение расплавов с малым содержанием газов обеспечивается раскислением в результате диссоциации химических соединений в вакууме и введением

Механические свойства ниобия различной чистоты

Способ выплавки металла	Содержание примесей внедрения, %вес.	Вид и состояние полуфабрикатов	Механические свойства			
			σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	<i>НВ</i> , кг/мм ²
Электронно-лучевая плавка	0,004 – С, 0,005 – N ₂ , 0,0015 – O ₂ , 0,0008 – H ₂	Лист холоднокатанный (степень деформации 70 %), отожженный при 1000 °С, 30 мин.	34,8	29,3	49	70
Электродуговая плавка	0,05 – С, 0,03 – N ₂ , 0,05 – O ₂ , 0,002 – H ₂	Лист холоднокатанный (степень деформации 90 %), отожженный при 1100 °С, 1 ч	45–50	35–40	25–30	100–120

раскислителей. При плавке в вакууме наиболее эффективные раскислители ниобия – углерод, церий и иттрий [5]. С водородом ниобий образует твердый раствор внедрения (до 10 %ат. Н) и гидрид состава от NbH_{0,7} до NbH. Поглощение водорода обратимое при нагревании в вакууме. Растворимость азота в ниобии составляет 0,005; 0,04 и 0,07 %вес., соответственно, при 300, 1000 и 1500 °С. С углеродом при 1800–2000 °С ниобий образует 3 фазы: α-фаза – твердый раствор внедрения, содержащий до 2 %ат. С при 2335 °С; β-фаза – Nb₂C; δ-фаза – NbC.

Разработка перспективных технологий выплавки высокочистых ниобиевых сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si, основана на термодинамических расчетах процессов рафинирования, а также на исследовании кинетики изменения состава жидкого расплава ниобиевых сплавов в процессе различных видов плавки с целью установления оптимальных параметров плавки и глубокого рафинирования.

Согласно проведенным термодинамическим расчетам, изменение свободной энергии образования оксидов, нитридов и карбидов ниобия, в зависимости от температуры и вакуума, удаления азота из ниобиевых сплавов возможно при температуре 1900 °С и вакууме выше 10⁻² Па, удаления водорода до уровня 0,001 % возможно при вакуумной плавке в вакууме выше 10⁻¹ Па. Кроме того, установлено, что отношение упругости пара монооксида ниобия к упругости пара ниобия при температуре плавления составляет 10⁻², что свидетельствует о возможности удаления кислорода за счет испарения монооксида. NbO заметно испаряется при 1700 °С, интенсивно – при 2300–2350 °С, что используют для очистки ниобия от кислорода.

Особый интерес при рассмотрении рафинирования ниобиевых сплавов представляет возможность уменьшения примесей углерода в процессе плавки. Согласно термодинамическим расчетам, снижение вакуума в плавильной установке до уровня 10⁻² Па при плавке ниобиевых сплавов позволяет одновременно проводить процесс раскисления и удаления углерода.

Исходя из физико-химических свойств высокореакционных сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si, обоснованы оптимальные параметры их плавки и рафинирования, технологии получения высокочистых сплавов на их основе. Наиболее эффективным способом получения высокочистых сплавов ниобия, особенно по содержанию азота и водорода, которые являются наиболее агрессивными компонентами, является электронно-лучевая плавка в холодном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава. Эта плавка позволяет проводить переплав ниобиевых сплавов в широком термовременном диапазоне, не-

обходимом по технологическим требованиям, высоком вакууме (10^{-2} Па), перегреве расплава, промежутке времени. Электромагнитное перемешивание расплава в электронно-лучевой установке способствует переходу реакций рафинирования с диффузионной в переходную и кинетическую области.

На рафинирование ниобия при дуговой и электронно-лучевой плавке влияет термовременной диапазон пребывания металла в жидком состоянии под вакуумом, а также перегрев металла. Ниобий, содержащий 0,25 O и 0,05 % C, после электродуговой переплавки со скоростью 720 г/мин имеет твердость (*HB*) 138 кг/мм², а после электронно-лучевого переплава с той же скоростью – 80–100 кг/мм² [5]. Из литого ниобия методом электродугового и электронно-лучевого переплава в гарнисаже можно получать фасонные отливки, которые заливаются в графитовые формы или кокили.

Однако, при выплавке высокоррациональных сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si, в электронно-лучевой установке, поскольку летучесть паров хрома, титана и алюминия при температуре плавления ниобия очень высока, технология выплавки этих сплавов существенно усложняется.

Авторами отработан способ выплавки сплавов данной системы для получения экспериментальных образцов высокочистых сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si, – метод аргоно-дуговой плавки с нерасходуемым вольфрамовым электродом.

Экспериментальные образцы сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si, выплавляли в модернизированной вакуумно-дуговой плавильной установке МИФИ 9-3 в атмосфере аргона с использованием медных луночных тиглей диаметром 50 мм с водяным охлаждением.

Для обеспечения химической однородности состава образцов заготовку переплавляли 4–5 раз, переворачивая ее в тигле. Скорость охлаждения в интервале 10–50 °C/с обеспечивали за счет постепенного снижения мощности над расплавленной поверхностью слитка. Для исследований выплавляли слитки весом 100–200 г. Выплавку сплавов проводили из высокочистых исходных компонентов сплава – высокочистого ниобия марки НБ-1, йодированного циркония и титана, электролитического хрома ЭРХ, высокочистого алюминия А00. Поскольку в состав сплава входят легколетучие компоненты (хром и алюминий), выплавку сплавов проводили с использованием защитной атмосферы высокочистого аргона при избыточном давлении аргона 0,02–0,04 МПа. Сплавы выплавляли методом последовательного разбавления. Для удаления усадочной раковины поверхность слитка оплавливали дугой малой мощности. Время подогрева верха слитка подбиралось так, чтобы создать объем жидкого металла и питать им фронт кристаллизации, но как можно больше уменьшая скорость его продвижения. Скорость кристаллизации слитка – около 60 °/с.

Известно, что повышение чистоты сплавов по примесям внедрения способствует не только повышению механических характеристик, жаростойкости, но и улучшению литейных характеристик и уменьшению количества кристаллизационных и термических трещин. Поэтому при выплавке экспериментальных сплавов были проведены комплексные средства их очистки от примесей внедрения – O, N, C, H. Для очистки аргона перед проведением плавки проводили переплав гетера – Ti–Zr, который поглощает из атмосферы печи примеси кислорода, азота, паров воды и углеродных соединений. Комплексные способы очистки плавильной установки с дополнительным раскислением расплава иттрием (0,1–0,3 %вес.) позволили получить остаточную концентрацию примесей внедрения в слитках сплавов не выше 0,1 %вес., которые не превышают технические требования. При этом количество примесей внедрения O, N, C в сплавах не превышало уровня (% вес.): O – 0,006–0,017 %; C – 0,003–0,05 %; N – 0,001–0,003 %, H < 0,001 %. Однако, из-за отсутствия существенного перемешивания всего объема расплава в процессе этой плавки, состав ниобиевых сплавов с легирующими, имеющими низкий удельный

Новые литые материалы

вес (Al, Ti, Si), отличается объемной ликвацией (до 5 % от состава легирующих), что может влиять на физико-механические характеристики сплава.

Для получения полупромышленных слитков сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si, проведена отработка методики получения сплавов методом электронно-лучевой плавки в электронно-лучевой установке мощностью 600 кВт с промежуточной емкостью. Выплавку сплавов проводили из высокочистых исходных компонентов сплава – высокочистого ниобия марки НБ-1, йодированных циркония и титана, электролитического хрома ЭРХ, высокочистого алюминия А00. Промежуточная емкость обеспечивает более эффективное рафинирования расплава по сравнению с обычной схемой электронно-лучевой плавки, однако при ее использовании проблематичным является получение равномерного состава сплавов с различным удельным весом и летучестью при температуре плавления. Расплав металла проводили с помощью 4-х электронно-лучевых пушек в вакууме $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

При проведении эксперимента для переплава использовали шихту сплава следующего состава: Al – 4,4 %вес.; Ti – 10,8 %вес.; Cr – 11 %вес.; Nb – 74,2 %вес.

Было выполнено две загрузки шихтовых материалов (табл. 2).

Таблица 2

Шихтовка I-ой и II-ой плавки при выплавке экспериментальных сплавов

Шихтовка плавок	
Загрузка I-ой плавки (гарнисаж)	Загрузка II-ой плавки (рабочая)
Nb – 10 кг (67,5 %вес.); Cr – 2,23 кг (15 %вес.); Al – 1,04 кг (7 %вес.); Ti – 1,56 кг (10,5 %вес.).	Nb – 8,18 кг (62,5 %вес.); Cr – 2,36 кг (18 %вес.); Al – 1,18 кг (9 %вес.); Ti – 1,37 кг (10,5 %вес.).

После двух разового переплава шихты были взяты пробы из гарнисажа промежуточной емкости. Результаты химического состава промежуточной емкости после двукратного переплава приведены в табл. 3.

Загрузку осуществляли таким образом, что при первом переплаве загружали ниобий, титан и лишь треть хрома и алюминия. Остальные хром и алюминий добавляли при втором переплаве.

Предполагалось, что первая загрузка будет использоваться далее как нижняя промежуточная емкость (гарнисаж), а из второй загрузки должны были сливать слиток,

Таблица 3

Химический состав шихты и гарнисажа промежуточной емкости после двукратного переплава первой загрузки шихты

Ком- по- ненты	Химический состав шихты и гарнисажа промежуточной емкости, % вес.						
	Состав шихты 1-ой загруз- ки	1-я проме- жуточная емкость, верх - 1	1-я проме- жуточная емкость, угол, верх	1-я проме- жуточная емкость, угол, середина	1-я проме- жуточная емкость, верх	1-я проме- жуточная емкость, угол, низ	Состав шихты 2-ой загруз- ки
Al	7,0	5,78	4,66	3,53	1,563	9,9	9
Ti	10,5	18,05	19,43	13,9	7,534	17	10,5
Cr	15	22,94	15,99	15,96	1,91	31,2	18
Nb	67,5	53,07	69,5	66	88,6	41,1	62,5

при этом бы происходило перемешивание верхней части первой загрузки со второй.

В процессе первого и второго перепадов ниобий при высокой мощности хоть и плавился, но не взаимодействовал с другими материалами и плохо перемешивался, не образуя соединений или эвтектики. Во время третьего перепада очень трудно сливался металл через носик, так как для этого требовалось длительное воздействие максимально высоких токов электронного луча. Однако, все это не обеспечивало необходимой жидкотекучести сплава. Такая же ситуация оказалась и с поддержкой жидкой ванны в кристаллизаторе. С этим можно связать очень сильный угар алюминия, хрома и титана.

В результате проведенных экспериментов был получен слиток \varnothing 55 мм и длиной 150 мм, который характеризовался повышенной чистотой по примесям внедрения и бездефектностью среза (рисунок).

Количество примесей внедрения в сплаве выплавленного слитка составляло (%вес.): O – 0,008–0,02; C – 0,003–0,007; N – 0,003–0,00; H < 0,001.



Экспериментальный слиток многокомпонентного сплава системы Nb–Ti–Al, полученный методом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с «промежуточной» емкостью

Результаты химических анализов различных частей экспериментального слитка многокомпонентного сплава системы Nb–Ti–Al, полученного методом электронно-лучевой плавки (ЭЛУ) с «промежуточной» емкостью, приведены в табл. 4.

Полученные результаты показали, что при выплавке сплавов ниобия с компонентами, которые значительно отличаются по температуре плавления, летучести, а также по удельному весу, электронно-лучевая плавка не может обеспечить стабильных результатов по химическому составу, однако она может быть использована для рафинирования отходов многокомпонентных сплавов от примесей внедрения (кислорода, углерода, азота, водорода и др.) и получения высокочистых передельных электродов для дальнейшей вакуумно-дуговой выплавки ниобиевых сплавов.

Таким образом, проведенный научно обоснованный анализ и результаты экспериментальных способов выплавки многокомпонентных сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si, позволили разработать рекомендации по созданию промышленной безотходной экономичной технологии с использованием преимуществ существующих методик для плавки и рафинирования тугоплавких высоко-реакционных сплавов.

Таблица 4

Химический анализ разных частей экспериментального слитка электронно-лучевого переплава

Легирующие компоненты	Химический анализ разных частей слитка (Nb и Nb-1)							
	Nb (5 мм от верха)	Nb (5 мм от низа)	Nb верх	Nb низ	Nb-1 (5 мм от верха)	Nb-1 (5 мм от низа)	Nb-1 верх	Nb-1 низ
Al	1,7	1,229	2,098	1,114	1,226	1,024	0,932	1,087
Ti	2,575	0,326	1,155	2,112	1,406	–	1,235	2,282
Cr	0,252	–	–	0,235	0,072	–	–	0,516
Nb	95	98	96,34	96,108	96,977	98,759	97,472	95,828

Если для выплавки экспериментальных образцов сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo и Si, возможна технология получения высокочистых сплавов при использовании высокочистых исходных шихтовых материалов с применением специальной очистки плавильной атмосферы (вакуумно-дуговая плавка с нерасходуемым электродом), то для серийного внедрения данных сплавов необходима разработка технологии рафинирования сплавов в процессе плавки с целью утилизации отходов производства, для удешевления сплавов и экономии сырьевых и энергетических ресурсов.

В результате проведения аналитических и экспериментальных исследований на данном этапе может быть рекомендована следующая комплексная технологическая схема выплавки перспективных сплавов системы Nb–Ti–Al в промышленных условиях с полным использованием отходов производства:

- проведение методом электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием (ЭПП с ЭМП) рафинирования штабиков ниобия и / или отходов производства до остаточного уровня примесей внедрения, допустимых по ТУ для ниобиевых сплавов, и выплавка передельных слитков-электродов для дальнейшей выплавки сплавов заданного состава двумя способами – вакуумно-дуговой плавкой или вакуумно-индукционной плавкой;

- переплавка передельных слитков-электродов методом вакуумно-дуговой плавки в атмосфере аргона с долегированием их летучими легирующими (Cr, Al, Ti и др.) в процессе переплавки и получения слитков сплава заданного состава. При этом легирующие компоненты Al и Ti в виде полос присоединяют к расходным электродам, а хром в виде чешуек ЭРХ подается в жидкую ванну расплава порционным дозатором со скоростью вытяжки слитка;

- переплавка передельных слитков-электродов методом вакуумно-индукционной плавки в атмосфере аргона с долегированием их летучими легирующими (Cr, Al, Ti и др.) в виде лигатур в процессе переплавки, заливка слитков или фасонных отливок. Преимуществом переплавки передельных слитков-электродов методом вакуумно-индукционной плавки в атмосфере аргона есть возможность применения специальных устройств для управления кристаллизацией сплавов за счет вибрации и ультразвука [4] с целью получения бездефектных мелкокристаллических литых заготовок, что особо важно для сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo та Si, характеризующихся широким интервалом кристаллизации сплавов, формированием дендритной структуры и наличием объемной и значительной (до 20 %) дендритной ликвации компонентов.

Список литературы

1. Бродниковский Н. П. О повышении технологичности высокоэнтропийных сплавов на основе ниобия / Н. П. Бродниковский, Т. Л. Кузнецова, Н. А. Крапивко // IX Міжнародна конференція «Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва». – 2016. – С. 85.
2. Кузнецова Т. Л. Повышение технологичности перспективных многокомпонентных сплавов системы Nb–Ti–Al, легированных Cr, Zr, Mo, Si / Н. П. Бродниковский, Н. А. Крапивко // Процессы литья. – № 5. – 2018. – С. 72–80.
3. Кузнецова Т. Л. Особливості формування литої структури багатоконпонентних ніобієвих сплавів системи Nb–Ti–Al, легованих Cr, Zr, Mo та Si / Н. П. Бродніковський, М. О. Крапивко, О.М.Рокицька // Металознавство та обробка металів.– № 3. – 2018. – С. 56–61.
4. Ракицкий А. Н. Измельчение структуры отливок из сплавов хрома в процессе кристаллизации за счет низко- и высокочастотных колебаний / Т. Л. Кузнецова, И. Л. Якименко, В. С.Кравченко // Процессы литья. – № 2. – 2003. – С. 81–86.
5. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов, 2-е издание / А. В. Курдюмов. – Москва: Металлургия, 1982. – 430 с.

Поступила 20.07.2018

References

1. Brodnikovsky, N. P., Kuznetsova, T. L., Krapivko, N. O. (2016) On improving the processability of high-entropy niobium-based alloys. IX Mizhnarodna konferentsiya «Materialy i pokrytiya v ekstremalnykh usloviyakh: issledovaniya, primenenie, ekologicheski chistye tekhnologii proizvodstva», p. 85 [in Russian].
2. Brodnikovsky, N. P., Krapivko, N. O. (2018) Enhancement of technology of perspective multiple component alloys of Nb–Ti–Al system, legated Cr, Zr, Mo, Si. Protsessy litya, no. 5, pp. 72–80 [in Russian].
3. Brodnikovsky, N. P., Krapivko, M. O., Rokytska, O. M. (2018) Peculiarities of formation of the cast structure of multi-component niobium alloys of the Nb–Ti–Al system, legated Cr, Zr, Mo, Si. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, no. 3, pp. 56–61 [in Ukrainian].
4. Kuznetsova, T. L., Yakimenko, I. L., Kravchenko, V. S. (2003) Crushing of the structure of castings from chromium alloys in the process of crystallization due to low- and high-frequency oscillations. Protsessy litya, no. 2, pp. 81–86 [in Russian].
5. Kurdiyomov, A. V., Pikunov, M. V., Chursin, V. M. (1982) Foundry of non-ferrous and rare metals, 2nd edition. Moscow: Metallurgiya, 430 p. [in Russian].

Received 20.07.18

Т. Л. Кузнецова, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: pisar@ipms.kiev.ua

М. П. Бродніковський, канд. фіз.-мат. наук, зав. відділом,
e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

Н. О. Крапивко, канд. фіз.-мат. наук, провідн. наук. співр.,
e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІОБІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Nb–Ti–Al, ЛЕГОВАНИХ Cr, Zr, Mo, Si

Представлено методику аналітичного прогнозування технології виплавки багатоконпонентних сплавів ніобію, засновану на взаємозв'язку між фізико-хімічними, теплофізичними властивостями і особливостями рафінування сплавів, а також на результатах експериментальних даних формування дендритної литої структури і дендритної ліквідації в дослідних зразках сплавів системи Nb–Ti–Al, легованих Cr, Zr, Mo, Si. Рекомендовано технологічну схему виплавки сплавів в промислових умовах із повним використанням відходів виробництва.

Ключові слова: склад багатокomпонентного сплаву, технологія плавки, рафінування, діаграми стану, інтервал кристалізації, дендритна структура, дендритна ліквіація.

T. L. Kuznetsova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: pizar@ipms.kiev.ua

N. P. Brodnikovskiy, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of Department,
e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

N. A. Krapivko, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

Frantsevich Institut for Problems of Material Sciences NAS of Ukraine, Kyiv

FEATURES OF SMELTING OF MULTICOMPONENT NIOBIUM ALLOYS OF A SYSTEM Nb–Ti–Al DOPED WITH Cr, Zr, Mo, Si

The technique of analytical forecasting the melting technology of multicomponent niobium alloys based on the relationship between physico-chemical, thermophysical properties and features of alloys refining is presented. It is confirmed by the features of the formation the dendritic cast structure and dendritic liquation in experimental samples of the Nb-Ti-Al system alloys with the Cr, Zr, Mo, Si. The technological scheme of melting alloys in industrial conditions with the full use of production waste is recommended.

Keywords: composition of multicomponent alloy, smelting technology, refining, state diagrams, crystallization interval, dendritic structure, dendritic liquation.

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи — не более **10 стр.**, рисунков — не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.