
Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-27-36

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СЛИТКОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА ИЗ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT40L

М.А. Макушина¹, А.С. Кочетков¹, И.Д. Виноградов¹

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

Аннотация. Приведены результаты исследований равномерности распределения легирующих элементов в слитках из экономнолегированного литейного титанового сплава VT40L. Экспериментальные слитки получены методом двукратного вакуумно-дугового переплава, для чего рассчитаны основные технологические параметры плавки. Статистическая обработка результатов химического анализа проведена с использованием контрольных карт Шухарта, а также оценены показатели возможностей процесса. Высказаны предположения о методах достижения наилучших показателей стабильности.

Ключевые слова: титан, литейные сплавы, слиток, химический состав, вакуумно-дуговая плавка, показатели качества

Для цитирования: Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Статистическая оценка однородности химического состава слитков вакуумно-дугового переплава из экономнолегированного титанового сплава VT40L // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-27-36.

Scientific article

STATISTICAL EVALUATION OF THE HOMOGENEITY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF VACUUM-ARC REMELTING INGOTS FROM ECONOMIC ALLOY TITANIUM VT40L

М.А. Makushina¹, А.С. Kochetkov¹, I.D. Vinogradov¹

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

Abstract. Presents the results of studies of the uniformity of the distribution of alloying elements in ingots from economically alloyed casting titanium alloy VT40L. Experimental ingots obtained by double vacuum-arc remelting, for which the main technological parameters of melting calculated. Statistical processing of the results of chemical analysis was carried out using Shewhart control charts, and indicators of process capabilities were also evaluated. Suggestions are made about methods for achieving the best stability indicators.

Keywords: titanium, cast alloys, ingot, chemical composition, vacuum-arc melting, quality indicators

For citation: Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. Statistical evaluation of the homogeneity of the chemical composition of vacuum-arc remelting ingots from economic alloy titanium VT40L. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-27-36.

Введение

Важной задачей создания авиационно-космической техники является разработка конструкций летательных аппаратов с высокой надежностью при минимальной

массе [1]. Используемые в настоящее время серийные низколегированные литейные титановые сплавы типа ВТ5Л и ВТ21Л при достаточно низкой стоимости и хорошей технологичности имеют сравнительно низкий гарантированный уровень прочности $\sigma_b \geq 990$ МПа и сопротивления усталости $\sigma_{-1} \geq 220$ МПа (при $N = 10^7$ циклов). Для новых изделий авиационно-космической техники необходимы литые детали из сплавов, близких по свойствам к высокопрочным деформируемым титановым сплавам типа ВТ22 ($\sigma_b \geq 1000$ МПа) [2–4]. Однако использование деформированных полуфабрикатов вместо литых заготовок приводит к увеличению стоимости деталей на 20–30 % за счет снижения коэффициента использования металла, увеличения трудозатрат из-за необходимости многопереходных операций и большого объема механической обработки [5, 6].

Экономнолегированный литейный титановый сплав ВТ40Л [7], легированный малыми количествами β -стабилизаторов и элементов внедрения (кислород и углерод), которые в сумме не превышают 10 % (по массе), обладает повышенными значениями прочности и сопротивления усталости ($\sigma_b \geq 1030$ МПа; $\sigma_{-1} \geq 260$ МПа при $N = 10^7$ циклов). При малом содержании легирующих элементов менее развита зональная и межкристаллитная ликвация, что особенно важно для фасонного литья. Экономное легирование позволяет получить мелкозернистую структуру, обеспечивающую удовлетворительный комплекс механических и эксплуатационных свойств. Сплав ВТ40Л также обладает технологичностью на уровне серийного сплава ВТ21Л, а плотностью – на 20 кг/м^3 ниже за счет меньшего использования тяжелых легирующих элементов, что обеспечивает более высокие удельные характеристики [7].

С другой стороны, сплав ВТ40Л не является дорогостоящим – при его разработке основывались на следующих принципах:

- уменьшение содержания в сплаве дорогих и дефицитных легирующих элементов (V и др.);
- легирование дешевыми эвтектоидообразующими элементами (Fe, Cr);
- легирование с применением элементов внедрения (O, N) [8].

Сплав ВТ40Л относится к системе легирования Ti–Al (Mo, V, Fe, Zr, Si, O, C) и имеет $[\text{Mo}]_{\text{экв}} < 2,5$. Изделия из сплава получают без применения упрочняющей термической обработки, что обеспечивает точность геометрических размеров отливок ввиду отсутствия коробления при высоких температурах. На рис. 1 представлено место сплава ВТ40Л в номенклатуре литейных титановых сплавов на диаграмме в координатах «эквивалент алюминия–эквивалент молибдена», которые показывают склонность к выделению α_2 -фазы ($[\text{Al}]_{\text{экв}}$), степень легирования сплава β -стабилизаторами и их влияние на мартенситное превращение ($[\text{Mo}]_{\text{экв}}$) [8–10].

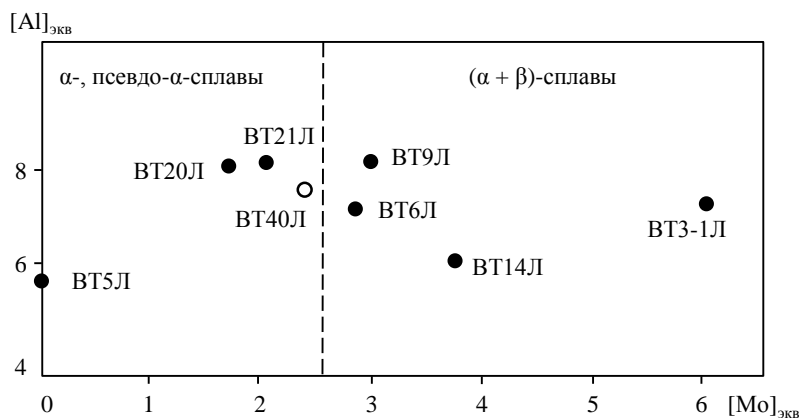


Рис. 1. Расположение литейных титановых сплавов (●) на диаграмме в координатах «эквивалент Al–эквивалент Mo» (○ – экономнолегированный сплав)

Качество исходной заготовки (слитка) является одним из самых важных факторов при изготовлении любого вида металлических заготовок. Во многом от слитка зависят свойства получаемых в дальнейшем деформированных полуфабрикатов, отливок, и, как следствие, готовых изделий. Основным показателем качества слитка является равномерность химического состава по его сечению и высоте [11, 12]. Однако требования к разности значений содержания легирующих элементов в слитках из литейных титановых сплавов не регламентированы. Поэтому в данной статье дана оценка однородности химического состава слитков вакуумно-дугового переплава из экономнолегированного титанового сплава ВТ40Л с использованием методов статистического анализа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Исследования проводили на одиннадцати слитках сплава ВТ40Л, выплавленных методом двукратного вакуумно-дугового переплава. Пределы химического состава сплава по паспорту и шихтовой состав сплава ВТ40Л представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав сплава ВТ40Л

Состав	Содержание элементов, % (по массе)											
	Основные компоненты									Примеси (не более)		
	Ti	Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	O	C	N	H	Сумма прочих примесей
Шихтовой	90,87	6,3	0,6	0,9	0,63	0,4	0,12	0,12	0,08	–	–	–
Паспортный	Основа	5,5– 6,5	0,5– 0,8	0,5– 1,2	0,5– 0,8	0,3– 0,5	0,05– 0,2	0,1– 0,2	0,05– 0,2	0,05	0,01	0,3

Для выплавки слитков использовали губчатый титан марки ТГ-110, лигатуры АМВТУ и АМТ, а также алюминий, железо, цирконий, кремний и рутиловый концентрат. Для достижения большей равномерности из шихтовых материалов формировали одинаковые по массе (500 г) и составу порционные навески. Прессование расходуемых электродов диаметром 100 мм проводили полунепрерывным методом в проходную матрицу на гидравлическом прессе при давлении от 13 до 15 МПа. Такой уровень давления обеспечивает необходимую сплошность прессованных электродов и не позволяет допустить падения в жидкую ванну металла нерасплавленных кусков лигатур и титановой губки. Для первого вакуумно-дугового переплава расходуемым электродом являлся прессованный электрод. Для второго – слиток первого переплава, закрепленный в печи донной частью вверх [14–16].

Исследования химического состава сплава проводили спектральным методом по ГОСТ 23902–79.

Результаты и обсуждение

Сплав ВТ40Л является экономнолегированным и многокомпонентным, т. е. содержит много легирующих элементов в небольших концентрациях. В связи с этим диапазоны содержания легирующих элементов в сплаве достаточно узкие, что дополнительно осложняет задачу получения слитка, соответствующего номинальному (марочному) составу сплава в любой точке своего объема. При отработке технологии

выплавки слитков из экономнолегированного литейного титанового сплава ВТ40Л методом вакуумно-дугового переплава варьировали значения тока и напряжения, а также изменяли временные параметры процесса с целью исключения возможного появления поверхностных дефектов слитков [14].

Для расчета основных технологических параметров плавки существует несколько подходов: *первый* – через глубину жидкой ванны металла [17]. Для вакуумно-дуговой плавки титановых слитков формула расчета глубины жидкой ванны выглядит следующим образом:

$$H = 5(1 - 0,25D)[1 - 0,0015(1 + 5D)(D/v)^2]v,$$

где H – глубина жидкой ванны, м; D – диаметр слитка, м; v – массовая скорость плавки, кг/с.

Поскольку массовая скорость плавки пропорциональна силе тока электрической дуги ($v = kI$, где I – сила тока дуги, кА), формулу можно упростить:

$$H = k_1 I.$$

Коэффициент k_1 для титана составляет 0,04 м/кА. Согласно научно-техническим литературным данным, указанную формулу также можно использовать для расчета глубины жидкой ванны при выплавке слитков низко- и среднелегированных титановых сплавов.

Второй подход – через массу жидкой ванны, которую можно рассчитать по формуле

$$m_B = (\pi\gamma)/2 \cdot R^2 H \text{ [кг]},$$

где γ – плотность; R – радиус слитка, м.

Выразив силу тока дуги, формулу можно упростить до вида

$$m_B = 280 \cdot R^2 I \text{ [кг]}.$$

Режимы первого переплава для слитков сплава ВТ40Л выбраны из расчета массы ванны жидкого металла, чтобы в расплавленном состоянии постоянно находились пять порций шихты (2,5 кг). Таким образом, расчетное значение силы тока дуги для первого переплава в кристаллизаторе диаметром 130 мм равно 2,1 кА.

Для второго переплава в кристаллизаторе диаметром 160 мм необходим ток большей величины ввиду того, что расходуемым электродом является слиток первого переплава, имеющий большие плотность и диаметр, чем пресованный электрод. Таким образом, расчетное значение тока принимаем равным 2,7 кА.

Из научно-технических литературных данных известно, что для нормального хода плавки, для удовлетворительного проплавления и усреднения состава слитка необходимо иметь плотность тока на расходуемом электроде $>10 \text{ А/см}^2$. Однако этот параметр ограничивается технологическими соображениями: при очень большой скорости плавки не успевают протекать процессы дегазации [18]. При рассчитанных значениях тока для первого и второго переплавов плотность тока составляет 16 и 13 А/см² соответственно.

Напряжение выбрано опытным путем и регулируется при визуальном контроле плавки на мониторе вакуумно-дуговой печи.

По указанному режиму в вакуумно-дуговой печи выплавлены восемь слитков из экономнолегированного литейного титанового сплава марки ВТ40Л (один из них представлен на рис. 2, а). Для изучения равномерности распределения легирующих элементов по высоте и по сечению слитков их подвергали механической обработке для снятия короны (донная часть слитка и боковая поверхность механической обработке не подвергались). Далее вырезали темплеты из верхней, средней и донной частей. Из каждого темплетта вырезали по 5 образцов согласно схеме, представленной на рис. 2, б, в.

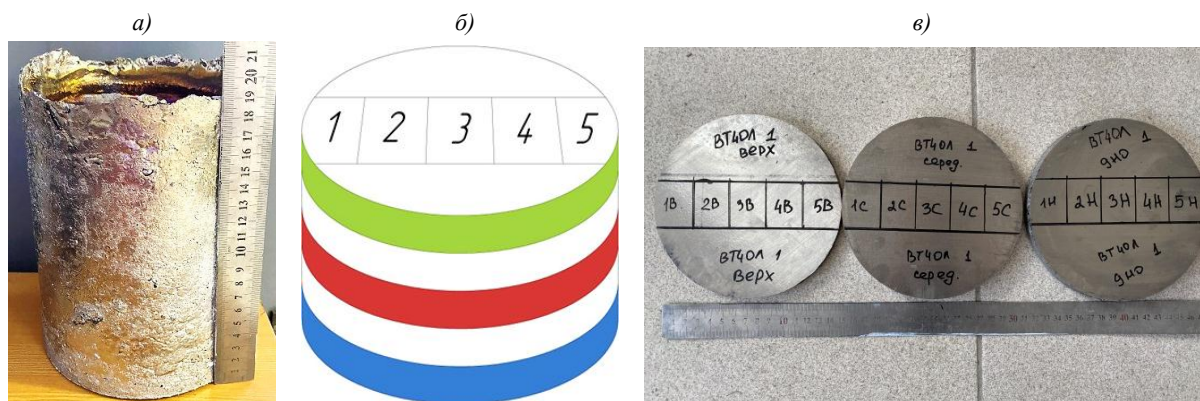


Рис. 2. Внешний вид слитка сплава BT40Л после двойного переплава (а), схема вырезки образцов (б), темплеты из слитка сплава BT40Л, размеченные под вырезку образцов (в)

Анализ полученных результатов показал, что химический состав всех исследуемых слитков из экономнолегированного литейного титанового сплава BT40Л во всех точках соответствует требованиям паспорта на сплав. Далее проводили статистическую оценку равномерности химического состава слитков методом статистического анализа с использованием контрольных карт Шухарта.

Контрольная карта Шухарта [19] – это графический метод представления и сопоставления информации, основанный на данных периодического измерения характеристик некоего процесса или продукта. Этот метод позволяет оценить «стабильность процесса», или, в данном случае, равномерность распределения химических элементов. Карты Шухарта отличаются от обычных графиков показателей процесса наличием нескольких горизонтальных линий – контрольных границ. Контрольные границы в данном случае не являются пределами содержания элементов, а рассчитываются специальным образом. Они находятся на расстоянии 3σ от центральной линии, где σ – генеральное стандартное отклонение используемой статистики. Для определения σ вычисляют выборочное стандартное отклонение или умножают выборочный размах на соответствующий коэффициент. Границы $\pm 3\sigma$ указывают на то, что $\sim 99,7\%$ значений характеристики подгрупп попадут в эти пределы при условии, что процесс стабилен. Иными словами, если все значения на карте находятся внутри контрольных границ, то с вероятностью $99,7\%$ можно считать, что процесс стабилен, или, в данном случае, что распределение элементов равномерно.

Существует несколько типов контрольных карт. В представленной статье использовали карты для количественных данных в ситуации, когда средние значения не заданы. Такой выбор обусловлен тем, что расчетный шихтовой состав невозможно во всех случаях принять за среднее значение (среднюю линию) из-за того, что во всех компонентах сплава, а особенно в титановой губке и лигатурах, могут присутствовать другие элементы в незначительных количествах, что должно было бы сместить центральную линию неким образом, однако на практике учесть все эти примеси весьма затруднительно.

Наиболее часто при статистическом анализе используют пару карты значений: средних (\bar{X}) и размахов (R). Размах – это разность наибольшего и наименьшего значений в подгруппе. Такая пара отражает состояние процесса через разброс (изменчивость от единицы к единице) и через расположение центра (среднее процесса).

Контрольные границы для карт средних рассчитывали по следующим формулам:

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R} \text{ (верхняя контрольная граница);}$$

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R} \text{ (нижняя контрольная граница);}$$

$$CL = \bar{\bar{X}} \text{ (средняя линия),}$$

где $\bar{\bar{X}}$ – среднее средних значений в подгруппе; A_2 – коэффициент для вычисления линий контрольных карт (для восьми наблюдений в подгруппе равен 0,373); \bar{R} – средний размах подгруппы.

Контрольные границы для карт размахов рассчитывали по следующим формулам:

$$UCL = D_3\bar{R} \text{ (верхняя контрольная граница);}$$

$$LCL = D_4\bar{R} \text{ (нижняя контрольная граница);}$$

$$CL = \bar{R} \text{ (средняя линия),}$$

где D_3 и D_4 – коэффициенты для вычисления линий контрольных карт (для восьми наблюдений в подгруппе $D_3 = 0,136$, а $D_4 = 1,864$).

Далее представлены значения средних и размахов для всех легирующих элементов (табл. 2).

Таблица 2

Значения средних и размахов для слитков сплава ВТ40Л

Легирующие элементы	Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	O	C
Средние	5,87	0,61	0,80	0,66	0,38	0,10	0,16	0,08
Размахи	0,76	0,20	0,29	0,21	0,13	0,06	0,047	0,056

Как видно из приведенных данных, средние значения для всех элементов, кроме алюминия, весьма близки к шихтовому составу. Это объясняется разницей в температурах плавления компонентов. При расчете состава сплава для алюминия закладывается небольшое увеличение его количества для нивелирования «угара».

На рис. 3 представлены контрольные карты Шухарта для средних и размахов.

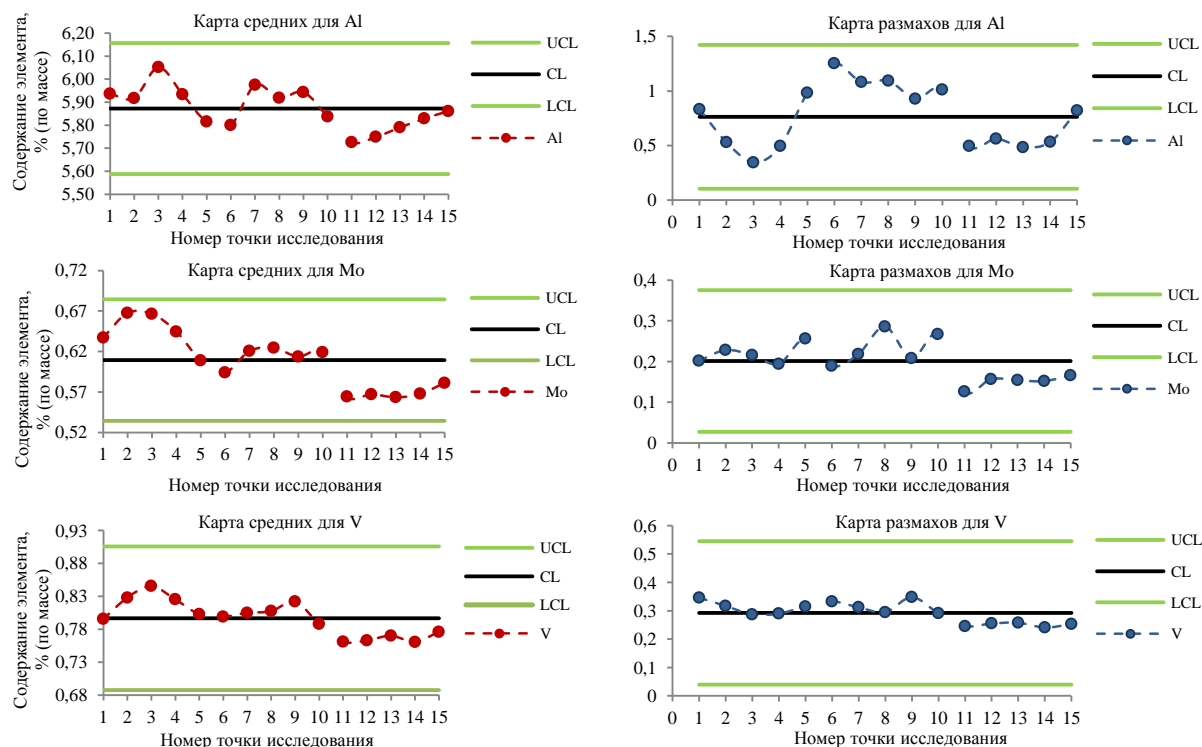


Рис. 3. Контрольные карты средних и размахов для всех легирующих элементов сплава ВТ40Л

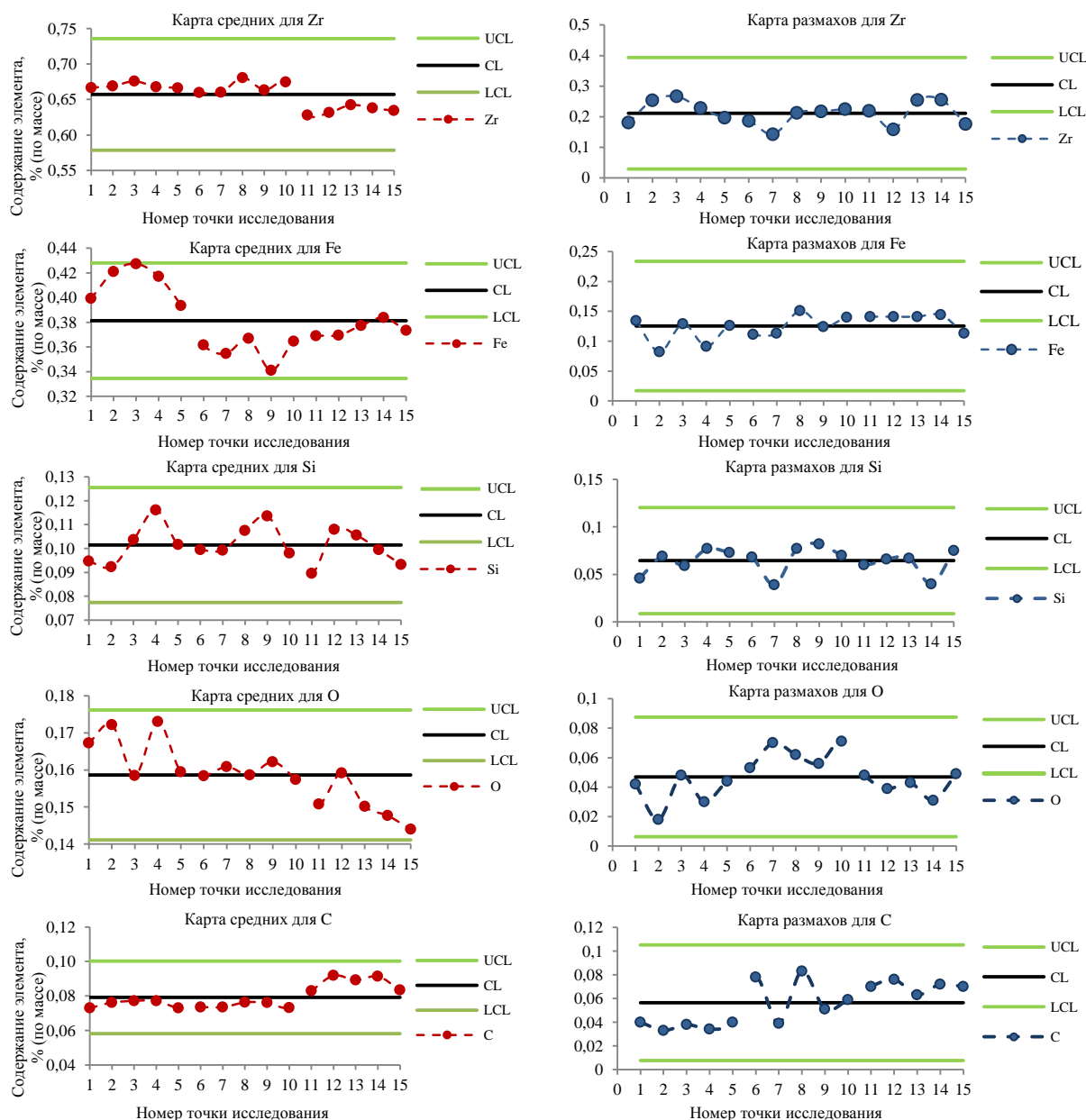


Рис. 3 (продолжение). Контрольные карты средних и размахов для всех легирующих элементов сплава VT40Л

Анализ контрольных карт показывает, что процесс изготовления слитков сплава VT40Л методом двукратного вакуумно-дугового переплава стабилен и по разбросу значений и по положению среднего. В таком случае можно оценить показатели процесса, которые характеризуют потенциальные и фактические возможности процесса удовлетворять установленным техническим допускам для значений выходного показателя качества, измеряемого по количественному признаку [20].

Для начала необходимо рассчитать собственную изменчивость процесса (т. е. зависящую только от обычных причин вариаций, не учитывающую внештатные ситуации) по следующей формуле:

$$\hat{\sigma}_i = \frac{\bar{R}}{d_2},$$

где \bar{R} – средний размах подгруппы, так же как и для контрольных карт; d_2 – коэффициент для восьми измерений в подгруппе, равный 2,847.

Далее необходимо определить так называемые индексы воспроизводимости процесса: C_p и C_{pk} . Первый индекс показывает возможности процесса удовлетворять технический допуск без учета положения среднего значения, а второй – с учетом.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}_i};$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{X}}{3\hat{\sigma}_i}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\hat{\sigma}_i}\right),$$

где USL – наибольшее предельное значение показателя качества, LSL – наименьшее.

В табл. 3 приведены рассчитанные значения индексов воспроизводимости процессов для всех легирующих элементов сплава ВТ40Л.

Таблица 3

Индексы воспроизводимости для слитков сплава ВТ40Л

Легирующие элементы	Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	O	C
C_p	0,622	0,707	1,136	0,674	0,757	1,103	1,011	1,262
C_{pk}	0,535	0,595	0,962	0,642	0,710	0,873	0,836	0,567
Уровень прогнозируемого несоответствия, %	9,5–6,3	6,5–3,8	0,4–0,006	5,8–3,4	3,3–2,4	2,4–0,097	1,5–0,27	9,1–0,025

Зная индексы воспроизводимости, можно предварительно оценить качество процесса изготовления слитков в более простых единицах – уровнем несоответствия продукции в процентах (табл. 3).

Заключения

Установлено, что для обеспечения отсутствия ликвационной неоднородности по сечению и высоте в слитках из сплава ВТ40Л, полученных методом вакуумно-дугового переплава, необходимо поддерживать плотность тока для первого и второго переплавок 16 и 13 А/см² соответственно.

С точки зрения статистики для улучшения стабильности процесса выплавки существует несколько направлений, наиболее перспективным из которых, в данном случае, является снижение влияния случайных (обычных) причин изменчивости процесса. Это может быть выполнено путем поддержания равномерного распределения шихтовых элементов в процессе компактирования электродов с использованием автоматизированных систем дозаторов.

Однако при дальнейшем производстве слитков следует регулярно применять методы статистической оценки качества продукции и отслеживать изменчивость процесса.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
3. Крохина В.А., Путырский С.В., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из титанового сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.09.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62.

4. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
5. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
6. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС; МАТИ, 2009. 520 с.
7. *Авиационные материалы: справочник в 12 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 96 с.
8. Тарасенко Е.Н., Проходцева Л.В., Рудаков А.Г. Высокопрочный экономнолегированный титановый сплав с повышенной долговечностью для точного фасонного литья // *Авиационные материалы и технологии*. 2005. № 2. С. 37–42.
9. Ясинский К.К., Тарасенко Е.Н. Новый высокопрочный литейный титановый сплав ВТ40Л // *Авиационные материалы и технологии*. 2007. № 1. С. 58–60.
10. Кочетков А.С., Ночовная Н.А., Боков К.В. Особенности процесса получения отливок из экономнолегированного литейного титанового сплава ВТ40Л // *Труды ВИАМ*. 2016. № 3. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-4-4.
11. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
12. Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Исследование структуры и химического состава слитков опытного высоколегированного титанового сплава // *Труды ВИАМ*. 2015. № 9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2022).
13. 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.
14. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
15. Кочетков А.С., Панин П.В., Ночовная Н.А., Макушина М.А. Исследование химической неоднородности слитков бета-затвердевающего TiAl-сплава вариативного состава // *Металлург*. 2020. № 9. С. 93–100.
16. 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: 15.09.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
17. Добаткин В.И., Аношкин Н.Ф., Андреев А.Л., Бочвар Г.А., Мусатов М.И., Тетюхин В.В., Чистяков Е.П. Слитки титановых сплавов. М.: *Металлургия*, 1966. 287 с.
18. Сергеев В.В., Галицкий Н.В., Киселев В.П., Козлов В.М. *Металлургия титана*. М.: *Металлургия*, 1971. 320 с.
19. ГОСТ Р 50779.42–99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. М.: Изд-во стандартов, 1999. 32 с.
20. ГОСТ Р 50779.44–2001. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета. М.: Изд-во стандартов, 2001. 16 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Krokhnina V.A. Research of different heat treatment modes influence on properties of semi-finished products and welded joints from titanium alloy VT22M. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
3. Krokhnina V.A., Putyrskiy S.V., Gribkov M.S. Analysis of structure and mechanical properties of welded joint from titanium alloy VT22M. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 16, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62.

4. Dzunovich D.A., Alekseyev E.B., Panin P.V., Lukina E.A., Novak A.V. Structure and properties of sheet semi-finished products from various wrought intermetallic titanium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
5. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
6. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: a reference book*. Moscow: VILS; MATI, 2009, 520 p.
7. *Aviation materials: a reference book in 12 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 96 p.
8. Tarasenko E.N., Prokhotseva L.V., Rudakov A.G. High-strength economically alloyed titanium alloy with increased durability for precision shaped casting. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2005, no. 2, pp. 37–42.
9. Yasinsky K.K., Tarasenko E.N. New high-strength cast titanium alloy VT40L. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2007, no. 1, pp. 58–60.
10. Kochetkov A.S., Nochovnaya N.A., Bokov K.A. Specifics of production process of VT40 titanium alloy castings. *Trudy VIAM*, 2016, no. 3, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-4-4.
11. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. Intermetallic alloys based on titanium and nickel. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
12. Shiryayev A.A., Nochovnaya N.A. Study of structure and chemical composition of pilot high-alloyed titanium alloy ingots. *Trudy VIAM*, 2015, paper no. 9, no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 23, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-6-6.
13. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
14. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryayev A.A., Nochovnaya N.A. The use of ADL VAR L200 vacuum-arc furnace for ingots fabrication of high-temperature titanium aluminides base alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
15. Kochetkov A.S., Panin P.V., Nochovnaya N.A., Makushina M.A. Investigation of the chemical inhomogeneity of ingots of a beta-hardening TiAl-alloy of variable composition. *Metallurg*, 2020, no. 9, pp. 93–100.
16. 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: September 15, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-30-40.
17. Dobatkin V.I., Anoshkin N.F., Andreev A.L., Bochvar G.A., Musatov M.I., Tetyukhin V.V., Chistyakov E.P. *Ingots of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1966, 287 p.
18. Sergeev V.V., Galitsky N.V., Kiselev V.P., Kozlov V.M. *Titanium metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 320 p.
19. State Standard R 50779.42–99. *Statistical methods. Shewhart control charts*. Moscow: Publishing house of standards, 1999, 32 p.
20. State Standard R 50779.44–2001. *Statistical methods. Process capability indicators. Basic methods of calculation*. Moscow: Publishing house of standards, 2001, 16 p.

Информация об авторах

Макушина Марина Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кочетков Алексей Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Виноградов Илья Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Makushina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey S. Kochetkov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya D. Vinogradov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.11.2022.
The article was submitted 27.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 01.11.2022.