

**ОПТИМИЗАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА
ЛИГАТУРОЙ AL-TI-B, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ
МАШИНОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ЛИТЬЁМ**

Сафронов Николай Николаевич

*доктор технических наук,
профессор Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны, Россия
E-mail: safronov-45@mail.ru*

Харисов Ленар Рустамович

*кандидат технических наук,
доцент Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны, Россия
E-mail: ln271@mail.ru*

Фазлыев Марат Рашитович

*аспирант Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) Федерального университета
Набережные Челны, Россия
E-mail: 4763460@gmail.com*

В настоящей работе исследован и оптимизирован процесс модифицирования сплава АК7 опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B, изготовленной из стружечных отходов машиностроения с использованием комбинации процессов порошковой металлургии и электрошлакового литья. Получена адекватная линейная модель на основе проведенного исследования по плану полного факторного эксперимента, в котором управляемыми факторами являлись: массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов Роль растворителя в шихтовой композиции исполнял стружечный отход литейного сплава марки АК7. Откликом кибернетической системы являлся размер литого зерна модифицируемого сплава АК7. Установлен зерноизмельчающий эффект управляемых факторов. Установлен минимальной возможный размер литого зерна модифицированного сплава АК7 гарантирован с 95% вероятностью на уровне 250 мкм.

Ключевые слова: сплавы алюминия, модифицирование, лигатура Al-Ti-B, зародышеобразование, электрошлаковое литье, дисперсные отходы машиностроения

**THE OPTIMIZATION OF SILUMIN ALLOY MODIFICATION WITH AL-TI-B MASTER
ALLOY PRODUCED FROM DISPERSED WASTE OF ENGINEERING WITH
ELECTROSLAG CASTING**

Safronov Nikolai Nikolaevich

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: safronov-45@mail.ru*

Kharisov Lenar Rustamovich

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: ln271@mail.ru*

Fazlyev Marat Rashitovich

*Postgraduate Student of the Naberezhnye Chelny Institute
of Kazan (Volga Region) Federal University
Naberezhnye Chelny, Russia
E-mail: 4763460@gmail.com*

In this research the process of modifying the AK7 alloy with an experimental master alloy based on the Al-Ti-B system, made from machine-building chip waste, using a combination of powder metallurgy and electroslag casting processes, was studied and optimized. The adequate linear model was obtained on the basis of the study, carried out according to the plan of a full factorial experiment, in which the controlled factors were: the mass ratio of titanium- and boron-containing materials in the charge composition. The role of the solvent in the charge composition was played by the chip waste of the AK7 cast alloy. The response of the cybernetic system was the size of the cast grain of the modified AK7 alloy. The grain-grinding effect of controlled factors has been established. The minimum possible size of the cast grain of the modified AK7 alloy is established with a 95% probability at the level of 250 microns.

Keywords: aluminum alloys, modification, Al-Ti-B addition alloy, nucleation, electroslag casting, dispersed mechanical engineering waste

Введение

Модифицирование алюминиевых сплавов является эффективным технологическим процессом измельчения макрозерна, что существенным образом обуславливает повышение механических свойств сплава [1]. Для достижения указанной цели в расплав вводят различные элементы, в том числе достаточно широко используемые на практике, относящиеся к группе сильных модификаторов титан и бор. Эффект модифицирования достигается при сравнительно небольших количествах вводимых в расплав лигатур, содержащих титан и бор, – не более 1 кг на 1 т модифицируемого металла. Однако при этом литое зерно существенно измельчается. Титан и бор как модификаторы относятся к группе, которая в расплаве образует высокодисперсную взвесь. Её частицы служат зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Вследствие этого увеличивается число центров кристаллизации, являющихся химически инертными к расплаву, изоморфными с кристаллами расплава и имеющими твёрдое агрегатное состояние [2, 3].

Учитывая высокую зерноизмельчающую способность силуминовых сплавов титан- и борсодержащей лигатуры, нами предложена ресурсосберегающая технология её получения с привлечением дисперсных отходов машиностроения, основанная на комбинации электрошлакового литья с процессами компактирования в порошковой металлургии. Данная технология является эффективной альтернативой традиционной плавильно-литейной технологии, различные варианты которой изложены в [4]. Преимущество предложенной технологии заключается в том, что синтез материала лигатуры, доведение его до жидкого агрегатного состояния, заполнение им литейной формы и затвердевание синтезированного материала происходит непрерывно и одновременно, что исключает массу технологических переделов, присущих традиционной плавильно-литейной технологии, в которой указанные операции

разобщены в пространстве и во времени, что обуславливает наличие сложного дорогостоящего технологического оборудования. Кроме того, электрошлаковый металл отличается высоким качеством, обусловленным изоляцией металлического расплава слоем жидкого шлака и его рафинирующим воздействием на формирующийся металл в виде капель с высоко развитой поверхностью. Дополнение к электрошлаковому процессу технологий порошковой металлургии по компактированию дисперсных компонентов, в том числе стружечных отходов машиностроения, вводит эту комбинацию в разряд эффективных рециркуляторов промышленных отходов. Не в меньшей степени по эффективности предложенная комбинация является управляющим рычагом качества модифицирования алюминиевых расплавов и его оптимизации через композицию исходных шихтовых материалов.

Методическая парадигма проблемы оптимизации силуминовых опытной лигатурой Al-Ti-B

В настоящей работе исходными материалами для изготовления опытной лигатуры Al-Ti-B служили стружечные отходы литейного сплава марки АК7, технического титана марки ВТ1-00 и аморфный бор марки А. Указанные материалы измельчались до фракции <50 мкм, смешивались и компактировались мундштучным прессованием с получением пруткового изделия диаметром 10 мм и длиной 500 мм. Это изделие служило расходной субстанцией электрошлакового процесса литья прутковой лигатуры диаметром 10 мм. Объектом модифицирования был сплав марки АК7. Эта же марка алюминиевого сплава в виде стружечных отходов, как было выше указано, использовалась в качестве основного компонента шихтовой композиции для формирования расходной субстанции электрошлакового процесса литья прутковой лигатуры и исполняла роль её матрицы. Приготовление расплава, поддержание его температуры и проведение модифицирования указанной марки алюминиевого сплава производили в электропечи сопротивления САТ-0,16 в стальных тиглях. В качестве исходных шихтовых материалов использовали алюминий марки А7 (ГОСТ 11069-2001), сплав АК12пч (ГОСТ 1583-93) и магний МГ95 (ГОСТ 1583-93). Введение модификатора в приготовленный расплав осуществлялось при температуре 720 ± 20 °С. Исследование структуры модифицированного металла проводилось на образцах, вырезанных из слитков круглого поперечного сечения диаметром 150 мм, полученных заливкой расплава в подогретый до 300 °С стальной кокиль. Анализ микроструктуры проводили с использованием микроскопа «NEOPHOT-21», а количественную её оценку с помощью программы для анализа цифровых изображений Axio Vizion (Carl Zeiss) с использованием измерительных модулей Interactive Measurement (Program Wizard).

Объектом исследования как кибернетическая система «черный ящик» [5] в настоящей работе является зерноизмельчающий эффект опытной лигатуры Al-Ti-B, выраженный размером литого зерна модифицируемого сплава АК7. Этот параметр играет роль отклика – количественной величины, характеризующей объект исследования. Задача определения функциональной зависимости отклика от влияющих на него факторов решалась посредством активного эксперимента, отличающегося от пассивного большей скоростью и эффективностью нахождения решения. В качестве варьируемых управляемых факторов выбраны те, которые характеризуют особенности комбинации шихтовых материалов получения опытной лигатуры Al-Ti-B предлагаемым нами способом, и количество вводимой в расплав АК7 этой лигатуры: x_1 – массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов при допустимых пределах варьирования 2-10; x_2 – массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала при допустимых пределах варьирования 0,2-1; x_3 – количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) при допустимых пределах варьирования 0-0,6. Характерно, что первый управляемый фактор одновременно указывает на количество в шихтовой композиции титансодержащего материала при известном количестве борсодержащего.

Английский статистик Рональд Фишер в своей работе [6] доказал целесообразность одновременного варьирования всеми факторами, существенно влияющими на оптимизируемый параметр. Поэтому за основу установления функциональной зависимости между откликом и указанными выше управляемыми факторами (математическая модель) нами было выбрано планирование опытных исследований по плану полного факторного эксперимента [7]. Конкретный план проведенных исследований представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание плана проведенных исследований по установлению функциональной зависимости между откликом кибернетической системы и управляемыми факторами

№ опыта	План								Отклик Y _i
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ *X ₂	X ₁ *X ₃	X ₂ *X ₃	X ₁ *X ₂ *X ₃	
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	Y ₁
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	Y ₂
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	Y ₃
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	Y ₄
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	Y ₅
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	Y ₆
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	Y ₇
8	1	1	1	1	1	1	1	1	Y ₈

План, представленный в таблице 1, является насыщенным ввиду того, что число опытов равно числу определяемых коэффициентов математической модели, отражающей влияние трёх управляемых факторов на размер литого зерна модифицируемого сплава АК7:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,u=1}^3 b_{iu} x_i x_u + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1)$$

Реализация указанного плана позволяет определить оценки всех коэффициентов математической модели (1). Обсуждаемый план (таблица 1) говорит о том, что управляемые факторы варьируются только на двух уровнях – верхнем и нижнем и соответственно обозначены 1 и -1. Следует отметить, что управляемые факторы, представленные в таблице 1, имеют кодированные значения. Методика кодирования приведена в работе [8]. Столбцы x₁, x₂, x₃ задают планирование эксперимента – по ним определяют результаты опыта; столбцы x₀, x₁*x₂, x₁*x₃, x₂*x₃, x₁*x₂*x₃ служат только для расчета. Члены уравнения регрессии (1), содержащие произведения x₁*x₂, x₁*x₃, x₂*x₃, отражают парное взаимодействие факторов, член уравнения регрессии x₁*x₂*x₃ отражает тройное взаимодействие. В таблице 1 добавлен столбец фиктивной переменной x₀, нужный для оценки свободного члена b₀.

В колонке «отклик кибернетической системы» помещается результат наблюдения величины средневзвешенного размера литого зерна модифицируемого сплава АК7 из анализируемой совокупности. Этот параметр носит случайный характер. Поэтому для уменьшения погрешности оценки истинного значения отклика необходимо в каждой точке плана проводить несколько параллельных опытов. По их результатам определяют среднее значение отклика. Такая методика даёт возможность уменьшить погрешность оценки истинного значения отклика в \sqrt{m} раз (m – количество параллельных опытов). В настоящей работе принято m=3. Кроме того, для каждого опыта проделана процедура по выявлению возможных грубых промахов или выскакивающих значений в серии параллельных откликов при одинаковых значениях управляемых факторов. Указанная процедура проводилась нами с использованием широко применяемого для малой выборки метода максимального относительного отклонения [9]. Максимальное относительное отклонение $\tau_{\text{макс}}$ – это относительное отличие проверяемого (крайнего) результата $y_{\text{кр}}$ от среднего арифметического $y_{\text{ср}}$, выраженное в долях среднеквадратичной ошибки Sm и вычисляемое по следующей формуле:

$$\tau_{\text{макс}} = \left| \frac{1}{\sqrt{(m-1)/m}} \frac{y_{\text{ср.}} - y_{\text{кр.}}}{S_m} \right| \leq \tau_{\text{табл.}} \quad (2)$$

Формула (2) указывает на то, что вычисленное значение максимального относительного отклонения необходимо сравнить с табличным на предмет, является ли проверяемый отклик входящим в данную числовую совокупность. Положительный ответ будет в случае соблюдения неравенства. Значение эталонного (табличного) показателя в условиях настоящего исследования $\tau_{\text{табл.}}=1,41$ [10]. Оно применимо для объема выборки $m=3$ и риска ошибиться, равного 5 %.

С целью оценки качества проведенного в данной работе исследования проверялась однородность дисперсий, имевших место в 8 сериях опытов. Поскольку каждая серия насчитывала одинаковое количество параллельных опытов ($m=3$), указанная проверка однородности производилась по критерию Кохрена [11]. Данный критерий означает долю максимальной дисперсии в сумме всех имеющихся, то есть вычисляется по формуле:

$$G = (S_y^2)_{\max} / \sum S_y^2 \leq G_{\text{крит.}} \quad (3)$$

Формула (3) одновременно даёт основание судить о равноточности 8 серий опытов. Критическое значение критерия Кохрена ($G_{\text{крит.}}$) определяется в зависимости от числа степеней свободы каждой дисперсии (в настоящем исследовании оно равно $m-1=2$), числа серий опытов (8) и уровня значимости ($\alpha=0,05$). Расчётное значение критерия Кохрена (G) сравнивалось с критическим $G_{\text{крит.}}=0,5157$.

Определение коэффициентов уравнения регрессии (1) основано на методе наименьших квадратов, и являются они результатом скалярного произведения столбца y_i на соответствующий столбец плана (таблица 1) с соотношением к числу опытов в матрице планирования $N=8$. В соответствии с этим вычисления коэффициентов уравнения регрессии (1) осуществляются по следующим формулам:

$$b_{j(0,1,2,3)} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_{ji} y_i, \quad b_{12} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_1 x_2)_i y_i, \quad b_{13} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_1 x_3)_i y_i, \quad b_{23} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_2 x_3)_i y_i, \\ b_{123} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_1 x_2 x_3)_i y_i. \quad (4)$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии производилась путём их сопоставления с границей (ε) доверительного интервала. Критерием значимости является превышение абсолютной величины коэффициента этой границы. Чем больше это превышение, тем более значим коэффициент уравнения регрессии. Это обстоятельство приобретает важное значение при анализе коэффициентов уравнения регрессии на предмет их вклада в величину отклика кибернетической системы. Характерной особенностью её является то, что коэффициенты регрессии не коррелированы между собой, так как матрица полного факторного эксперимента является диагональной. Вследствие этого диагональные элементы ковариационной матрицы равны между собой, и поэтому все коэффициенты уравнения регрессии определяются с одинаковой точностью, характеризуемой стандартным отклонением S_{b_i} . Кроме того, если какие-либо коэффициенты уравнения регрессии окажутся незначимыми, то их исключение из уравнения (1) не скажется на остальных коэффициентах.

Граница доверительного интервала определялась по следующей формуле:

$$\varepsilon = t^* S_{b_i}, \quad (5)$$

в которой t^* – табличное значение критерия Стьюдента, выбранного для уровня доверия 95 % и числа степеней свободы $N(m-1)=16$, $t^*=2,12$. Стандартное отклонение для коэффициентов уравнения регрессии (1) S_{b_i} определялось извлечением корня квадратного из дисперсии для них, которая вычислялась по следующей формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\text{воспр.}}^2}{Nm}, \quad (6)$$

где $S_{\text{воспр.}}^2$ – дисперсия воспроизводимости. Данная величина определялась на основании проведенных экспериментов 8 серий опытов, каждая из которых повторялась трижды. Дисперсия воспроизводимости в этом случае – это среднеарифметическое значение из 8 однородных построчных дисперсий.

После вышеуказанных действий формируется в окончательном виде математическая модель отклика кибернетической системы. Однако, чтобы ею пользоваться, необходимо исследовать обсуждаемую математическую модель на адекватность полученным экспериментальным данным. С этой целью определялась дисперсия адекватности [12] при условии равенства повторений опытов в каждой серии:

$$S_{ад.}^2 = \frac{m}{N-d} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (7)$$

которая характеризует расхождение между значениями, полученными по уравнению регрессии (\hat{y}_i), и результатами эксперимента (y_i). В формуле (7) d – число коэффициентов проверяемого уравнения регрессии. Далее полученное значение дисперсии адекватности сравнивается с дисперсией воспроизводимости. Если первая дисперсия меньше второй, то однозначно делается вывод об адекватности полученной математической модели. В противном случае их отношение больше 1. В этом случае для разрешения проблемы адекватности прибегают к критерию Фишера [13], который регламентирует указанное отношение на предмет адекватности полученной математической модели.

Результаты экспериментального исследования и их анализ

Результаты по исследованию размера литого зерна сплава АК7, модифицированного опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B согласно плану таблицы 1, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Размер литого зерна сплава АК7 (мкм модифицированного опытной лигатурой Al-Ti-B

№ серии	№ параллельного опыта			Среднее значение размера зерна, мкм
	1	2	3	
1	802	828	842	824
2	942	1020	1085	1016
3	515	547	646	569
4	763	769	799	777
5	485	481	505	490
6	701	663	721	695
7	214	229	300	248
8	434	462	448	448

В таблице 2 помимо экспериментальных данных имеются и расчётные – среднее значение размера зерна (правый столбец) – отклик кибернетической системы. Учитывая важность этого параметра, необходимо убедиться в отсутствии грубых промахов или выскакивающих значений в каждой серии параллельных откликов. С этой целью были вычислены максимальные относительные отклонения τ_{\max} . в 8 сериях плана исследования. Кроме того, необходимо оценить качество проведенных опытов, на основе которых будет построена математическая модель. О надлежащем качестве можно судить, если все 8 серий опытов проведены с равной точностью, о чём свидетельствует критерий Кохрена. В таблице 3 приведены результаты расчётов построчных значений стандартных отклонений, дисперсий, максимальных относительных отклонений (2).

Таблица 3 – Статистические характеристики параллельных опытов серий экспериментов

№ серии	Стандартное отклонение	Дисперсия	Максимальные относительные отклонения τ_{\max} .
1	20,3	412	1,33
2	72,0	5187	1,26
3	68,0	4630	1,37
4	19,3	373	1,40
5	12,9	165	1,40

6	29,2	854	1,34
7	45,8	2100	1,40
8	13,9	194	1,22

Данные таблицы 3 дают основания считать, что в планируемом эксперименте получены результаты, которые являются приемлемыми для построения математической модели. Все 8 серий параллельных опытов проведены так, что выскакивающих значений не обнаружено. Рассчитанные величины максимальных относительных отклонений не превышают эталонного (табличного) показателя, равного $\tau_{\text{табл.}}=1,41$. Построчные дисперсии однородны в силу того, что расчётное значение критерия Кохрена не превышает критического значения $G = \frac{5187}{412+5187+4630+373+165+854+2100+194} = 0,3728 < G_{\text{крит.}} = 0,5157$.

После установления репрезентативности данных таблицы 2 рассчитаем значения коэффициентов уравнения регрессии (1) по формулам (4):

$$b_0 = \frac{1}{8}(824+1016+569+777+490+695+248+448)=633,4$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(-824+1016-569+777-490+695-248+448)=100,6$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(-824-1016+569+777-490-695+248+448)=-122,9$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(-824-1016-569-777+490+695+248+448)=-163,1$$

$$b_{12} = \frac{1}{8}(824-1016-569+777+490-695-248+448)=1,4$$

$$b_{13} = \frac{1}{8}(824-1016+569-777-490+695-248+448)=0,6$$

$$b_{23} = \frac{1}{8}(824+1016-569-777-490-695+248+448)=0,6$$

$$b_{123} = \frac{1}{8}(-824+1016+569-777+490-695-248+448)=-2,6.$$

Произведенные расчёты показывают, что коэффициенты уравнения регрессии значительно отличаются не только по знаку, но и по абсолютной величине в ряде случаев на 3 порядка. Это обстоятельство обуславливает провести анализ коэффициентов на их значимость, чтобы сформировать уравнение отклика кибернетической системы для последующей её оптимизации. Сначала рассчитаем дисперсию воспроизводимости, которая необходима не только для анализа коэффициентов уравнения регрессии на значимость, но и для анализа на адекватность полученного уравнения отклика кибернетической системы:

$$S_{\text{воспр.}}^2 = \frac{1}{8}(412 + 5187 + 4630 + 373 + 165 + 854 + 2100 + 194) = 1739.$$

Далее определяем дисперсию коэффициентов уравнения регрессии по формуле (6):

$$S_{bi}^2 = \frac{1739}{8*3} = 72,$$

стандартное отклонение для них (ошибка):

$$S_{bi} = \sqrt{72} = 8,5$$

и границу доверительного интервала по формуле (5):

$$\varepsilon = 2,12 * 8,5 = 18,0.$$

Сравнение коэффициентов уравнения регрессии (1) с границей доверительного интервала показывает, что значимыми являются b_0, b_1, b_2, b_3 . Остальные коэффициенты незначимы для доверительной вероятности 95 %, и их можно не учитывать.

Проведенный выше анализ привёл к тому, что в окончательном виде математическая модель отклика кибернетической системы является линейной функцией исследуемых трёх переменных параметров. Перед тем, как делать определённые выводы по влиянию входных факторов на размер зерна модифицируемого лигатурой Al-Ti-B сплава АК7, необходимо

убедиться в адекватности полученной линейной модели экспериментальным данным. Для этого определим дисперсию адекватности по формуле (7):

$$S_{\text{ад.}}^2 = \frac{3}{8-4} [(819-824)^2 + (1020-1016)^2 + (573-569)^2 + (774-777)^2 + (493-490)^2 + (694-695)^2 + (247-248)^2 + (448-448)^2] = 57$$

и сравним её с дисперсией воспроизводимости. Первая дисперсия оказалась значительно меньше второй, что позволяет утверждать об адекватности полученной линейной модели. Данная модель является результатом обработки экспериментальных опытов, проведенных на верхних и нижних уровнях управляемых факторов. Для полной убежденности в возможности использования полученной линейной модели были проведены дополнительные 4 эксперимента, в которых управляемые факторы имели значения, соответствующие нулевому (основному) уровню. Среднее значение отклика кибернетической системы составило:

$$y_0 = \frac{579+663+603+581}{4} = 606,5.$$

Линейная модель при нулевых уровнях управляемых факторов прогнозирует $\hat{y} = b_0 = 633,4$. Имеющаяся разность $633,4 - 606,5 = 26,9$ между прогнозом и экспериментом на нулевом уровне относительно невелика и составляет 4,2 %, что позволяет утвердиться в справедливости гипотезы о возможности использования полученной линейной модели. Об этом же говорит также тот факт, что дисперсия опытов на нулевом уровне управляемых факторов ($S_0^2 = 1537$) больше дисперсии адекватности.

Полученная адекватная линейная модель, описывающая влияние управляемых факторов: x_1 – массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов, x_2 – массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала, x_3 – количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) на величину средневзвешенного размера литого зерна, модифицируемого опытной лигатурой Al-Ti-B сплава АК7, позволяет с достаточной степенью достоверности (95 %) утверждать, что факторы x_2 и x_3 являются зерноизмельчающими, а фактор x_1 наоборот – зерноукрупняющим. Зерноизмельчающий эффект от воздействия факторов x_2 и x_3 очевидно связан с увеличением в модифицируемом сплаве АК7 количества зародышеобразующих частиц. Зерноукрупняющий эффект от воздействия фактора x_1 объясняется тем, что в зародышеобразующей субстанции опытной лигатуры объёмная доля мелких интерметаллидных частиц TiB_2 снижается с одновременным возрастанием объёмной доли крупных интерметаллидных частиц Al_3Ti . Это обстоятельство обуславливает уменьшение количества зародышеобразующих частиц в модифицируемом расплаве.

В адекватной линейной модели коэффициенты при факторах x_1 , x_2 , x_3 имеют одинаковый порядок абсолютной величины, что говорит о примерно равном влиянии рассматриваемых факторов на размер зерна модифицируемого сплава. Однако некоторая разница в коэффициентах присутствует. В этой связи можно отметить следующее ранжирование управляемых факторов по влиянию на отклик кибернетической системы по убывающей последовательности x_3 , x_2 , x_1 .

Обсуждаемая адекватная линейная модель может исполнять роль целевой функции, исследуя которую можно решить оптимизационную задачу по определению значений управляемых факторов, обуславливающих минимально возможный размер зерна модифицируемого сплава. Поскольку модель линейная, в настоящей работе использовалась методика линейного программирования для решения указанной задачи [14]. Произведенное исследование показало, что область поверхности отклика кибернетической системы, соответствующей минимальным размерам зерна модифицируемого сплава АК7, находится при кодированных значениях управляемых факторов вблизи вершины куба с координатами x_1 , x_2 , x_3 соответственно -1, +1, +1. Указанные значения управляемых факторов гарантируют модифицирующий эффект для сплава АК7 под воздействием опытной лигатуры Al-Ti-B с получением мелкого литого зерна размером на уровне 250 мкм.

Заключение

В настоящей работе исследован и оптимизирован процесс модифицирования сплава АК7 опытной лигатурой на основе системы Al-Ti-B, изготовленной из стружечных отходов машиностроения с использованием комбинации процессов порошковой металлургии и электрошлакового литья. Получена адекватная линейная модель на основе проведенного исследования по плану полного факторного эксперимента 2^3 , в котором управляемыми факторами являлись: массовое соотношение в шихтовой композиции титан- и борсодержащих материалов (стружечные отходы технического титана марки ВТ1-00 и аморфный бор марки А) при допустимых пределах варьирования 2–10; массовая доля (%) в шихтовой композиции борсодержащего материала при допустимых пределах варьирования 0,2–1; количество вводимой в расплав лигатуры (кг/т расплава) при допустимых пределах варьирования 0–0,6. Роль растворителя в шихтовой композиции исполнял стружечный отход литейного сплава марки АК7. Откликом кибернетической системы являлся размер литого зерна модифицируемого сплава АК7. Установлен зерноизмельчающий эффект у второго и третьего управляемого фактора и зерноукрупняющий у первого. Сила влияния на эффект модифицирования у трёх управляемых факторов имеет один порядок. Однако некоторое различие имеет место и выражено по возрастанию влияния иерархической последовательностью, отмеченной выше. Минимально возможный размер литого зерна модифицированного сплава АК7 гарантирован с 95 % вероятностью на уровне 250 мкм при комбинации кодированных управляемых факторов -1, +1, +1.

Литература

1. Бакулин, Д. В. Влияние модифицирующей лигатуры Al-Ti-B на алюминиевые сплавы / Д. В. Бакулин. – Текст : непосредственный // Евразийский научный журнал. – 2020. – № 5.
2. Александров, В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебное пособие : в 2 частях. Часть 1. Материаловедение. Стандарт третьего поколения / В. М. Александров. – Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет, 2015. – 327 с. – Текст : непосредственный.
3. Гончаренко, Е. С. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М. Б. Альтмана) / Е. С. Гончаренко, А. В. Трапезников, Д. В. Огородов. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ. – 2014. – № 4. – С. 2.
4. Попов, Д. А. Альтернативные источники борсодержащего сырья для производства лигатуры Al-B (обзор) / Д. А. Попов, Д. В. Огородов, А. В. Трапезников. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ. – 2015. – № 10. – С. 41–47.
5. Поваров, Г. Н. Норберт Винер и его «Кибернетика» : (от редактора перевода) / Г. Н. Поваров. – Текст : непосредственный // Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. – 2-е издание. – Москва : Наука, 1983. – С. 5–28.
6. Vox, G. Problems in the analysis of growth / G. Vox – New-York, 1936. – 376 p.
7. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям 35.03.02 и 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», профиль «Технология деревообработки» / А. Н. Чубинский, Д. С. Русаков, И. М. Батырева, Г. С. Варанкина. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2018. – 109 с. – Текст : непосредственный.
8. Макаричев, Ю. А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учебное пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2016. – 131 с. – Текст : непосредственный.
9. Третьяк, Л. Н. Основы теории и практики обработки экспериментальных данных : учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / Л. Н. Третьяк, А. Л. Воробьев ; под об-

щей редакцией Л. Н. Третьяк. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Юрайт, 2017. – 217 с. – Текст : непосредственный.

10. Бараз, В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных : учебное пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 181 с. – Текст : непосредственный.

11. Бондарчук, С. С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel : учебное пособие / С. С. Бондарчук, И. С. Бондарчук. – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета, 2018. – 433 с. – Текст : непосредственный.

12. Ерещенко, Т. В. Планирование эксперимента : учебно-практическое пособие / Т. В. Ерещенко, Н. А. Михайлова. – Волгоград : Волг. ГАСУ, 2014. – URL: https://vgasu.ru/attachments/oi_ereschenko-01.pdf (дата обращения: 15.01.2022). – Текст : электронный.

13. Ермолаев-Томин, О. Ю. Математические методы в психологии : учебник для академического бакалавриата / О. Ю. Ермолаев-Томин. – 5-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Юрайт, 2017. – 511 с. – Текст : непосредственный.

14. Анисимова, Н. П. Линейное программирование : учебно-методическое пособие / Н. П. Анисимова, Е. А. Ванина. – Санкт-Петербург : НИУ ВШЭ, 2012. – 70 с. – Текст : непосредственный.