

НАСЛЕДСТВЕННОЕ ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОТХОДОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМ Al–Si–Mg И Al–Mg

© 2022 г. **К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин, Р.М. Биктимиров, А.П. Новиков**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 18.02.22 г., доработана 07.03.22 г., подписана в печать 10.03.22 г.

Аннотация: Представлены результаты исследований по влиянию состава шихты на структуру и механические свойства литейных алюминиевых сплавов систем Al–Si–Mg (AK9ч) и Al–Mg (AMг6л). Показано, что вовлечение в состав шихты деформированных отходов (электротехнических отходов алюминия и баночных отходов на основе сплава 3104 – для АК9ч; пластин сплава AMг6 – для AMг6л) способствует формированию дисперсной микро- и макроструктуры рабочих сплавов в твердом состоянии. Исследовано влияние модифицирования (лигатура AlSr20 – для АК9ч; лигатура AlTi5 – для AMг6л) на структуру и механические свойства сплавов, полученных по различным вариантам шихты. Эксперименты по влиянию состава шихты на модифицируемость сплавов АК9ч и AMг6л выявили, что структура деформированных отходов частично наследуется рабочими сплавами через жидкое состояние. При близких химических составах меньшими размерами микро- и макроструктуры и повышенными механическими свойствами (предел прочности и относительное удлинение при растяжении) характеризуются сплавы, полученные с использованием повышенной доли деформированных отходов в составе шихты. Установлено, что в таких сплавах превышение определенного количества элемента-модификатора (0,06 % Sr – для сплава АК9ч; 0,04 % Ti – для сплава AMг6л) обуславливает проявление эффекта перемодифицирования. Это выражается в укрупнении параметров микро- и макроструктуры, а также снижении предела прочности при растяжении. Полученные результаты показывают, что оптимальное количество доли деформированных отходов в составе шихты позволит на практике сократить расход дорогостоящих модифицирующих лигатур с обеспечением гарантированного эффекта от модифицирования.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, деформированные отходы, модифицирование, структура, механические свойства, явление структурной наследственности.

Никитин К.В. – докт. техн. наук, проф., декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Никитин В.И. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Тимошкин И.Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Биктимиров Р.М. – инженер, ассистент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: r.biktimirov1995@gmail.com.

Новиков А.П. – магистрант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Для цитирования: Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Биктимиров Р.М., Новиков А.П. Наследственное влияние деформированных отходов на эффективность модифицирования сплавов систем Al–Si–Mg и Al–Mg. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2022. Т. 28. No. 3. С. 38–46. DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2022-3-38-46.

Hereditary influence of deformed waste on the efficiency of Al–Si–Mg and Al–Mg alloy modification

K.V. Nikitin, V.I. Nikitin, I.Yu. Timoshkin, R.M. Biktimirov, A.P. Novikov

Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russia

Received 18.02.2022, revised 07.03.2022, accepted for publication 10.03.2022

Abstract: The paper provides the results of studies into the effect of the charge composition on the structure and mechanical properties of Al–Si–Mg (AK9ch) and Al–Mg (AMg6l) cast aluminum alloys. It was shown that deformed waste included in the charge composition (electrical waste of aluminum and waste of beverage cans based on the 3104 alloy – for AK9ch; AMg6 alloy plates – for AMg6l) contributes to the formation of dispersed micro- and macrostructure of working alloys in the solid state. The effect of modification (AlSr20 master alloy – for

AK9ch; AlTi5 master alloy – for AMg6l) on the structure and mechanical properties of alloys obtained with various charge options was studied. Experiments on the effect of the charge composition on the AK9ch and AMg6l modifiability showed that the deformed waste structure is partially inherited by working alloys through the liquid state. With similar chemical compositions, alloys obtained with an increased proportion of deformed waste in the charge composition feature by smaller micro- and macrostructure sizes and improved mechanical properties (tensile strength and tensile elongation). It was found that when a certain amount of the modifier element (0.06 % Sr for the AK9ch alloy; 0.04 % Ti for the AMg6l alloy) is exceeded in these alloys, the over-modification effect appears. This is expressed in enlarged micro- and macrostructure parameters, as well as lowered tensile strength. The results obtained show that the optimal amount of the deformed waste proportion in the charge composition will make it possible to reduce the consumption of expensive modifying master alloys with a guaranteed effect of modification in practice.

Keywords: aluminum alloys, deformed waste, modification, structure, mechanical properties, structural heredity phenomenon.

Nikitin K.V. – Dr. Sci. (Eng.), prof., dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport of Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Nikitin V.I. – Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Timoshkin I.Yu. – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Biktimirov R.M. – engineer, assistant, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: r.biktimirov1995@gmail.com.

Novikov A.P. – master student, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

For citation: Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Biktimirov R.M., Novikov A.P. Hereditary influence of deformed waste on the efficiency of Al–Si–Mg and Al–Mg alloy modification. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 38–46 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2022-3-38-46.

Введение

Наряду с рафинированием и дегазацией модифицирование структуры является основным технологическим приемом, направленным на обеспечение гарантированного уровня механических и эксплуатационных свойств литых изделий из сплавов на основе алюминия [1–8].

Все способы модифицирования можно разделить на три большие группы: химическое модифицирование (введение в расплавы химических элементов-модификаторов в составе флюсов (солевых композиций) или лигатур); физическое (воздействие на расплавы высокотемпературным перегревом, ультразвуком, магнитными полями, вибрацией и т.д.); комплексное (сочетание химических добавок и физических воздействий). В силу ряда причин наибольшее распространение получило химическое модифицирование.

Широкое распространение для производства литых алюминиевых изделий получили сплавы системы Al–Si. В мировой практике для модифицирования доэвтектических силуминов используются лигатуры систем Al–Ti, Al–Ti–B, Al–Zr и др. [3, 4, 9–11]. Известно, что модифицирующий эффект титана возрастает в присутствии бора [11, 12]. Элементы-модификаторы (Zr, Ti, B), в первую очередь, оказывают модифицирующее воздействие на дендриты α -Al по зародышеобразующему механизму. Измельчение кристаллов эвтектиче-

ского кремния в доэвтектических и эвтектических силуминах эффективно осуществляется в случае применения лигатуры Al–Sr [13–15].

В качестве модификаторов для сплавов системы Al–Mg тоже широко используются зародышеобразующие элементы-модификаторы (Zr, Ti, Sc), которые вводятся в расплавы в составе лигатур [16–19]. Модифицирование структуры сплавов Al–Mg небольшими добавками скандия и/или циркония обеспечивает не только измельчение структуры и повышение механических свойств, но и улучшение деформационной обработки, а также обработки резанием [20].

Однако единое мнение о механизмах модифицирования алюминиевых сплавов элементами-модификаторами у исследователей до сих пор отсутствует [21, 22].

В реальных производственных условиях для получения фасонных отливок применяются различные шихтовые материалы: чушковые сплавы, лигатуры, возврат собственного производства, переплавы технологических остатков, различные виды отходов и т.д. Каждый элемент шихты содержит в себе определенную структурную информацию, которая оказывает наследственное влияние на качество рабочих сплавов и литых изделий из них. Такое многообразие структурной информации в многофакторной системе «шихта–расплав–литое

изделие» затрудняет понимание механизмов модифицирования и управление ими [23, 24].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния деформированных отходов в составе шихты на эффективность модифицирования сплавов систем Al–Si–Mg и Al–Mg добавками микрораскислительных лигатур AlSr10 и AlTi5.

Материалы и методика экспериментов

Эксперименты проводили на литейных сплавах АК9ч (система Al–Si–Mg) и АМгбл (система Al–Mg), химические составы которых даны в табл. 1, 2. В табл. 3, 4 представлены шихтовые материалы,

Таблица 1. Химический состав сплава АК9ч (ГОСТ 1583-93)

Table 1. АК9ch alloy chemical composition (GOST 1583-93)

Основные легирующие элементы, %			Примеси, %, не более				
Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti + Zr
8,0–10,5	0,20–0,35	0,2–0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,12

Таблица 2. Химический состав сплава АМгбл (ГОСТ 1583-93)

Table 2. АМг6l alloy chemical composition (GOST 1583-93)

Основные легирующие элементы, %				Примеси, %, не более				
Mg	Zr	Be	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Si
6,0–7,0	0,05–0,20	0,02–0,10	0,05–0,15	0,02	0,1	0,15	0,10	0,20

Таблица 3. Шихтовые материалы для приготовления сплава АК9ч (система Al–Si–Mg)

Table 3. Charge materials for АК9ch alloy preparation (Al–Si–Mg system)

№ п/п	Наименование	ГОСТ	Вид, характеристика
Вариант КI			
1	Алюминий первичный марки А5	11069-2001	Первичный чушковый алюминий
2	Лигатура AlSi20	53777-2010	Чушковая лигатура
3	Магний чушковый Mg90	804-93	Первичный чушковый магний
4	Лигатура AlMn10	53777-2010	Чушковая лигатура
5	Отходы сплава АК9ч	54564-2011	Литые отходы, образующиеся при литье в кокиль, в виде прибылей
6	Лигатура AlSr10	53777-2010	Микрораскислительная лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
Вариант КII			
7	Алюминий электротехнический марки А5Е		Электротехнические отходы в виде проволоки Ø 3–5 мм
8	Магний чушковый Mg90	804-93	Первичный чушковый магний
9	Лигатура AlSi20	53777-2010	Чушковая лигатура
10	Отходы сплава 3104 (Al–Mn–Mg)	54564-2011	Баночные отходы
11	Лигатура AlSr10	53777-2010	Микрораскислительная лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе

Таблица 4. Шихтовые материалы для приготовления сплава АМг6л (система Al–Mg)

Table 4. Charge materials for АМг6l alloy preparation (Al–Mg system)

№ п/п	Наименование	ГОСТ	Вид, характеристика
Вариант МI			
1	Алюминий первичный марки А85	11069-2001	Первичный чушковый алюминий
2	Магний чушковый марки Мг95	804-93	Первичный чушковый магний
3	Отходы сплава АМг6л	54564-2011	Литые отходы, образующиеся при литье в песчано-глинистые формы, в виде прибылей
4	Лигатура AlTi5	53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
5	Лигатура AlBe3	53777-2010	Чушковая лигатура
Вариант МII			
6	Алюминий первичный марки А85	11069-2001	Первичный чушковый алюминий
7	Магний чушковый марки Мг95	804-93	Первичный чушковый магний
8	Отходы сплава АМг6	54564-2011	Деформированные отходы в виде пластин толщиной 2 мм
9	Лигатура AlTi5	53777-2010	Микрокристаллическая лигатура для модифицирования структуры, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе
10	Лигатура AlBe3	53777-2010	Чушковая лигатура

использованные для приготовления сплавов АК9ч и АМг6л.

Составы шихт по вариантам КI (АК9ч) и МI (АМг6л) включали в себя, в основном, чушковые шихтовые материалы и литой возврат собственного производства в виде прибыльных частей литниково-питающих систем. В составы шихт по вариантам КII (АК9ч) и МII (АМг6л) были введены деформированные отходы (Д-шихта).

Применяемые отходы перед загрузкой в плавильную печь предварительно очищали и обезжиривали. Баночные отходы после очистки подвергали прессованию в брикеты. Сплавы готовили в индукционной тигельной печи марки УИП-001 (РЭЛТЭК, РФ) в графитовом тигле емкостью 10 кг по Al. Модифицирование лигатурами (AlSr20 — для АК9ч, AlTi5 — для АМг6) не осуществляли. Перед разливкой при температуре 750 ± 5 °C расплав АК9ч рафинировали флюсовой комплексной композицией «Эвтектика» (ТУ-ВУ 100196035.018-2010), расплав АМг6 — карналлитовым флюсом (ТУ 1714-470-05785388-2011). После выдержки в течение 20 мин с зеркала расплава снимали шлак, пе-

ремешивали и производили разливку в чугунные изложницы. Далее полученные шихтовые заготовки переплавляли отдельно в тигельных печах сопротивления GRAFICARBO GF.1100 (компания GRAFICARBO, Италия) в графитовых тиглях емкостью 1 кг по Al. Модифицирование расплавов лигатурами производили при $t = 720-730$ °C и после выдержки в течение 15 мин осуществляли заливку в кокиль, получая опытные отливки типа «Пластина» толщиной 15 мм. Лигатуру AlSr20 вводили в сплав АК9ч из расчета 0,04; 0,06; 0,08 мас.% по стронцию; лигатуру AlTi5 в сплав АМг6л — из расчета 0,02; 0,04; 0,06 мас.% по титану.

Химический состав сплавов определяли спектральным методом на спектроанализаторе ARL 3460 (компания «Thermo Fisher Scientific (Eucubens) SARL», Швейцария). Механические испытания (σ_B — предел прочности при растяжении и δ — относительное удлинение) выполняли на вырезанных образцах в литом состоянии (ГОСТ 1497-84; тип 3 номер 8; тип 5 номер 5) на разрывной машине «Testometric» модели FS150kN-AX (Testometric Company Ltd., Великобритания). Метал-

Таблица 5. Химический состав опытных сплавов АК9ч

Table 5. Chemical composition of experimental AK9ch alloys

Вариант состава шихты	Основные легирующие элементы, %			Примеси, %				
	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti
КI	9,5	0,27	0,3	0,25	0,03	0,03	0,01	0,05
КII	9,43	0,26	0,3	0,26	0,15	0,03	0,01	0,05

Таблица 6. Химический состав опытных сплавов АМг6л

Table 6. Chemical composition of experimental АМг6l alloy

Вариант состава шихты	Основные легирующие элементы, %				Примеси, %, не более				
	Mg	Zr	Be	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Si
MI	6,45	0,08	0,070	0,08	0,018	0,020	0,060	0,030	0,020
MII	6,51	0,07	0,071	0,08	0,019	0,017	0,061	0,028	0,015

лографический анализ выполняли с помощью программно-аппаратного комплекса SIAMS-800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург).

В табл. 5, 6 приведены химические составы опытных сплавов, полученных по различным вариантам шихтовых составов (см. табл. 3 и 4 соответственно) до введения модифицирующих лигатур.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Модифицирование сплава АК9ч

На рис. 1 представлены микроструктуры опытного сплава в зависимости от варианта шихты до

модифицирования лигатурой AlSr20. Видно, что приготовление сплава по варианту шихты КII (рис. 1, б) способствует формированию более измельченных фазовых составляющих по сравнению с вариантом КI (рис. 1, а).

Сохранение структурной информации от Д-шихты и ее трансляция через жидкое состояние подтверждаются сравнительным анализом микроструктуры сплавов, полученных по вариантам шихты КI и КII (рис. 2). При одинаковом количестве введенного стронция сплав, приготовленный по варианту КI, характеризуется укрупненными размерами дендритов α -Al и кристаллов эвтектического кремния (Si_3) по срав-

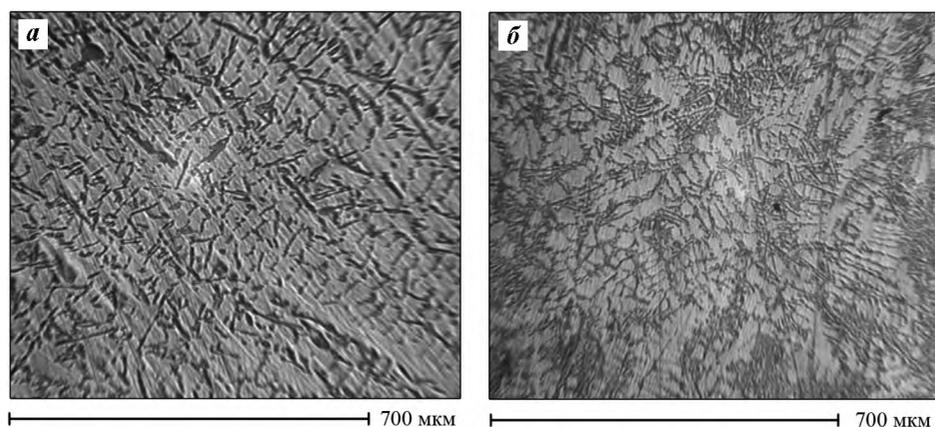


Рис. 1. Микроструктура опытного сплава АК9ч до модифицирования
а, б – составы шихт КI и КII соответственно

Fig. 1. Microstructure of experimental AK9ch alloy before modification
а, б – compositions of KI and KII charges, respectively

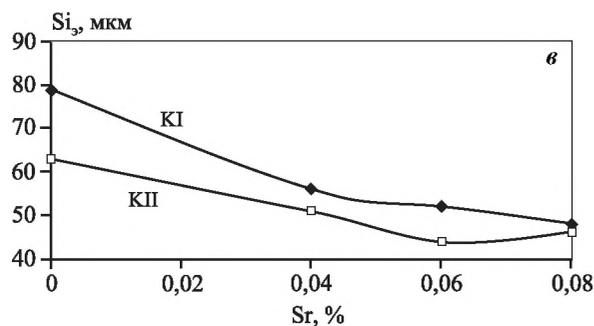
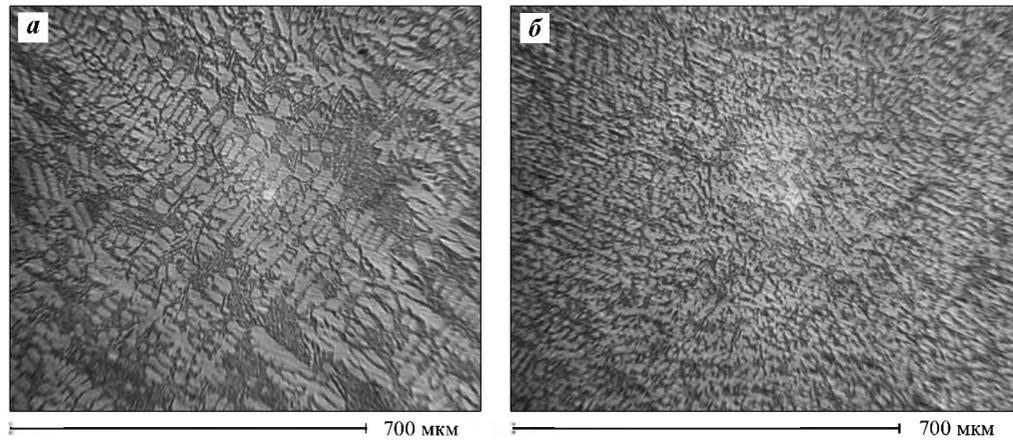


Рис. 2. Влияние состава шихты на структуру и размеры эвтектического кремния (Si_3) сплава АК9ч

a, б – микроструктура сплавов, полученных, соответственно, по вариантам КИ и КИИ при введении 0,06 % Sr

в – влияние количества вводимого Sr на размеры Si_3

Fig. 2. Effect of charge composition on the structure and size of eutectic silicon (Si_3) of АК9ch alloy

a, б – microstructure of alloys obtained according to KI and KII options, respectively, with 0.06 % Sr added

в – effect of Sr quantity added on Si_3 size

нению со сплавом, приготовленным по варианту КИИ.

На рис. 3 показано влияние состава шихты и модифицирования на механические свойства сплава АК9ч. Анализ результатов, представленных на рис. 3, свидетельствует, что состав шихты оказывает наследственное влияние на склонность сплава к модифицированию. Модифицирование стронцием способствует росту механических свойств сплава. Однако при одинаковых химических составах сплав, полученный из шихтовых материалов по варианту КИ, характеризуется пониженными пределом прочности (рис. 3, *a*) и относительным удлинением (рис. 3, *б*) по сравнению со сплавом, полученным по варианту КИИ, во всем исследованном диапазоне вводимого Sr. Кроме того, предел прочности (рис. 3, *a*) сплава, полученного из шихты по варианту КИИ, достигает максимума при количестве стронция 0,06 %, а затем снижается. Установленный эффект можно объяснить перемодифицированием сплава, приготовленного с использованием в составе Д-шихты деформированных отходов электротехнического алюминия и банок.

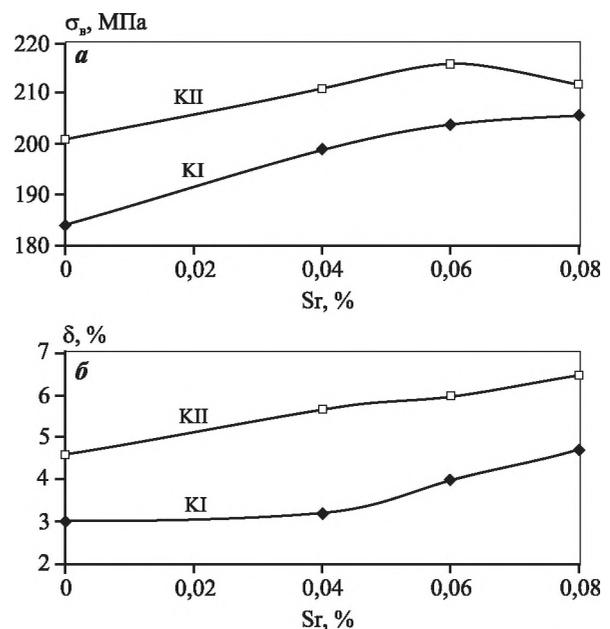


Рис. 3. Влияние состава шихты на механические свойства сплава АК9ч при модифицировании

a, б – соответственно предел прочности при растяжении и относительное удлинение

Fig. 3. Effect of charge composition on АК9ch alloy mechanical properties at modification

a, б – tensile strength and tensile elongation, respectively

Модифицирование сплава АМгбл

Замена в составе шихты крупнокристаллических литых отходов в виде прибылей (вариант шихты МI) на деформированные отходы (вариант шихты МII) способствовала измельчению макрозерна сплава АМгбл до модифицирования (рис. 4). Прибыли, обеспечивающие питание отливки в форме, затвердевают в последнюю очередь, что обуславливает формирование в них крупнокристаллической структуры и повышенной газоусадочной пористости. Такая отрицательная структурная информация наследуется и транслируется через жидкое состояние в рабочий сплав. Д-шихта, как и в экспериментах со сплавом АК9ч, оказывает положительное наследственное влияние на структуру рабочего сплава.

Сохранение структурной информации от Д-шихты и ее трансляция через жидкое состояние подтверждаются сравнительным анализом макроструктуры сплавов, полученных по вариантам МI и МII (рис. 5). Сплав, полученный по варианту МII, характеризуется меньшими размерами макрозерен (R) во всем исследованном интервале вводимого титана.

На рис. 6 показано влияние состава шихты и модифицирования на механические свойства сплава АМгбл. Модифицирование титаном обеспечивает рост механических свойств сплава. Однако при одинаковых химических составах сплав, полученный из шихтовых материалов по варианту МI, характеризуется пониженным пределом прочности (рис. 6, а) и относительным удлинением (рис. 6, б) по сравнению со сплавом, полученным по вариан-

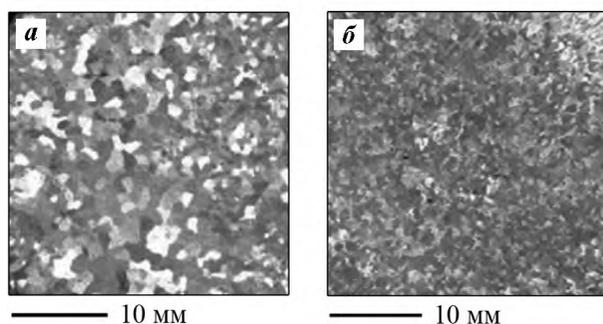


Рис. 4. Макроструктура опытного сплава АМгбл до модифицирования

а, б – соответственно составы шихты МI и МII

Fig. 4. Macrostructure of experimental AMg61 alloy before modification

а, б – MI and MII charge compositions, respectively

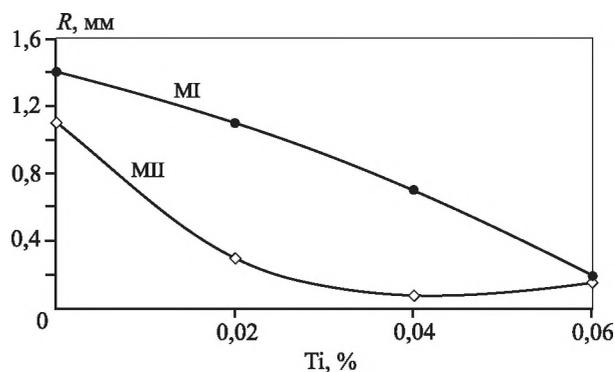
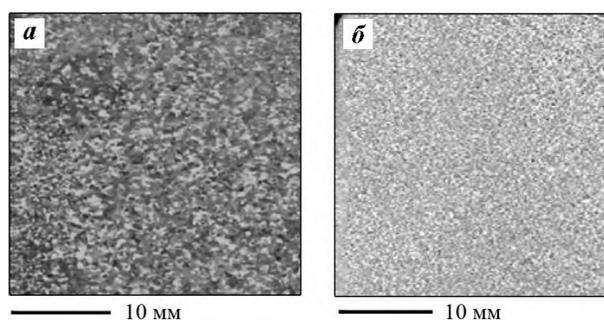


Рис. 5. Влияние состава шихты на размеры макрозерна сплава АМгбл

а, б – макроструктура сплавов, полученных, соответственно, по вариантам МI и МII при введении 0,04 % Ti
в – влияние вводимого количества Ti на размеры макрозерна

Fig. 5. Effect of charge composition on AMg61 alloy macrograin size

а, б – macrostructure of alloys obtained according to MI and MII options, respectively, with 0.04 % Ti added
в – effect of Ti quantity added on macrograin size

ту МII, во всем исследованном диапазоне вводимого Ti. Кроме того, предел прочности и относительное удлинение сплава, полученного из шихты по варианту МII, достигают максимума при введении титана в количестве 0,04 %, а затем снижаются. Установленный эффект можно объяснить перемодифицированием сплава, приготовленного с использованием в составе Д-шихты деформированных листовых отходов сплава АМгбл.

Анализ полученных результатов (см. рис. 1, 4) показывает, что введение в состав шихты деформированных отходов (варианты КII и МII) обуславливает формирование более измельченной структуры рабочих сплавов АК9ч и АМГбл, чем в случае применения шихты, в составе которой преобладают чушковые шихтовые материалы (варианты КI и МI). Наследственное влияние Д-шихты сохраняется и при модифицировании сплавов лигатурами AlSr20 (АК9ч) и AlTi5 (АМГбл). Эф-

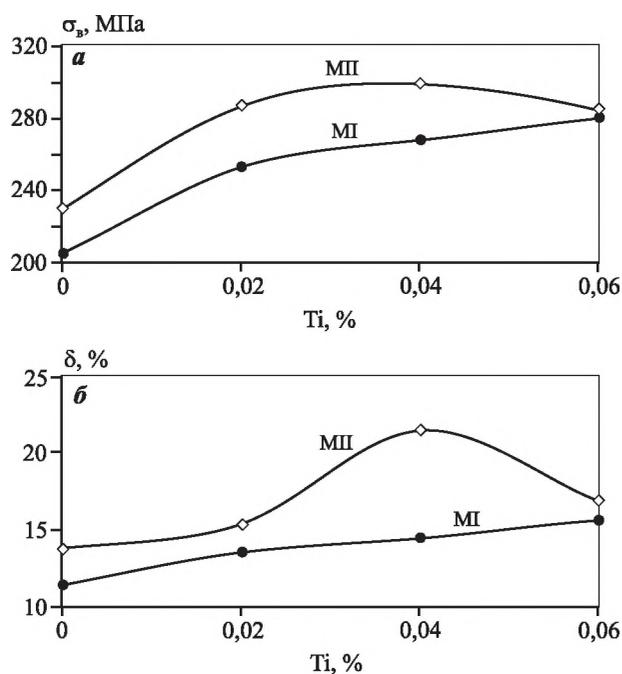


Рис. 6. Влияние состава шихты на механические свойства сплава АМг61 при модифицировании

a, б – соответственно предел прочности при растяжении и относительное удлинение

Fig. 6. Effect of charge composition on AMg61 alloy mechanical properties at modification

a, б – tensile strength and tensile elongation, respectively

фektivность модифицирования увеличивается при использовании Д-шихты при меньших количествах вводимых модификаторов (см. рис. 2, 3, 5, 6). Наследственное влияние структуры Д-шихты [25] сохраняется в течение длительного времени во взаимосвязанной системе «шихта—расплав—литое изделие». В данном случае сохранение и трансляция унаследованной структурной информации через жидкое состояние объясняются следующими закономерностями явления структурной наследственности [23]:

— унаследованные дисперсные частицы и кластеры в расплаве являются генами структурной информации шихтового материала;

— унаследованные расплавом дисперсные частицы и кластеры являются потенциальными дозародышами и центрами кристаллизации.

Заключение

Согласно результатам выполненных исследований, состав шихты оказывает существенное на-

следственное влияние на структуру сплавов АК9ч (система Al—Si—Mg) и АМг6л (система Al—Mg). Использование в составе шихты деформированных отходов (баночных для сплава АК9ч и пластин для АМг6л) обуславливает формирование измельченной микро- и макроструктуры рабочих сплавов.

Структура рабочих сплавов оказывает наследственное влияние на их модифицируемость. При одинаковых количествах вводимых модификаторов (Sr — для АК9ч, Ti — для АМг6л) измельченной микро- и макроструктурой, а также повышенными пределом прочности и относительным удлинением характеризуются сплавы, полученные с применением Д-шихты (вариант КІІ — для АК9ч, вариант МІІ — для АМг6л).

Установлена повышенная склонность сплавов, полученных по вариантам КІІ (АК9ч) и МІІ (АМг6л), к перемодифицированию, что выражается в укрупнении микро- и макроструктуры, а также в незначительном снижении механических свойств.

Таким образом, оптимальное количество доли деформированных отходов в составе шихты позволит на практике сократить расход дорогостоящих модифицирующих лигатур с обеспечением гарантированного эффекта от модифицирования.

Литература/References

1. Murty B.S., Kori S.A., Chakraborty M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. *Int. Mater. Rev.* 2002. Vol. 47. No. 1. P. 3–29.
2. Sigworth G.K., Kuhn T.A. Grain refinement of aluminium casting alloys. *Int. J. Metalcast.* 2007. Vol. 1. Iss. 1. P. 31–40.
3. Sigworth G.K. The modification of Al—Si casting alloys: Important practical and theoretical aspects. *Int. J. Metalcast.* 2008. Vol. 2. No. 2. P. 19–40.
4. Faraji M., Katgerman L. Grain refinement and modification in hypoeutectic Al—Si alloys. *Foundry Trade J.* 2010. Vol. 184. P. 315–318.
5. Lakhwinder S., Geetesh G., Rupinderpreet S. Review of the latest developments in grain refinement. *Int. J. Modern Eng. Res.* 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 2724–2727.
6. Easton M.A., Qian M., Prasad A., StJohn D.H. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2016. No. 20. P. 13–24.
7. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al—Si alloy. *Appl. Surf. Sci.*

2019. Vol. 498. No. 143767. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143767.
8. *Aryshenskii E., Hirsch J., Yashin V., Kononov S., Kawalla R.* Influence of local inhomogeneity of thermomechanical treatment conditions on microstructure evolution in aluminum alloys. *J. Mater. Eng. Perform.* 2018. No. 27. P. 6780–6799.
 9. *Rathod N.R., Manghani J.V.* Effect of modifier and grain refiner on cast Al–7Si aluminum alloy: A review. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Dev.* 2012. Vol. 5. No. 2. P. 574–581.
 10. *Fang Q., Granger D.* Porosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings. *AFS Trans.* 1989. No. 97. P. 989–1000.
 11. *Safwan M.A. Al-Qawabah, Adnan I.O. Zaid.* Different methods for grain refinement of materials. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2016. Vol. 7. Iss. 7. P. 1133–1140.
 12. *Rana R.S., Rajesh Purohit, Das S.* Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum. *Int. J. Sci. Res. Publ.* 2012. Vol. 2. Iss. 6. P. 1–7.
 13. *Timpel M., Wanderka N., Schlesiger R., Yamamoto T., Lazarev N., Isheim D., Schmitz G., Matsumura S., Banhart J.* The role of strontium in modifying aluminium–silicon alloys. *Acta Mater.* 2012. Vol. 60. Iss. 9. P. 3920–3928.
 14. *Chandra Sekhar Rao P.V., Satya Devi A., Basava Kumar K.G.* Influence of melt treatments on dry sliding wear behavior of hypereutectic Al–15Si–4Cu cast alloys. *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* 2012. Vol. 6. No. 1. P. 55–61.
 15. *Averkin A.I., Korchunov B.N., Nikanorov S.P., Osipov V.N.* The effect of strontium on the mechanical properties of aluminum–silicon alloy. *Techn. Phys. Lett.* 2016. Vol. 42. No. 2. P. 201–203.
 16. *Mil'man Yu.V., Neikov O.D., Sirko A.I., Danilenko N.I., Samelyuk A.V., Zakharova N.P., Sharovskii A.I., Ivashchenko R.K., Goncharuk V.A., Chaikina N.G.* Structure and properties of Al–Mg alloys depending on scandium and zirconium additions and production methods. *Powder Metall. Metal Ceram.* 2010. Vol. 49. No. 7–8. P. 430–437.
 17. *Wang Xu, Chen Guoqin, Li Bing, Wu Lianmei, Jiang Daming.* Effects of Sc, Zr and Ti on the microstructure and properties of Al alloys with high Mg content. *Rare Metals.* 2010. Vol. 29. No. 1. P. 66–71.
 18. *Shi'ang Zhou, Zhen Zhang, Ming Li, Dejiang Pan, Hailin Su, Xiaodong Du, Ping Li, Yucheng Wu.* Effect of Sc on microstructure and mechanical properties of as-cast Al–Mg alloys. *Mater. Design.* 2016. Vol. 90. P. 1077–1084.
 19. *Kaiser M.S., Datta S., Roychowdhury A., Banerjee M.K.* Effect of scandium on the microstructure and ageing behaviour of cast Al–6Mg alloy. *Mater. Charact.* 2008. Vol. 59. No. 11. P. 1661–1666.
 20. *Kaiser M.S., Datta S., Bandyopadhyay P.P., Guha A., Roychowdhury A., Banerjee M.K.* Effect of grain refinement through minor additions of scandium and zirconium on the machinability of Al–Mg alloys. *J. Inst. Eng. (India): Ser. D.* 2013. Vol. 94. No. 1. P. 17–24.
 21. *Никитин В.И., Никитин К.В.* О классификации модификаторов для получения литейных и деформируемых сплавов. *Металлургия машиностроения.* 2020. No. 6. С. 8–17.
Nikitin V.I., Nikitin K.V. Classification of modifiers for the production of cast and wrought alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2020. No. 6. P. 8–17 (In Russ.).
 22. *Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Деев В.В.* Влияние модифицирования расплава лигатурами на основе алюминия с добавками редкоземельных и щелочноземельных металлов на структуру и свойства доэвтектических силуминов. *Металлург.* 2021. No. 6. С. 81–86.
Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Deev V.B. Effect of adding rare-earth and alkaline-earth metals to aluminum-based master alloys on the structure and properties of hypoeutectic silumines. *Metallurgist.* 2021. Vol. 65. No. 5–6. P. 681–688.
 23. *Никитин В.И., Никитин К.В.* Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005.
Nikitin V.I., Nikitin K.V. Heredity in cast alloys. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005 (In Russ.).
 24. *Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю.* Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности. М.: Радуница, 2015.
Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu. Quality control of cast products from aluminium alloys based on the phenomenon of structural heredity. Moscow: Radunitsa, 2015 (In Russ.).
 25. *Никитин В.И., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Биктимиров Р.М.* Синтезирование алюминиевых сплавов из дисперсных отходов на основе алюминия. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2020. No. 5. С. 53–62.
Nikitin V.I., Nikitina K.V., Timoshkin I.Yu., Biktimirov R.M. Synthesis of aluminum alloys from dispersed waste based on aluminum. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2020. Vol. 61. No. 6. P. 632–640.