

УДК 669.715:621.746:538.4

**В. И. Дубоделов, В. Н. Фиксен, А. В. Яценко,
Н. А. Слажнев, Ю. П. Скоробагатько, М. С. Горюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВА ТИПА ВАЛ10, НЕ СОДЕРЖАЩЕГО КАДМИЙ. Сообщение 1

Рассмотрены особенности химического состава отечественных и зарубежных литейных высокопрочных алюминиевых сплавов для высокотехнологичной техники, содержащих вредные (кадмий) и дорогостоящие (серебро) компоненты. С целью обеспечения экологической безопасности и удешевления производства сплава типа ВАЛ10 предложен новый подход, основанный на использовании электромагнитных воздействий в процессе приготовления самого сплава с одновременным исключением из его состава кадмия. Показано, что такая МГД-обработка позволяет глобуляризовать дендриты в структуре сплава и обеспечивать показатели прочности, мало уступающие стандартным значениям сплавов-аналогов, и пластичности, которые превышают эти значения. Отработаны режимы приготовления лигатуры Al-Zr с дисперсными интерметаллидами для ввода в экспериментальный сплав типа ВАЛ10, не содержащий кадмий, с целью дальнейшего улучшения его структуры и повышения свойств.

Ключевые слова: литейный высокопрочный алюминиевый сплав типа ВАЛ10, кадмий, серебро, магнитодинамическая установка, электромагнитный перемешиватель пульсирующего магнитного поля, МГД-обработка, лигатура алюминий-цирконий, структура, свойства.

Розглянуто особливості хімічного складу вітчизняних і зарубіжних ливарних високоміцних алюмінієвих сплавів для високотехнологічної техніки, що містять шкідливі (кадмій) та дорогі за вартістю (срібло) компоненти. З метою забезпечення екологічної безпеки і здешевлення виробництва сплаву типу ВАЛ10 запропоновано новий підхід, що ґрунтується на використанні електромагнітних дій в процесі приготування самого сплаву з одночасним виключенням з його складу кадмію. Показано, що така МГД-обробка дозволяє глобуляризувати дендрити в структурі сплаву та забезпечити показники міцності, які мало поступаються стандартним значенням сплавів-аналогів, і пластичності, які перевищують ці значення. Відпрацьовано режими приготування лігатури Al-Zr з дисперсними інтерметалідами для введення в експериментальний сплав типу ВАЛ10, що не містить кадмій, з метою подальшого поліпшення його структури та підвищення властивостей.

Ключові слова: ливарний високоміцний алюмінієвий сплав типу ВАЛ10, кадмій, срібло, магнітодинамічна установка, електромагнітний перемішувач пульсуючого магнітного поля, МГД-обробка, лігатура алюміній-цирконій, структура, властивості.

There are considered the features of chemical composition of domestic and foreign casting high-strength aluminium alloys containing harmful (cadmium) and expensive (silver) components for Hi-Tech technics. For providing of ecological safety and reduction of prices at manufacturing of alloy VAL 10-type, it is proposed the new decision based on the use of electromagnetic actions at preparation of alloy with synchronous exception of cadmium from its composition. It is shown, that such MHD-treatment allows providing globular dendrites in the structure of alloy. At that, strength of experimental alloy is insignificantly less than standard values of alloys-analogues; and plasticity exceeds these values. There were worked the preparation modes for manufacturing Al-Zr ligature with dispersed intermetallides for the input into the experimental alloy VAL 10-type without cadmium for further improvement of its structure and rise of properties.

Keywords: casting high-strength aluminium alloy VAL 10-type, cadmium, silver, magne-todynamic installation, electromagnetic stirrer of pulsating magnetic field, MHD-treatment, aluminium-zirconium ligature, properties.

Высокопрочные и жаропрочные литейные алюминиевые сплавы системы Al-Cu являются востребованными в промышленности материалами, особенно для отраслей высокотехнологичного машиностроения (авиастроение, энергетика, транспорт), где зачастую требуется совместить возможность получения крупногабаритной детали с возможностью ее длительной безаварийной эксплуатации в условиях повышенных статических и ударных нагрузок при температурах до 300 °С.

Основные преимущества литейных сплавов перед деформируемыми состоят в уникальном сочетании их физических (относительно низкая плотность), механических (высокая прочность) и технологических (например, сравнительно невысокая температура приготовления и разлива) характеристик, превосходстве по эксплуатационным температурно-временным параметрам (в частности, по жаропрочности и циклической прочности), а также в возможности получения из них литейными способами деталей сложной конфигурации [1]. При этом в последнее время в результате постоянно растущих требований к качеству и эксплуатационным свойствам таких функциональных материалов и изделий из них возникают вопросы экологической безопасности и удешевления выпуска продукции. Кроме того, в связи с расширением номенклатуры изделий, усложнением их конструкции необходимо обеспечивать высокий уровень ряда литейных параметров – прежде всего, жидкотекучести, горячеломкости, герметичности и т. д.

Одним из наиболее широко используемых (как по объемам, так и по разнообразию сфер применения) сплавов системы Al-Cu является сплав АМ4,5Кд по ГОСТу 1583-93 (ВАЛ10 – по ГОСТу 1583-89).

Основным легирующим элементом этого сплава является медь, которая образует с алюминием упрочняющую фазу CuAl_2 . Следует отметить, что чрезмерно высокое содержание меди (более 5,5 %мас.) нежелательно, так как избыточное выделение фазы CuAl_2 охрупчивает сплав при температуре 20 °С, а при повышенных температурах, из-за развития диффузионной пластичности [1], резко снижает его жаропрочность. С другой стороны, уменьшение содержания меди в сплаве ниже 4 %мас. приводит к понижению его прочности при 20 °С [1].

Одним из важнейших компонентов сплавов типа ВАЛ10 является кадмий. Высокопрочный сплав ВАЛ10 был создан именно при легировании сплава системы Al-Cu кадмием. Механизм его действия в данном случае следующий: из-за значительной разницы в атомных радиусах Al и Cd (соответственно 0,143 и 0,152 нм) в процессе растворения кадмия в алюминии существенно изменяется (деформируется) кристаллическая решетка. Кадмий способствует уменьшению межфазного натяжения и образованию зародышей. В результате при нагреве сплава под закалку вакансионные медно-кадмиевые группы тормозят передвижение атомов меди, а при старении создают предпосылки для ограничения роста размеров зон Гинье-Престона, увеличивая их общее объемное содержание. При этом более интенсивно распадается твердый раствор, возрастают объемная доля и плотность выделения упрочняющей фазы и, естественно, происходит упрочнение сплава [1,2].

Кадмий при всех своих положительных качествах с позиции материаловедения крайне вреден с точки зрения экологии и воздействия на здоровье человека. Так, он является одним из самых токсичных тяжелых металлов и относится ко 2-му классу опасности («высокоопасные вещества») [3]. Кадмий – канцероген и кумулятивный яд, который накапливается в организме в быстроразмножающихся клетках (в опухолевых или половых). Его соединения ядовитые, что связано, в частности, с его способностью связывать серосодержащие ферменты и аминокислоты, особенно опасно вдыхание паров его оксида. Растворимые соединения кадмия после всасывания в кровь человека поражают его центральную нервную систему, печень и почки, нарушают фосфорно-кальциевый обмен. Он связывается с цитоплазматическим и ядерным материалом клеток и приводит к их повреждению, изменяя активность многих гормонов. Хроническое отравление кадмием способствует развитию анемии и разрушению костей [3].

Поэтому в промышленно развитых странах при производстве высокопрочных алюминиевых сплавов типа ВАЛ10 и других использование кадмия категорически запрещено. Зарубежные специалисты после комплекса исследований нашли замену кадмию в виде серебра, которое действует аналогично кадмию, то есть при растворении существенно деформирует кристаллическую решетку твердого раствора и способствует выделению пластинчатой метастабильной высокопрочной дисперсной фазы [4].

Однако использование серебра существенно повышает стоимость сплава: так, по данным отечественных и зарубежных производителей и поставщиков лигатур, стоимость лигатуры Al-Ag (2 % Ag) для приготовления алюминиевых сплавов [5, 6] составляет около 90 евро/кг, что примерно в 7-8 раз дороже стоимости лигатуры Al-Cd (2 % Cd). Поэтому в последние годы многие отечественные и зарубежные исследователи и производственники проводят работы по замене вредных и дорогостоящих компонентов в сплавах.

В табл. 1 приведены сравнительные данные о сплаве АМ4,5Кд (ВАЛ10) и его зарубежных аналогах [4, 7].

Специалисты отдела магнитной гидродинамики ФТИМС НАН Украины совместно с коллегами института, а также других организаций, в частности, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины (ИМФ), ведут работы по исключению таких элементов, как кадмий и серебро, из состава высокопрочного литейного алюминиевого сплава типа ВАЛ10. Эти исследования, в первую очередь, были сконцентрированы на следующих основных направлениях:

- выплавке экспериментального сплава типа ВАЛ10, не содержащего кадмия, с использованием МГД-обработки расплава в магнитодинамической установке (МДУ) и устройстве с электромагнитным перемешивателем пульсирующего магнитного поля (ЭМП-ПМП);

- разработке технологических приемов приготовления лигатуры Al-Zr, содержащей дисперсные интерметаллиды, с применением электромагнитного перемешивания;

- изучении структуры и свойств экспериментального сплава, разработке рекомендаций по проведению дальнейших исследований.

По этим направлениям исполнители работ провели комплекс теоретических исследований и натурных экспериментов.

Изначально авторы исходили из следующих предпосылок.

Во-первых, необходимо было оценить, какой эффект может быть достигнут только за счет обработки жидкого сплава типа ВАЛ10, не содержащего кадмия, с помощью электромагнитных полей в специализированном МГД-оборудовании. Такое оборудование обеспечивает [8, 9]: управление температурой расплава за счет его регулируемого индукционного нагрева; высокую степень однородности расплава по химическому составу за счет электромагнитного перемешивания (как непосредственно в МДУ, так и в устройствах, оснащенных ЭМП-ПМП); разрушение областей микронеоднородностей в расплаве за счет его термосиловой и многократ-

Таблица 1. Сравнительные характеристики высокопрочных алюминиевых сплавов-аналогов сплава ВАЛ10 [4, 7]

Сплавы, страны	Химический состав (Al – основа), %мас.	Способ литья	Вид термической обработки	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
АМ4,5Кд (ВАЛ10) (ГОСТ 1583-93, СНГ)	4,5-5,1 Cu; 0,35-0,80 Mn; 0,15-0,35 Ti; 0,07-0,25 Cd; $\leq 0,10$ Fe; $\leq 0,05$ Mg; $\leq 0,10$ Zn; $\leq 0,15$ Zr; $\leq 0,20$ Si	кокиль	Т6	490	390	4,0
201.0; СО51А; 382 (США)	4,6 Cu; 0,35 Mn; 0,15-0,35 Ti; 0,70 Ag; 0,35 Mg; 0,70 Pb; $\leq 0,15$ Fe; $\leq 0,10$ Si			448	379	8,0
АС1В (Япония)	4,5-5,0 Cu; 0,10 Mn; 0,05-0,30 Ti; 0,15-0,35 Mg; 0,35 Fe; 0,10 Zn; 0,20 Si; 0,05 Pb; 0,05 Sn; 0,05 Cr			304	-	3,0
А-U5GT (Франция)	4,5-5,2 Cu; 0,10 Mn; 0,05-0,30 Ti; 0,15-0,35 Mg; 0,05 Ni; 0,35 Fe; 0,10 Zn; 0,20 Si; 0,05 Pb; 0,05 Sn			340-360	-	8,0-11,0

но повторяющихся МГД и гидродинамической обработок; реализацию комплекса технологий по рафинированию жидкого сплава от водорода и неметаллических включений.

Во-вторых, химический состав экспериментального сплава типа ВАЛ10 для исключения трудноконтролируемого влияния металловедческих факторов выбирали следующим образом: полное отсутствие кадмия; содержание остальных легирующих компонентов (в первую очередь, основных упрочняющих элементов – меди и марганца) должно находиться вблизи нижнего предельного уровня согласно ГОСТу 1583-93; отсутствие других микролегирующих и модифицирующих добавок, таких, например, как цирконий.

То есть на первом этапе была поставлена и решалась задача – насколько МГД-обработка экспериментального сплава позволит компенсировать недостатки, связанные с неблагоприятным изменением его химического состава.

Эксперименты проводили следующим образом.

В МДУ был приготовлен (~100 кг) и разлит в чушки экспериментальный сплав типа АМ4,5Кд (ВАЛ10) по ГОСТу 1583-93, но не содержащий кадмия и с массовой долей других компонентов, приближенной к минимально допустимому по ГОСТу пределу (табл. 2), а также без легирующих и модифицирующих добавок (таких, как цирконий). Обработку и разливку экспериментального сплава проводили при температуре 760-780 °С.

Из полученного расплава в чугунный кокиль отливали образцы для механических испытаний и металлографических исследований. Образцы имели

Таблица 2. Химический состав экспериментального сплава типа ВАЛ 10 (Al – основа), %мас.

Cu	Mn	Ti	Fe	Si	Zn	Ni	Mg
4,60-4,65	0,40-0,43	0,14-0,19	0,05-0,06	0,17-0,18	0,002	0,004	0,01

вид стержней длиной 230 мм и диаметрами 20 и 25 мм. Скорость охлаждения кристаллизующегося расплава составляла не более 10^2 °C/с.

Проведенные испытания полученных образцов экспериментального сплава, подвергнутых термообработке по режиму Т6, показали следующие значения основных механических свойств (табл. 3): временное сопротивление разрыву – 400 МПа, предел текучести – 270 МПа, относительное удлинение – 10,5 %.

Таблица 3. Основные механические свойства экспериментального сплава типа ВАЛ10

Состояние сплава	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Литое	211	101	18,5
Термообработанное	400	270	10,5

Далее провели сравнение полученных результатов с показателями существующих промышленных сплавов-аналогов для таких же условий получения образцов – литье в кокиль и термообработка Т6 (см. данные табл. 1), которое показало следующее: согласно ГОСТу 1583-93, эти характеристики для сплава АМ4,5Кд (ВАЛ10) (содержит 0,07-0,25 %мас. Cd) составляют соответственно 490, 390 МПа и 4 %; по международным стандартам – для сплавов типа А201 (США), содержащих 0,70 %мас. Ag, – соответственно 448, 379 МПа и 8 %; для сплава АС1В (Япония), не содержащего ни кадмия, ни серебра, – соответственно временное сопротивление разрыву 304 МПа и относительное удлинение 3 %; для сплава А-U5GT (Франция), также не содержащего ни кадмия, ни серебра, – соответственно временное сопротивление разрыву 340-360 МПа и относительное удлинение 8-11 %.

Таким образом доказано, что комплексная МГД-обработка жидкого экспериментального алюминиевого сплава типа ВАЛ10, не содержащего кадмия и микролегирующих и модифицирующих добавок (таких, как цирконий), с использованием энергии электромагнитных полей создает необходимые предпосылки для достижения им механических свойств по прочности, которые несущественно уступают сплавам-аналогам, в том числе зарубежным, а по пластичности превосходят их.

Дальнейшие исследования проводились следующим образом.

Для проверки влияния режимов электромагнитного перемешивания на качество и структуру сплава, а также с целью минимизации затрат материалов и энергии, разработали модельную установку, в которой небольшие порции выплавленного в МДУ экспериментального алюминиевого сплава типа ВАЛ10 без кадмия подвергались МГД-обработке.

Главными составными частями экспериментальной установки являются тигельная печь сопротивления емкостью 1,4 кг жидкого алюминиевого сплава и ЭМП-ПМП.

Исследования, ранее проведенные в ФТИМС НАН Украины, показали, что электромагнитный перемешиватель пульсирующего магнитного поля (ЭМП-ПМП) может быть эффективно применен не только для перемешивания жидкометаллической ванны с целью усреднения ее температуры и химического состава [9], но также и для физического модифицирования сплавов и лигатур [10]. Пульсирующее магнитное поле представляет собой переменный магнитный поток, который, выхо-

дя из полюса ЭМП-ПМП, взаимодействует с электропроводной средой. Согласно закону электромагнитной индукции, на металлический расплав действует однопольная, синусоидально изменяющаяся сила отталкивания с частотой, равной удвоенной частоте питающего напряжения. Например, при частоте тока в сети 50 Гц частота действия силы составляет 100 Гц.

Экспериментальный алюминиевый сплав типа ВАЛ10 без кадмия расплавляли в печи, установленной на горизонтально расположенном полюсе ЭМП-ПМП, и затем включали последний. Циркуляция алюминиевого расплава при перемешивании, сопровождающаяся рядом МГД и гидродинамических эффектов, происходила преимущественно в вертикальной плоскости и обеспечивала высокую степень однородности сплава. Совмещение нагрева и интенсивной циркуляции обеспечивало термосиловое воздействие на жидкий металл, что способствовало разрушению областей наследственной металлургической микронеоднородности в нем. Обработку проводили в течение 5 мин, а затем из полученного алюминиевого расплава по вышеприведенной методике отливали образцы для металлографических исследований.

Такая МГД-обработка экспериментального сплава типа ВАЛ10 системы Al-Cu, не содержащего кадмия, оказала эффективное модифицирующее действие на его литую структуру (рис. 1). Так, при отсутствии обработки сплав имеет дендритную структуру (рис. 1, а). После МГД-обработки дендриты приобретают глобуляризованный вид (рис. 1, б). Непривычная темная окраска дендритов α -твердого раствора на микрофотографиях вызвана особым типом травителя, при использовании которого более четко видна структура.

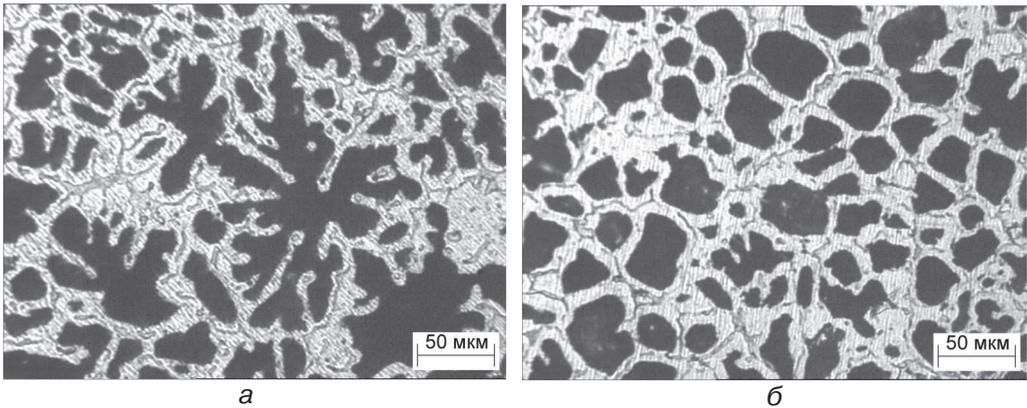


Рис. 1. Влияние физического модифицирования на форму дендритов α -твердого раствора сплава типа ВАЛ10 (в литом состоянии), не содержащего кадмия: а – без внешнего воздействия; б – в условиях МГД-обработки с использованием ЭМП-ПМП

Металлографические исследования показали, что по границам глобуляризованных дендритов имелись включения фазы CuAl_2 и области распространения эвтектики, состоящей из чередующихся пластин меди и алюминия, которые неблагоприятно влияют на прочностные характеристики. Ввиду того, что из-за отсутствия в экспериментальном сплаве кадмия его фазовый состав несколько изменился, специалисты ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины разработали специальные режимы термообработки, близкие к виду Т6 (закалка и искусственное старение). В процессе такой термообработки указанные образования перешли в пересыщенный твердый раствор.

Таким образом, исследования на физической модели показали эффективность электромагнитного перемешивания, позволяющего дополнительно влиять на структуру высокопрочных алюминиевых сплавов, что в будущем планируется реализовать и отработать на больших объемах расплава непосредственно в МДУ.

Последующие исследования были ориентированы на стабильное обеспечение необходимого уровня технологических и эксплуатационных характеристик экс-

периментального сплава. Одним из резервов дальнейшего повышения свойств видится использование микролегирующих и модифицирующих добавок (прежде всего, циркония), вводимых в расплав в виде лигатур. Однако, учитывая важность задачи, здесь необходимо соблюдать определенные условия.

Так, известно, что макро- и микроструктура модифицируемых сплавов сильно зависят от микроструктуры лигатур-модификаторов. Лигатура Al-Zr, используемая, например, для модифицирования высокопрочных литейных алюминиевых сплавов системы Al-Cu, должна содержать в себе цирконий в виде дисперсных интерметаллидов. Согласно диаграмме состояния системы Al-Zr, при содержании циркония в лигатуре Al-Zr менее 53 % по массе образуются интерметаллиды Al_3Zr , которые в обычных условиях плавки и кристаллизации приобретают игольчатую форму и длину в десятки мкм. В таком виде они не оказывают эффективного модифицирующего действия. Частицы интерметаллидов Al_3Zr игольчатой формы и длиной менее 1 мкм тоже являются хорошими модификаторами, однако получить их в сплаве в настоящее время представляется затруднительным.

Для решения поставленной задачи в печи расплавляли алюминий марки А97, доводили его температуру до 800 °С и погружали в него лигатуру, содержащую 85 % Zr и 15 % Al с расчетом, чтобы в литом образце было не менее 5 %мас. Zr. После прогрева введенной лигатуры до 800 °С включали перемешиватель (ЭМП-ПМП). Заливку расплава в кокиль производили при температуре 800-810 °С.

Металлографические исследования* показали, что интерметаллид Al_3Zr , который при традиционных способах приготовления сплава кристаллизуется в форме игл длиной до 150 мкм (рис. 2, а), при электромагнитном воздействии на расплав приобретает компактную форму (рис. 2, б). Рентгеноструктурный фазовый анализ подтвердил, что это интерметаллид Al_3Zr . В данном случае в сплаве содержится 5 %мас. Zr, а размеры компактных включений интерметаллида составляют преимущественно 5 мкм.

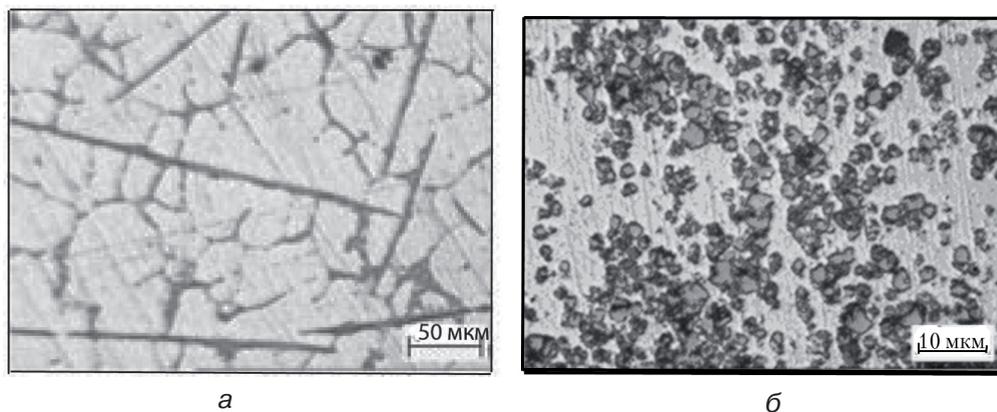


Рис. 2. Влияние физического модифицирования на форму интерметаллидов Al_3Zr в сплаве Al-Zr: а – в условиях МГД-обработки с использованием ЭМП-ПМП; б – без внешнего воздействия

Необходимо особо отметить, что измельчение включений интерметаллида Al_3Zr может быть достигнуто также и путем термовременной обработки (ТВО) – перегрева жидкого сплава до температур выше 1000 °С с последующим охлаждением с большой скоростью. В работах [11-13] сплав Al-Zr с 2 % мас. Zr был подвергнут перегреву до 1300 °С с последующим охлаждением со скоростью 10^3 - 10^4 °С/с. В результате сформировались равноосные дендриты интерметаллида Al_3Zr размером в 5 мкм.

Очевидно, что метод физического модифицирования с использованием ЭМП-ПМП имеет явные преимущества по сравнению с приведенным методом термовременной обработки. Дополнительные исследования подтвердили воспроизводимость

* Исследования проводились с участием специалистов ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАНУ

полученных результатов. Рабочая гипотеза о механизме процесса в настоящее время находится в стадии теоретической разработки и экспериментальной проверки.

На основе проведенного комплекса исследований авторы отметили, что для дальнейшей работы необходимы:

– увеличение массовой доли основных легирующих компонентов экспериментального сплава типа ВАЛ10 ближе к верхнему пределу по ГОСТу 1583-93 (меди – до 5 %мас., марганца – до 0,7);

– ввод полученной Al-Zr лигатуры (из расчета обеспечения остаточного содержания циркония в сплаве на уровне 0,15 %мас.) с дисперсными интерметаллидами Al_3Zr непосредственно в жидкометаллическую ванну МДУ, содержащую экспериментальный сплав типа ВАЛ10 химического состава, откорректированного по вышеприведенному п. 1);

– отработка режимов электромагнитного перемешивания расплава в МДУ с учетом результатов моделирования на специальной экспериментальной установке;

– исследование комплекса физико-механических, литейных, технологических и эксплуатационных свойств экспериментального сплава и сравнение полученных результатов с показателями стандартных сплавов.

В целом, основываясь на полученных экспериментальных данных, можно прогнозировать, что поставленная задача – удаление из состава высокопрочных алюминиевых сплавов вредных и дорогостоящих добавок при сохранении уровня требуемых свойств – может быть успешно решена в рамках предложенных авторами научных подходов и технологических разработок.



Список литературы

1. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. И. Н. Фридляндера: Энциклопедия. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2-3. – 880 с.
2. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
3. Химическая энциклопедия / Под ред. И. Л. Кнунянц. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – С. 280- 671 с.
4. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справочник / Под ред. Дж. Хэтч. – М.: Металлургия, 1989. – 424 с.
5. Сайт компании “КВМ Affilips” (Нидерланды – Бельгия) <http://www.kbmaffilips.com>.
6. Сайт компании «Союз-Литье» (Украина) <http://www.lityo.com.ua>.
7. Чернышов Е. А. Литейные сплавы и их зарубежные аналоги. – М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.
8. Improving of Al-Si Alloys by their Combined MHD and Thermo-forced Processing in Liquid and Solid States V. Dubodelov, V. Fikssen, M. Slazhniev et.al. // Magnetohydrodynamics. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 379-386.
9. Фиксен В. Н. Приготовление, рафинирование и заливка алюминиевых сплавов под действием электромагнитных сил // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 24-29.
10. Фиксен В. Н. Пульсирующее магнитное поле как эффективное средство физического модифицирования алюминиевых сплавов // Тез. докл. IV Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». – Краматорск, 2013. – С. 228-229.
11. Условия формирования метастабильных фаз при кристаллизации сплавов Al-Zr / И. Г. Бродова, В. М. Замятин, П. С. Попель и др. // Расплавы. – 1988. – Том 2, вып 6. – С. 23-27.
12. Попель П. С. Метастабильная микронеоднородность расплавов в системах с эвтектикой и монотектикой и ее влияние на структуру сплава после затвердевания // Расплавы. – 2005. – №1. – С. 22-48.
13. Popel P., Calvo-Dahlborg M., Dahlborg U. Metastable Microheterogeneity of Melts in Eutectic and Monotectic Systems and its Influence on the Properties of the Solidified alloy // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2007. – № 353. – P. 3243-3253.

Поступила 10.10.2013