

Научная статья

УДК 669.017.165:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-18-32

ЛИКВАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ ОРТО-СПЛАВАХ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Р.С. Исламов¹, А.В. Новак¹, Л.Ю. Авилочев¹, Е.Б. Алексеев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены ликвационные дефекты слитков из интерметаллидных титановых сплавов на основе орто-фазы (Ti_2AlNb), полученных методом вакуумно-дугового переплава. Приведены методы устранения дефектов ликвационного происхождения в титановых, никелевых и ниобий-титановых сплавах, которые можно применять для выплавки качественных слитков из интерметаллидных титановых орто-сплавов. На основании результатов исследования влияния гомогенизирующей термической обработки на химическую однородность сплава Ti-10Zr сделан вывод о необходимости проведения аналогичных работ для слитков из орто-сплавов.

Ключевые слова: титан, интерметаллидные Ti_2AlNb сплавы, ликвационные дефекты, вакуумно-дуговой переплав, гомогенизирующая термическая обработка

Для цитирования: Исламов Р.С., Новак А.В., Авилочев Л.Ю., Алексеев Е.Б. Ликвационные дефекты в интерметаллидных титановых орто-сплавах и методы их устранения // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-18-32.

Scientific article

LIQUATION DEFECTS IN INTERMETALLIC TITANIUM ORTHO-ALLOYS AND METHODS FOR THEIR ELIMINATION

R.S. Islamov¹, A.V. Novak¹, L.Yu. Avilochev¹, E.B. Alekseev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The segregation defects of ingots of intermetallic titanium alloys based on the ortho-phase (Ti_2AlNb), obtained by vacuum-arc melting, are considered. Methods for eliminating similar defects of segregation origin in titanium, nickel and niobium-titanium alloys, the use of which is possible for the smelting of high-quality ingots from intermetallic titanium ortho-alloys are presented. Based on the results of a study of the effect of homogenizing heat treatment on the chemical homogeneity of Ti-10V-2Fe-3Al alloy samples, it was concluded that similar work is necessary for ortho-alloy ingots.

Keywords: titanium, intermetallic Ti_2AlNb alloys, liquation defects, vacuum-arc remelting, homogenizing heat treatment

For citation: Islamov R.S., Novak A.V., Avilochev L.Yu., Alekseev E.B. Liquation defects in intermetallic titanium ortho-alloys and methods for their elimination. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-18-32.

Введение

В связи с повышением требований к техническим характеристикам двигателей и конструкций летательных аппаратов возрастает необходимость использования новых материалов [1–3]. Титановые сплавы широко применяют для создания современной авиационной техники. Для деталей и узлов, работающих при температурах до 600 °С, успешно используются жаропрочные псевдо- α - и ($\alpha+\beta$)-титановые сплавы. Дальнейшее увеличение температуры эксплуатации возможно за счет применения сплавов на основе орто-фазы (Ti_2AlNb), обладающих высокой прочностью, жаропрочностью и жаростойкостью [4, 5].

Основным фактором, сдерживающим внедрение сложнолегированных орто-сплавов в серийное производство, является сложность получения качественных слитков. Высокое содержание тугоплавких элементов и значительное различие температур плавления основных компонентов (титана, алюминия и ниобия) делает орто-сплавы склонными к ликвации [6, 7]. Кроме того, формирование участков с химической неоднородностью в процессе затвердевания слитков при вакуумно-дуговом переплаве (ВДП) приводит к образованию ликвационных дефектов, которые наблюдаются как в титановых, так и в других металлических сплавах [8–10]. Образовавшиеся дефекты сохраняются в деформированных полуфабрикатах, не обнаруживаются традиционными методами неразрушающего контроля, могут привести к существенному изменению микроструктуры и механических свойств сплава.

К ликвации склонны все сплавы, которые кристаллизуются в интервале температур [11], поскольку при затвердевании образуется двухфазная область, включающая твердую и жидкую фазы с различным содержанием легирующих компонентов. Если химический элемент имеет более высокую растворимость в жидком металле, то его содержание в образующейся при кристаллизации твердой фазе будет меньше, чем в жидкой. Для оценки склонности сплава к ликвации используют фазовые диаграммы, характеристикой которых могут служить равновесные коэффициенты распределения легирующих элементов (K_p) и температура ликвации (ΔT_s) [10, 12, 13].

Коэффициент K_p определяется отношением концентраций легирующих элементов в твердой (C_s) и жидкой (C_L) фазе на границе раздела фаз:

$$K_p = \frac{C_s}{C_L}.$$

Отклонения коэффициента K_p от единицы в большую или меньшую сторону приводят к увеличению степени ликвации.

Температура ликвации характеризует ширину двухфазной зоны, в диапазоне которой образуются ликвационные дефекты:

$$\Delta T_s = - \sum_i m_i C_i \frac{1 - K_i}{K_i},$$

где m_i – наклон линии ликвидус на фазовой диаграмме титана и i -го элемента; C_i – концентрация i -го элемента в сплаве; K_i – равновесный коэффициент распределения i -го элемента. Суммирование ведется по всем элементам, входящим в состав сплава.

В зависимости от размера области, в которой возникает различие концентраций компонентов, ликвацию разделяют:

- на внутрикристаллическую (в пределах кристаллического зерна – макрозерна);
- дендритную (в пределах дендритной ячейки);
- зональную (во всем слитке).

Технология производства слитков должна учитывать все особенности орто-сплавов во избежание получения ярко выраженной ликвации, которая может привести к снижению уровня свойств или разрушению изделия при эксплуатации.

В данной статье приведены результаты опубликованных работ, посвященных исследованию ликвационных дефектов в слитках из различных сплавов и методам их устранения с целью возможного применения данных подходов при выплавке слитков из интерметаллидных титановых орто-сплавов повышенного качества.

Ликвационные дефекты в орто-сплавах

В работах [14, 15] исследованы ликвационные дефекты в крупногабаритных промышленных слитках из интерметаллидных титановых орто-сплавов ВТИ-4 и ВИТ1, полученных методом ВДП. Группа исследователей под руководством Е.Н. Кондрашова установила наличие трех видов ликвационных дефектов: древовидные полосы, светлые полосы-шнуры и ликвационные пятна.

Ликвационный дефект в виде древовидной полосы представляет собой ободок, напоминающий годовое кольцо дерева в поперечном сечении. Наиболее часто древовидные полосы возникают в нижней части слитка, полученного методом ВДП. Такой тип дефекта характерен для серийных титановых сплавов Ti-6246, ВТЗ-1 и Ti-64, выплавленных при повышенной силе тока. В слитке из сплава ВТИ-4 данный дефект обнаружен вблизи периферии в области, соответствующей донной части (рис. 1). Для сплава Ti-6246 появление древовидной ликвации связано с медленным продвижением или остановкой фронта затвердевания в условиях формирования плоской структуры кристаллизации. В слитке из сплава ВТИ-4 этот дефект обусловлен аналогичной причиной, поскольку он также выплавлен при высокой силе тока [14].

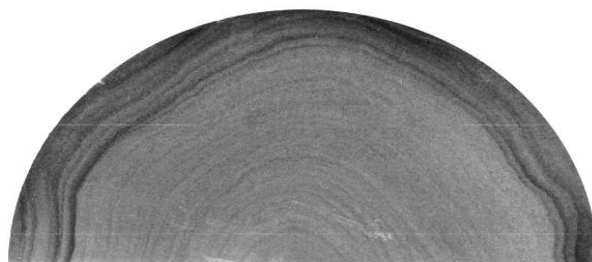


Рис. 1. Древовидные полосы в слитке из сплава ВТИ-4 [14]

Авторы статьи [14] отмечают, что устранение древовидных дефектов как в традиционных титановых сплавах, так и в никелевом сплаве Inconel 718 достигается обработкой технологии плавания. Равномерного перемещения фронта затвердевания (включая отсутствие его остановок) можно достичь за счет автоматического режима плавания при постоянных значениях дугового зазора и массовой скорости плавания.

Ликвационные шнуры рассмотрены на примере слитка размером $\varnothing 420 \times 600$ мм из интерметаллидного титанового орто-сплава ВИТ1 [15]. Светлые ликвационные полосы-шнуры, для которых выявлено пониженное содержание Nb и повышенное содержание Al, обнаружены вблизи периферийной зоны слитка из сплава ВИТ1 (рис. 2). Отмечено сходство макроструктур ликвационных шнуров в слитках из орто-сплава ВИТ1 и титанового сплава Ti-1023.

Для борьбы с подобными дефектами в сплаве Ti-1023 сотрудники ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» разработали программу численного моделирования SimuVAR, позволяющую корректировать параметры ВДП. С помощью моделирования, опирающегося на определение теплофизических свойств и параметров граничных условий ВДП интерметаллидных титановых орто-сплавов ВТИ-4 и ВИТ1, появляется возможность устранить ликвационные шнуры в слитках из данных сплавов.

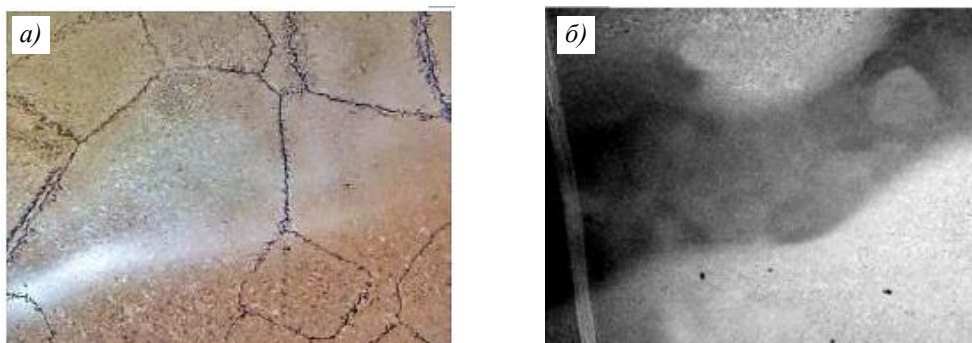


Рис. 2. Микроструктуры светлой полосы-шнура в слитке из сплава ВИТ1, полученные с помощью оптического (а) и растрового электронного (Z-контраст) (б) микроскопов. Ширина снимка составляет 2,73 мм [15]

Ликвационные пятна диаметром < 3 мм обнаружены в центральной по высоте части слитка из сплава ВТИ-4 [14]. При анализе макроструктуры можно отметить равномерное распределение пятен по всему поперечному сечению слитка и уменьшение их размера от центра к периферии (рис. 3). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что содержание элементов внутри ликвационного пятна не соответствует составу сплава ВТИ-4. Наблюдается отклонение содержания Al, Zr, Mo и Si в основном металле и ликвационном пятне, но наиболее заметна ликвация по Nb, которая достигает 5 % (по массе). Данный вид дефектов в орто-сплавах подобен β -флекам в традиционных титановых сплавах и дефектам типа «веснушки» в никелевых сплавах и обусловлен прямой ликвацией, когда перераспределение химических элементов соответствует равновесным бинарным диаграммам. Вследствие этого методы борьбы с дефектами типа «веснушки» в сплавах Inconel и β -флеками в титановых сплавах можно использовать для устранения ликвационных пятен в интерметаллидных титановых орто-сплавах. Одним из возможных решений может быть поиск оптимального значения силы тока, при котором минимизируется число Рэлея (Ra), описывающее отношение подъемной силы к силам капиллярности [14, 16].

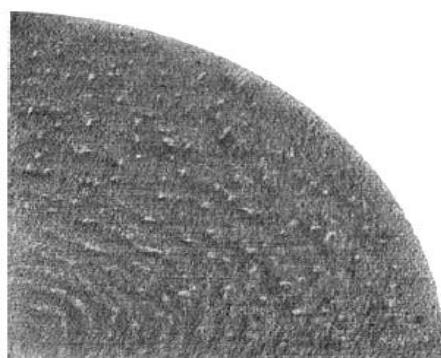


Рис. 3. Ликвационные пятна, обнаруженные в слитке из сплава ВТИ-4 [14]

Отдельно следует отметить возможность образования дефектов в виде тугоплавких включений в слитках из интерметаллидных титановых орто-сплавов, причиной которого может быть введение в чистом виде таких элементов, как Nb, Mo, W, Ta. Решение этой проблемы носит технический характер, связано с грамотным выбором шихтовых материалов и необходимого количества переплавов. Одним из возможных способов является применение гарнисажных дуговых печей, которые обеспечивают осаждение на

дно и последующее «вмерзание» в гарнисажный слой нерастворившихся тугоплавких лигатур. Для устранения такого рода дефектов можно рассмотреть возможность применения электронно-лучевого и плазменно-дугового способа выплавки слитков [17, 18]. Однако в данной статье внимание на этом не акцентировано.

Таким образом, можно сделать вывод, что для достижения высокого качества слитков из интерметаллидных титановых орто-сплавов, полученных методом ВДП, необходимо детально исследовать как причины, так и условия образования ликвационных дефектов. Как отмечено ранее, данные дефекты характерны не только для титановых сплавов, но и для сплавов других систем. Это позволяет применять для орто-сплавов методы устранения химической неоднородности, разработанные для других сплавов.

Ликвационные дефекты и способы их устранения в титановых, никелевых и ниобий-титановых сплавах

В работах [19, 20] исследован дефект сегрегации, известный в промышленности как β -флук и встречающийся в большинстве β -, псевдо- β - и $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов. Он характерен для слитков из сплавов ВТЗ-1, Ti-17, Ti-1023 и представляет собой локальные участки с повышенным содержанием β -стабилизирующих элементов. В производстве данные дефекты можно выявить в ходе травления, используемого при контроле качества слитков. Распределение β -флюков по слитку, как правило, имеет V-образную форму в центральной части, что аналогично распределению, наблюдаемому в никелевом сплаве Inconel 718. Следует отметить, что β -флеку снижают уровень механических свойств сплава, в частности они приводят к уменьшению удлинения при растяжении. При изучении микроструктуры выявлено, что β -флеку стали местами зарождения трещин в сплаве Ti-17 и привели к сокращению срока службы детали. В титановых сплавах, которые плавятся при низких скоростях, β -флеку образуются так же, как и дефекты типа «веснушки» в никелевых сплавах [19, 20]. Другой механизм реализуется в результате эффекта «кристаллического дождя» [20], наблюдаемого в стальных слитках. Данные механизмы не являются взаимоисключающими и могут работать одновременно. Для решения проблемы появления дефектов типа «веснушки» и β -флюков при производстве слитков большого диаметра из промышленных сплавов исследователи предлагают [19–21] использовать число Рэлея. Данный показатель учитывает теплофизические характеристики материала, размер двухфазной области «расплав–твердая фаза», технологические параметры процесса ВДП и характеризует вероятность образования дефектов этой природы в затвердевающей структуре. Установлено, что образование β -флюков наиболее вероятно при $Ra > 1$.

С помощью программного обеспечения Meltflow VAR в работе [20] рассчитано распределение значений числа Рэлея по сечению слитков из сплава Ti-1023 диаметром 580 мм, полученных при разной скорости плавления (рис. 4). Обнаружено, что при низкой скорости (4 кг/мин) вероятность образования β -флюков крайне мала. Повышение скорости до 15 кг/мин приводит к появлению ликвационных дефектов практически по всему периметру слитка, за исключением донной области, вследствие интенсивного теплоотвода. При средней скорости плавления (8 кг/мин) β -флеку появляются в верхней и центральной части слитка. Это свидетельствует о необходимости соответствующего снижения скорости плавления по мере постепенного увеличения размера слитка для уменьшения вероятности образования дефектов. Реализовать данную схему выплавки в промышленности можно, используя программируемую скорость плавления при ВДП. Однако следует учитывать, что для полного устранения дефектов необходима очень низкая скорость плавления, которая является неприемлемой для изготовления слитка с поверхностью, пригодной дляковки.

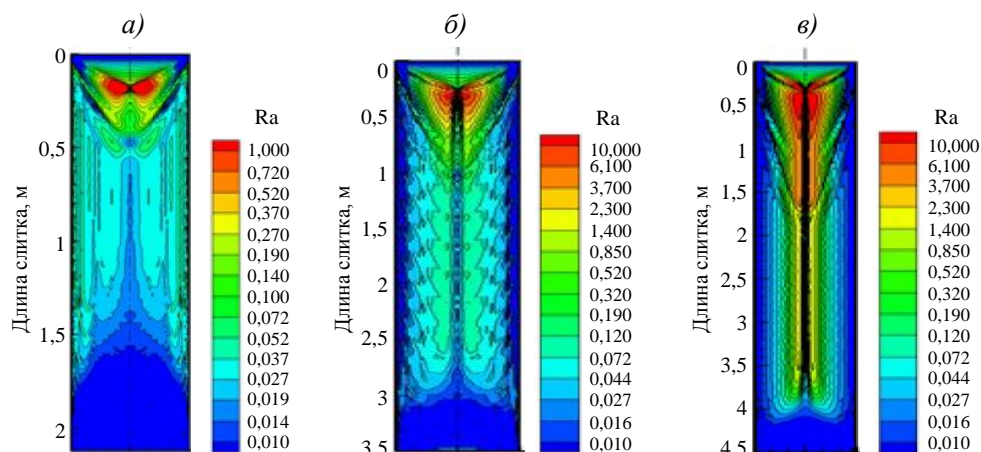


Рис. 4. Расчетная картина распределения значений числа Рэлея (Ra) в слитках из сплава Ti-1023, полученных методом вакуумно-дугового переплава при скорости плавления 4 (а), 8 (б) и 15 кг/мин (в) [20]

Кроме того, в работе [20] показано, что образование β -флеков в зонах со значением Ra , близким к 1, связано с нестабильным процессом плавления из-за регулярного перемещения дуги или изменения режима течения и/или условий теплопередачи. По мнению авторов, решение данной проблемы заключается в разработке процесса, в котором подвод энергии и условия затвердевания слитка не связаны между собой. Такой процесс обеспечит достаточную мощность для достижения необходимого качества поверхности слитка и высокие температурные градиенты для его затвердевания. К таким процессам можно отнести электронно-лучевую плавку с холодным подом и плазменную дуговую плавку. Первый способ в настоящее время используется для производства сплава Ti-64, но следует отметить его существенный недостаток: значительное выгорание легкоплавких элементов в ходе плавления. С механической точки зрения второй способ является сложным, и поэтому широко не используется.

В работе [21] изучены дефекты типа «веснушки» в слитке из сплава системы Nb–Ti диаметром 500 мм, изготовленном методом ВДП. Химический состав дефектов, обнаруженных в верхней части слитка, и основного металла значительно различается: содержание Ti в дефектах больше на 7 % (по массе), чем в матрице. В качестве критерия вероятности возникновения дефектов типа «веснушки» выбрано число Рэлея, расчет которого, как и в предыдущем примере, выполнили с помощью программного обеспечения Meltflow VAR. Моделирование проводили для трех различных режимов ВДП (рис. 5). Для процессов 2 и 3 значения Ra имеют меньший разброс, ярко выраженные «опасные» зоны отсутствуют. В соответствии с результатами моделирования процесс ВДП оптимизирован, получен бездефектный слиток. Можно сделать вывод об эффективности применения данного критерия для борьбы с подобными ликвационными дефектами.

Для моделирования технологических процессов, включая литье и ВДП, разработано множество программных пакетов, которые позволяют описать большое количество физических явлений. Однако для их использования необходима информация о параметрах сплавов, которую зачастую сложно получить. Данные программы специфичны, требуют значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации персонала. Поэтому авторы публикации [22] поставили задачу – разработать простой инструмент, который за короткое время позволит оценить влияние технологических параметров на динамику изменения характеристик слитка.

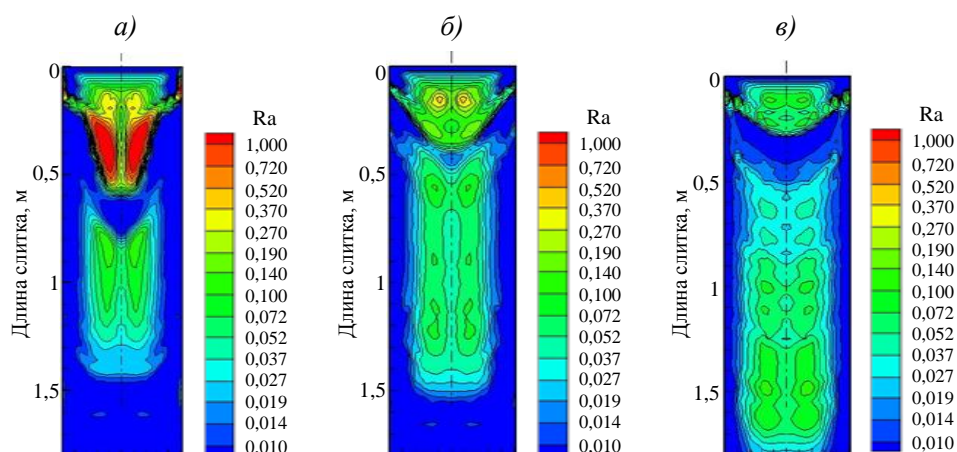


Рис. 5. Результаты моделирования значений числа Рэлея (Ra) для процессов 1 (а), 2 (б) и 3 (в) [21]

Для разработки условий окончательного переplava сплава ВТЗ-1 создана математическая модель расчета температурного поля слитка при ВДП, чтобы исключить образование дефектов сегрегации. На основании рентгенограммы рассчитана морфологическая карта для сплава ВТЗ-1, на которой отражено расположение β -флеков, образующихся при высоких значениях силы тока в определенных зонах слитка после окончательного переplava (рис. 6).

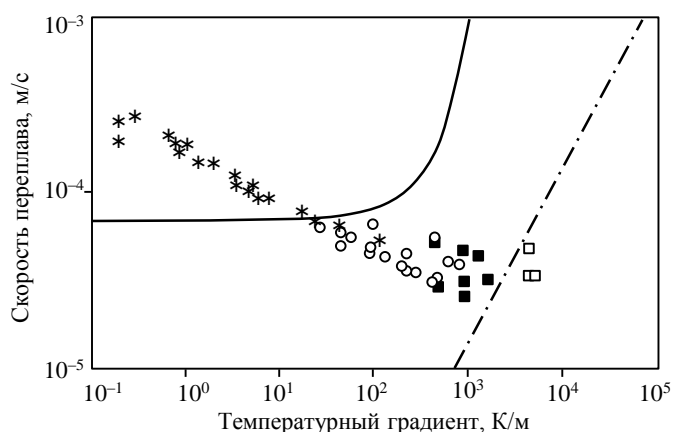


Рис. 6. Морфологическая карта для сплава ВТЗ-1 [22]: * – плавающие (равноосные) дендриты; o – направленные (столбчатые) дендриты; ■ – дендритные ячейки; □ – плоский фронт; кривые – переходы для различных морфологических структур

При разработке процесса ВДП необходимо выбирать значения силы тока таким образом, чтобы ни одна из зон слитка не находилась в «опасной» области морфологической карты, содержащей β -флеки. Кроме того, необходимо учитывать, что чем меньше продолжительность локального затвердевания (Local Solidification Time – LST), тем меньше степень зональной ликвации. Используя разработанную математическую модель, авторы работы [22] установили зависимость LST от силы тока дуги для квазистационарных условий переplava (рис. 7). Зависимость имеет локальный минимум, а сила тока, соответствующая минимальному значению LST, обеспечивает отсутствие β -флеков.

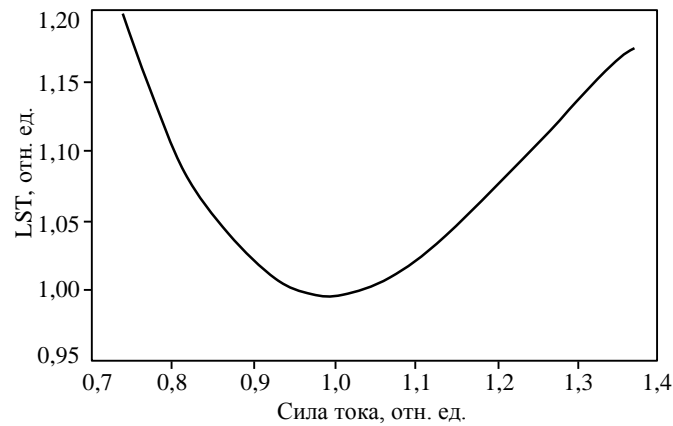


Рис. 7. Зависимость продолжительности локального затвердевания (LST) от силы тока [22]

Используя данные морфологической карты и подобрав силу тока, соответствующую минимальному значению LST, выплавили слиток, из которого изготовили биллеты диаметром 150 мм. Исследования показали отсутствие макросегрегаций и β -флеков в биллетах. Данный пример подтвердил возможность использования созданной тепловой математической модели для получения информации о динамике затвердевания слитка при ВДП и устранения ликвационных дефектов.

В работе [23] исследовано влияние осевого магнитного поля (Axial Magnetic Field – AMF) на процесс затвердевания слитка из никелевого сплава состава Ni–5,8Al–15,2Ta диаметром 254 мм при ВДП. Для этого разработана трехмерная полноразмерная переходная модель, предсказывающая возникновение дефектов сегрегации, и исследованы режимы выплавки при интенсивности магнитного поля 0; 0,005 и 0,01 Тл. Установлено, что увеличение силы перемешивания, создаваемой AMF, приводит к увеличению глубины ванны расплава. Для оценки общей степени сегрегации растворенного вещества использована усредненная по объему степень сегрегации. Выявлено, что по мере увеличения интенсивности AMF с 0 до 0,005 Тл степень сегрегации снижается значительно (на 24,13 %), а дальнейшее повышение до 0,01 Тл приводит к снижению степени сегрегации всего на 1,96 % (рис. 8).

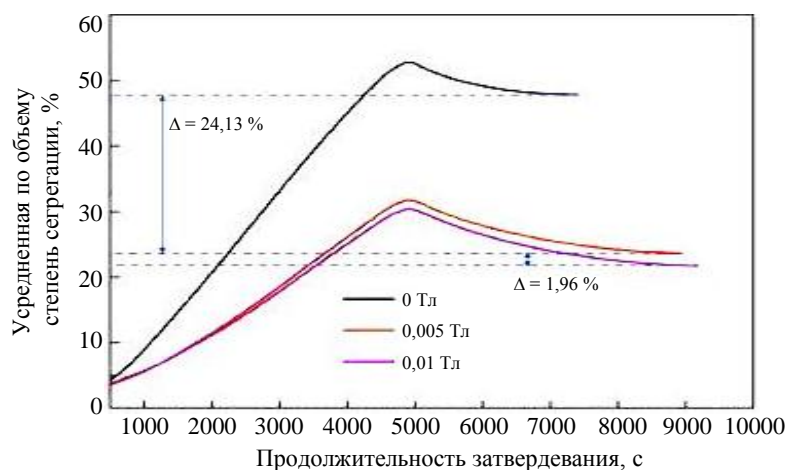


Рис. 8. Изменение усредненной по объему степени сегрегации в процессе затвердевания при различной интенсивности осевого магнитного поля [23]

Для дальнейшей оценки влияния AMF на процессы затвердевания использованы усредненные по объему слитка значения LST и расстояния между дендритными осями II порядка (Secondary Dendrite Arm Spacing – SDAS). Установлено, что применение AMF приводит к уменьшению обоих параметров. При отсутствии AMF значения LST и SDAS составляют 1088 с и 190 мкм; при использовании AMF интенсивностью 0,01 Тл: 890 с и 182 мкм соответственно (рис. 9). Следовательно, можно сделать вывод, что применение AMF позволяет значительно улучшить металлургическое качество слитка, однако следует отметить необходимость рационального подбора интенсивности AMF, поскольку с ее увеличением эффект становится менее выраженным.

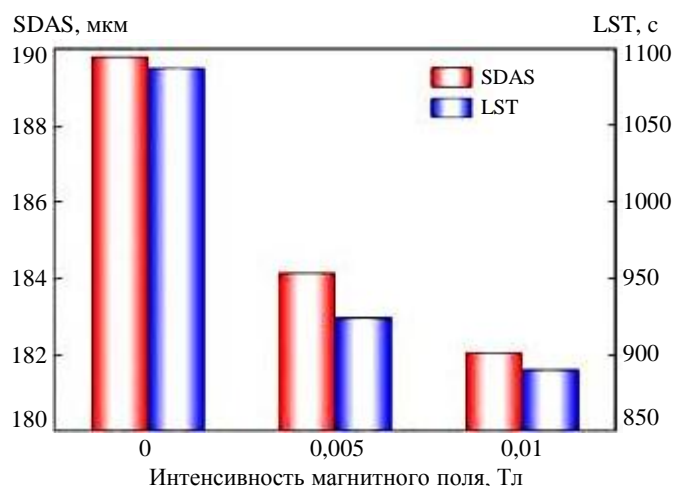


Рис. 9. Продолжительность локального затвердевания (LST) и расстояние между дендритными осями II порядка (SDAS) при различной интенсивности осевого магнитного поля после затвердевания [23]

Как отмечено ранее, для получения качественного слитка необходимо обеспечить высокую точность технологических параметров заданного режима плавления. В работе [24] продемонстрирован один из возможных вариантов реализации такого подхода. Специалисты ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» регулируют величину дугового зазора между расходуемым электродом и ванной расплава при ВДП, изменяя различные показатели процесса: среднее напряжение, массовую скорость плавления и специальные сигналы. При проведении исследований возникла проблема, связанная со сложностью регулирования дугового зазора при небольшой силе тока. В рамках экспериментальных работ по поиску нового сигнала для регулирования процесса установлено, что при частоте снятия сигнала 40 кГц возникают отрицательные значения напряжения (напряжения с обратной полярностью) (рис. 10). Продолжительность («ширина») отрицательных импульсов чувствительна к изменению величины дугового зазора. Наиболее информативные импульсы отбирали в соответствии с распределением Вейбулла. Полученный сигнал Θ для автоматического регулирования дугового зазора позволяет рассчитать его величину с точностью ± 2 усл. ед.

Таким образом, сравнивается фактическое значение межэлектродного зазора с требуемой величиной и формируется сигнал управления приводом перемещения расходуемого электрода. Экспериментальная зависимость сигнала Θ от длины дугового зазора показана на рис. 11. При больших значениях дугового зазора (>30 усл. ед.) для управления печью сигнал Θ неприменим, так как не позволяет значимо различать значения. В этом случае могут происходить «растягивание» и переход горения с дуги на

медный кристаллизатор, что в свою очередь приведет к взрыву. Применение сигнала Θ позволяет контролировать величину дугового зазора между расходуемым электродом и ванной расплава, а также автоматизировать этот процесс, исключив человеческий фактор.

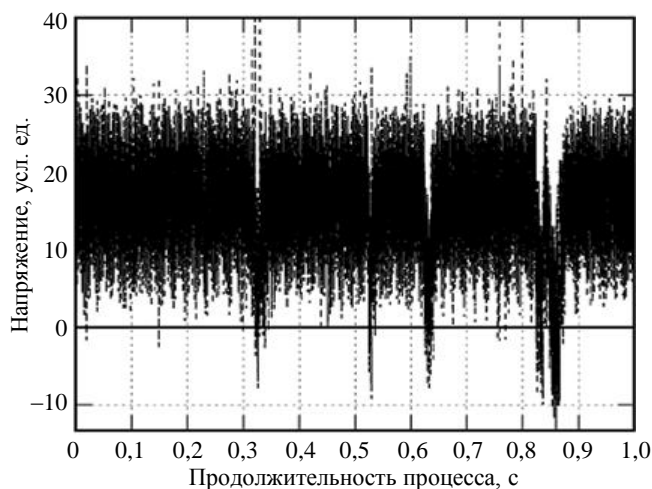


Рис. 10. Зависимость напряжения от продолжительности процесса [24]

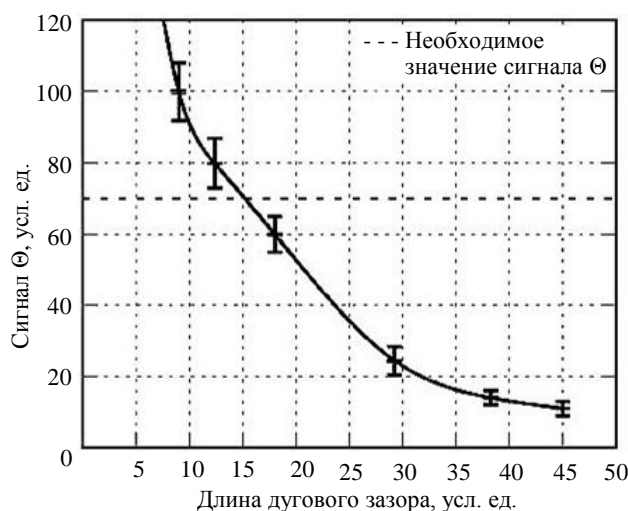


Рис. 11. Зависимость сигнала Θ от длины дугового зазора [24]

Получение качественных и бездефектных слитков является ключевой задачей и основой как для успешного внедрения новых материалов, так и использования серийных сплавов для изготовления ответственных деталей авиационно-космической техники. Качество выплавляемых слитков оказывает непосредственное влияние на эксплуатационные свойства деталей и изделий, поэтому соблюдение технологических режимов при производстве слитков является чрезвычайно важным.

Однако нужно признать, что в силу различных обстоятельств не всегда удастся полностью устранить ликвационные дефекты, которые в значительной мере проявляются на сложнoleгированных сплавах и крупногабаритных промышленных слитках большого диаметра. Помимо технологических решений для отработки параметров плавления необходимо применять дополнительную операцию – гомогенизацию выплавленных слитков. Если первые решения направлены на недопущение образования ликвационной неоднородности в выплавляемых слитках, то вторые – призваны нивелировать

последствия и максимально устранить дефекты в уже выплавленных слитках. Гомогенизация как вид термической обработки нашла применение в производстве традиционных титановых [25, 26] и орто-сплавов [27, 28].

В работе [25] исследовано влияние гомогенизирующей термической обработки на распределение Fe в крупногабаритных слитках из сплава Ti-1023 в масштабе зерен. Слиток размером $\varnothing 360 \times 1300$ мм выплавлен методом ВДП. В рамках исследования из центральной части слитка вырезан темплет, из которого изготовлено четыре образца размером $\varnothing 30 \times 10$ мм (рис. 12). Гомогенизацию проводили при температурах 1050, 1100, 1150 и 1200 °С в течение 12 ч с последующим охлаждением в печи до комнатной температуры.

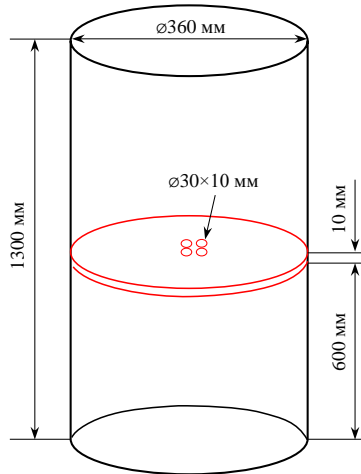


Рис. 12. Схема отбора образцов из слитка, изготовленного из сплава Ti-1023 [25]

В результате гомогенизации в течение 12 ч при температуре 1200 °С достигнут наилучший результат: отклонение содержания Fe в слитке составило 0,4–3,8 %.

После подбора оптимальной температуры проведены дополнительные исследования влияния продолжительности отжига на распределение Fe. Установлено, что в результате гомогенизационной выдержки в течение 24 ч при температуре 1200 °С содержание железа в зернах сплава Ti-1023 может достигать практически полной однородности (рис. 13).

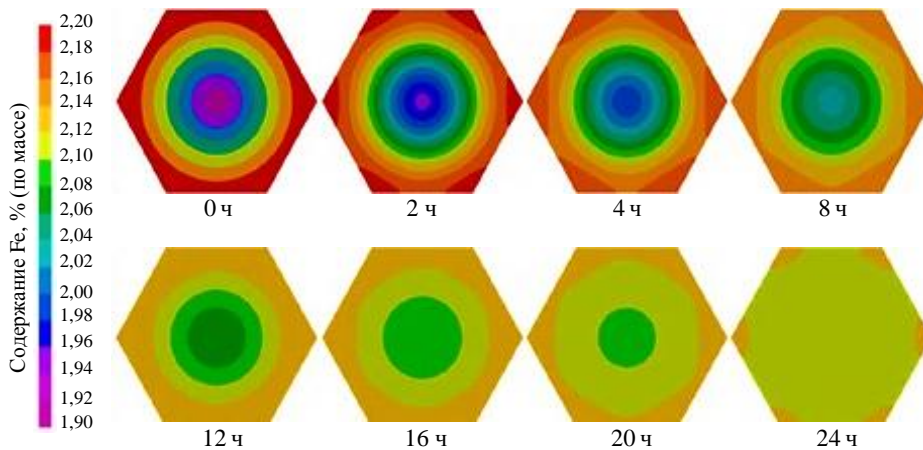


Рис. 13. Распределение содержания Fe в зерне сплава Ti-1023 в результате гомогенизации при температуре 1200 °С [25]

Таким образом, на примере образцов сплава Ti-1023 показано, что проведение гомогенизирующей термической обработки при оптимальной температуре нагрева и продолжительности выдержки способствует повышению однородности литого материала. За счет гомогенизирующей термической обработки аналогично можно повысить химическую однородность слитков из интерметаллидных титановых орто-сплавов. Поэтому в дальнейшем необходимы постановка и проведение описанных работ для орто-сплавов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

Ликвационные дефекты в слитках, изготовленных из интерметаллидных титановых орто-сплавов ВТИ-4 и ВТИ1 методом ВДП, подобны аналогичным дефектам, встречающимся в титановых, никелевых и ниобий-титановых сплавах, поэтому для их устранения можно успешно применять отработанные на других материалах методы.

Устранение ликвационных дефектов в виде древовидных полос достигается отработкой технологии плавления, обеспечивающей равномерное перемещение фронта затвердевания (исключая прерывание плавления) за счет ведения плавки в автоматическом режиме при постоянных значениях дугового зазора и массовой скорости плавления.

Для устранения ликвационных шнуров в ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» разработана программа численного моделирования SimuVAR, учитывающая теплофизические свойства сплава и граничные условия процесса ВДП, которая успешно применяется для сплава Ti-1023.

Для борьбы с ликвационными пятнами (β -флеки в титановых сплавах и дефекты типа «веснушки» в никелевых сплавах) одним из возможных решений может быть поиск оптимальной силы тока, при которой минимизируется число Рэлея: чем меньше Ra , тем ниже вероятность образования дефекта. Необходимы также детальное изучение влияния AMF, построение морфологических карт расположения дефектов и снижение величины LST.

В качестве дополнительного метода снижения ликвационной неоднородности в уже выплавленных слитках может применяться гомогенизирующая термическая обработка. Исследования сплава Ti-1023 показывают, что повышение температуры нагрева до 1200 °С и продолжительности выдержки до 24 ч способствует значительному выравниванию содержания железа в пределах одного зерна.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сулова В.А., Нарский А.Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 64–78.
4. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Авилочев Л.Ю. Интерметаллидное соединение Al_xTi – перспективный материал для повышенных температур (обзор). Часть 1. Кристаллическая структура и свойства интерметаллидного соединения Al_2Ti // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-28-43.

5. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Исламов Р.С. Интерметаллическое соединение Ti_2AlNb – перспективный материал для авиационной и космической техники. Часть 1. Кристаллическая структура и фазовые превращения // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
6. Оглодков М.С., Дуюнова В.А., Ночовная Н.А., Иванов В.И., Авилочев Л.Ю. Особенности технологии изготовления деформированных заготовок из интерметаллидного сплава ВИТ1 для деталей газотурбинного двигателя // *Труды ВИАМ*. 2021. № 12 (106). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-3-13.
7. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
8. Аношкин Н.Ф. Зональная химическая неоднородность слитков. М.: *Металлургия*, 1976. 239 с.
9. Швед Ф.И. Слиток вакуумного дугового переплава. Челябинск: Издательство Татьяны Лурье, 2009. 428 с.
10. Kondrashov E.N., Rusakov K.A., Shchetnikov N.V., Leder M.O. Segregation defects in VAR titanium alloys. I. General defects // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022. No. 1. P. 13–20. DOI: 10.1134/S0036029522060118.
11. Бибииков Е.Л., Ильин А.А. Процессы кристаллизации и затвердевания: учеб. пособие. М.: *Альфа-М*, 2013. 352 с.
12. Курц В., Фишер Д.Д. Фундаментальные основы затвердевания. Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2013. 300 с.
13. Kondrashov E.N., Tarenkova N.Yu., Maksimov A.Yu., Kornilova M.A. Study of the crystallization morphology of VT3-1 Alloy during VAR // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2009. Vol. 18. No. 1. P. 80–84. DOI: 10.1134/S1810232809010111.
14. Кондрашов Е.Н., Русаков К.А., Ледер М.О. и др. Ликвационные дефекты в сплаве ВТИ-4 // *Электрометаллургия*. 2020. № 7. С. 28–32. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-7-28-32.
15. Ледер М.О., Кондрашов Е.Н., Русаков К.А. и др. Ликвационные дефекты в орто-сплавах ВТИ-4 и ВИТ1 // *Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Современные достижения в области создания перспективных сплавов и покрытий для авиационной и космической техники»*. М.: *ВИАМ*, 2021. С. 159–170.
16. Auburtin P., Cockcroft S.L., Mitchell A., Schmalz A.J. Center Segregation. Freckles and Development Directions for Niobium-Containing Superalloys // *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. 1997. P. 47–54. DOI: 10.7449/1997/SUPERALLOYS_1997_47_54.
17. Mitchell A. Melting, Casting and Forging Problems in Titanium Alloys // *Materials Science & Engineering A*. 1998. Vol. 243. P. 257–262. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00810-1.
18. Cen M.J., Liu Y., Chen X. et al. Inclusions in melting process of titanium and titanium alloys // *China Foundry*. 2019. Vol. 16. No. 9. P. 223–231. DOI: 10.1007/s41230-019-9046-1.
19. Mitchell A., Kawakami A., Cockcroft S. Beta fleck and segregation in titanium alloy ingots // *High Temperature Materials and Processes*. 2006. Vol. 25. P. 337–349. DOI: 10.1515/HTMP.2006.25.5-6.337.
20. Kelkar K., Mitchell A. Beta Fleck formation in Titanium Alloys // *MATEC Web of Conferences*. Nantes: EDP Sciences, 2020. Vol. 321 (2). Art. 10001. DOI: 10.1051/mateconf/202032110001.
21. Shang J.J., He Y.S., Yang C. et al. Freckles pattern and microstructure feature of Nb–Ti alloy produced by vacuum arc remelting // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 321 (2). Art. 10009. DOI: 10.1051/mateconf/202032110009.
22. Kondrashov E.N., Leder M.O., Maksimov A.Yu. Simulation on the VT3-1 Alloy Ingot Solidification during VAR // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. Vol. 2018. Is. 12. P. 1114–1120. DOI: 10.1134/S003602951812008X.
23. Cui J., Li B., Liu Z. et al. Numerical investigation on the effect of axial magnetic field on metallurgical quality of ingots during vacuum arc remelting process // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20 (3). P. 1912–1926. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.186.

24. Кондрашов Е.Н., Коновалов Л.В., Ледер М.О., Русаков К.А. Управление дуговым промежутком при ВДП слитков из сплава Ti–10V–2Fe–3Al на основе импульсов с обратной полярностью // *Электрометаллургия*. 2023. № 2. С. 10–16. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-10-16.
25. Tong J.-B., Zhang C.-J., Chen J.-S. et al. Effects of Homogenization Heat Treatment on the Fe Micro-Segregation in Ti-1023 Titanium Alloy // *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 4911. DOI: 10.3390/ma16144911.
26. Shamblen C.E. Minimizing Beta Flecks in the Ti-17 Alloy // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997. Vol. 28. P. 899–903. DOI: 10.1007/S11663-997-0017-3.
27. Zhou X., Fu L., Ge H. et al. Enhancement of tensile properties of Ti₂AlNb alloy added with Ta element // *Materials Letters*. 2022. Vol. 329 (4). P. 133233. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133233.
28. Kazantseva N.V., Lepikhin S.V. Study of the Ti–Al–Nb Phase Diagram // *The Physics of Metals and Metallography*. 2006. Vol. 102. No. 2. P. 169–180. DOI: 10.1134/S0031918X06080084.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A., Narsky A.R. Prospects for the creation of high-temperature heat-resistant alloys based on refractory matrices and natural composites. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 4 (104), pp. 64–78.
4. Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Avilochev L.Yu. Intermetallic compound Al_xTi – are promising material for high elevated temperatures (review). Part 1. The crystalline structure and properties of the intermetallic compound Al₂Ti. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 03. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-28-43.
5. Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Alekseyev E.B., Islamov R.S. Intermetallic compound Ti₂AlNb – promising material for aviation and space technology. Part 1. Crystal structure and phase transformations. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
6. Oglodkov M.S., Duyunova V.A., Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Avilochev L.Yu. Features of the technology manufacturing of deformed blanks from intermetallic alloys VIT1 for parts of the gas turbine engine. *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-3-13.
7. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-30-40.
8. Anoshkin N.F. *Zonal chemical heterogeneity of ingots*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 239 p.
9. Shved F.I. *Vacuum arc remelting ingot*. Chelyabinsk: Tatyana Lurie Publishing House, 2009, 428 p.
10. Kondrashov E.N., Rusakov K.A., Shchetnikov N.V., Leder M.O. Segregation defects in VAR titanium alloys. I. General defects. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2022, no. 6, pp. 553–558. DOI: 10.1134/S0036029522060118.
11. Bibikov E.L., Ilyin A.A. *Processes of crystallization and solidification: allowance*. Moscow: Alfa-M, 2013, 352 p.
12. Kurtz V., Fisher D.D. *Fundamentals of solidification*. Izhevsk: Institute of Computer Research, 2013, 300 p.
13. Kondrashov E.N., Tarenkova N.Yu., Maksimov A.Yu., Kornilova M.A. Study of the crystallization morphology of VT3-1 Alloy during VAR. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, vol. 18, no. 1, pp. 80–84. DOI: 10.1134/s1810232809010111.
14. Kondrashov E.N., Rusakov K.A., Leder M.O. et al. Liquation defects in the VTI-4 alloy. *Elektrometallurgiya*, 2020, no. 7, pp. 28–32. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-7-28-32.

15. Leder M.O., Kondrashov E.N., Rusakov K.A. et al. Liquation defects in ortho-alloys VTI-4 and VIT1. All-Rus. Sci.-tech. conf. «Modern achievements in the field of creating advanced alloys and coatings for aviation and space technology». Moscow: VIAM, 2021, pp. 159–170.
16. Auburtin P., Cockcroft S.L., Mitchell A., Schmalz A.J. Center Segregation. Freckles and Development Directions for Niobium-Containing Superalloys. *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, 1997, pp. 47–54. DOI: 10.7449/1997/SUPERALLOYS_1997_47_54.
17. Mitchell A. Melting, Casting and Forging Problems in Titanium Alloys. *Materials Science & Engineering A*, 1998, vol. 243, pp. 257–262. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00810-1.
18. Cen M.J., Liu Y., Chen X. et al. Inclusions in melting process of titanium and titanium alloys. *China Foundry*, 2019, vol. 16, no. 9, pp. 223–231. DOI: 10.1007/s41230-019-9046-1.
19. Mitchell A., Kawakami A., Cockcroft S. Beta fleck and segregation in titanium alloy ingots. *High Temperature Materials and Processes*, 2006, vol. 25, pp. 337–349. DOI: 10.1515/HTMP.2006.25.5-6.337.
20. Kelkar K., Mitchell A. Beta Fleck formation in Titanium Alloys. *MATEC Web of Conferences. Nantes: EDP Sciences*, 2020, vol. 321 (2), art. 10001. DOI: 10.1051/mateconf/202032110001.
21. Shang J.J., He Y.S., Yang C. et al. Freckles pattern and microstructure feature of Nb–Ti alloy produced by vacuum arc remelting. *MATEC Web of Conferences. Nantes: EDP Sciences*, 2020, vol. 321 (2), art. 10009. DOI: 10.1051/mateconf/202032110009.
22. Kondrashov E.N., Leder M.O., Maksimov A.Yu. Simulation on the VT3-1 Alloy Ingot Solidification during VAR. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018, vol. 2018, is. 12, pp. 1114–1120. DOI: 10.1134/S003602951812008X.
23. Cui J., Li B., Liu Z. et al. Numerical investigation on the effect of axial magnetic field on metallurgical quality of ingots during vacuum arc remelting process. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 20 (3), pp. 1912–1926. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.186.
24. Kondrashov E.N., Konovalov L.V., Leder M.O., Rusakov K.A. Control of the arc gap during VAR of Ti–10V–2Fe–3Al alloy ingots based on pulses with reverse polarity. *Elektrometallurgiya*, 2023, no. 2, pp. 10–16. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-10-16.
25. Tong J.-B., Zhang C.-J., Chen J.-S. et al. Effects of Homogenization Heat Treatment on the Fe Micro-Segregation in Ti-1023 Titanium Alloy. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 4911. DOI: 10.3390/ma16144911.
26. Shamblen C.E. Minimizing Beta Flecks in the Ti-17 Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1997, vol. 28, pp. 899–903. DOI: 10.1007/S11663-997-0017-3.
27. Zhou X., Fu L., Ge H. et al. Enhancement of tensile properties of Ti₂AlNb alloy added with Ta element. *Materials Letters*, 2022, vol. 329 (4), p. 133233. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133233.
28. Kazantseva N.V., Lepikhin S.V. Study of the Ti–Al–Nb Phase Diagram. *The Physics of Metals and Metallography*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 169–180. DOI: 10.1134/S0031918X06080084.

Информация об авторах

Исламов Рустем Салаватович, техник 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Новак Анна Викторовна, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Авилочев Леонид Юрьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Алексеев Евгений Борисович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Rustem S. Islamov, Second Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna V. Novak, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Leonid Yu. Avilochev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy B. Alekseev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.03.2024.
The article was submitted 13.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.03.2024.