

УДК 669.715:621.745:538.4

Е. В. Середенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України (Київ, Україна)

ДЕЙСТВИЕ НА ФАЗЫ И СВОЙСТВА ЛИТОГО МЕДИСТОГО СИЛУМИНА ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, НАЛОЖЕННОГО НА ОХЛАЖДАЮЩИЙСЯ И ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЙ РАСПЛАВ

Исследовано действие постоянного магнитного поля в диапазоне чисел $H_a = 0-170$ на структуру и свойства литого медистого силумина типа АК12М2. С помощью обработки магнитным полем осуществляется как укрупнение, так и измельчение зерен сплава, их насыщение парамагнитными элементами Ti, Sn и диамагнитными Cu и Zn, регулирование соотношения фаз в литой структуре. В результате уровень твердости сплава, медленно охлажденного в алундовой форме при воздействии поля, соответствовал термообработанному сплаву, закристаллизованному под давлением. Уровень насыщения медью зерен сплава, полученный непосредственно при кристаллизации в поле, был приближен к термообработанному металлу. Коррозионная стойкость сплава увеличилась без использования специальных добавок. Применение постоянного магнитного поля при кристаллизации сплава дает возможность экономии легирующих, модифицирующих добавок и электроэнергии.

Ключевые слова: медистый силумин, постоянное магнитное поле, затвердевающий расплав, структура, твердость, межкристаллитная коррозия.

Преимуществом литейных сплавов являются относительно малые затраты ресурсов и энергии при производстве заготовок [1]. Литейные сплавы алюминия, легированные кремнием и медью, широко используются в машиностроении [2]. Они предназначены для сложных отливок, в том числе тонкостенных заготовок, получаемых различными методами литья [3]. Сплавы системы Al–Si–Cu с 6–18 % Si и 1–4 % Cu являются базовыми материалами для деталей ответственного назначения авиакосмической техники, автомобилестроения. Потребность в таких материалах возрастает в последнее десятилетие, что обуславливает их активное изучение, направленное на повышение прочностных и специальных свойств, в частности твердости и коррозионной стойкости [4, 5].

Свойства сплавов, в том числе медистых силуминов, зависят от содержания компонентов, размера зерна основы, морфологии фаз, распределения и растворимости легирующих элементов в структурных составляющих [6]. Добавка Cu эффективно упрочняет сплав алюминия с кремнием, но снижает его коррозионную стойкость, что обусловлено наличием соединения $CuAl_2$ в объеме между зернами сплава [7]. Улучшение эксплуатационных характеристик сплавов системы Al–Si–Cu в первую

очередь досягається усложненням їх складу [3, 8, 9], измельченням структурних складових за рахунок збільшення швидкості охолодження заготовок [10, 11] і застосування швидкоохолоджених модифікаторів [8], а також термообробкою [7]. Для підвищення твердості медистих силумінов застосовується модифікація Ti, Sc, легування Ni, Ce, Cr [3, 4, 8, 9, 12]. Улучшенню корозійної стійкості медистих силумінов поряд з добавками Mg і Mn сприяє легування сплавів алюмінію Nb, Ti, V, Zr, Cr [9, 13, 14] і елементами підгрупи германія [12]. Ці добавки вважаються дорогими і вимагають точного відповідності оптимальному кількості. Стійкість до корозії також підвищується при збільшенні кількості Cu в зернах α -твердого розчину Al [15]. Застосування термообробки для збільшення кількості міді в зернах основи сплаву робить процес отримання заготовок більш дорогим і довготривалим.

Одним із сучасних методів впливу на структуру і властивості сплавів, зокрема алюмінієвих, є постійне магнітне поле, накладуване на охолоджується і затвердіває розплав [6].

Аналіз даних про вплив постійного магнітного поля на структуроутворення алюмінієвих сплавів показав, що воно має складний характер. У роботі [16] зазначено, що поле впливає як на магнітні, так і немагнітні компоненти. Вплив постійного магнітного поля на структуру сплавів алюмінію в основному вивчається для слитків, отриманих в умовах направленої затвердівання [17–23]. Ефект від його впливу залежить від багатьох факторів, зокрема, від величини індукції поля [17–19, 23], швидкості просування фронту кристалізації при направленої затвердіванні [19, 21, 22], кількості компонентів у сплаві [22]. У проведених дослідженнях вплив магнітного поля на структуру сплавів оцінювалося за розміром і формою дендритів α -твердого розчину Al, кількості і морфології фаз у міжзерновому просторі. Змінам у литій структурі сплавів надавалася якісна оцінка.

Вплив магнітного поля на розчинність компонентів у структурних складових сплавів вивчалось з точки зору зміни їх вмісту в зернах α -твердого розчину Al. У роботі [24] особливості поведінки добавок пов'язувалися з їх магнітними властивостями. Відзначалося, що розчинність у алюмінієвій основі сплаву (парамагнетик) діамангнітної міді зростала, а парамагнітного магнію зменшувалась. Разом з тим за даними [25] у бінарних сплавах алюмінію з Mg, Cu і Zn (діамангнетик) підвищувалась розчинність легуючих всіх типів в основі сплаву. У роботі [19] вплив магнітного поля на формування фази Al (MnSiFe) і включень первинного Si пов'язувалося з збільшенням розчинності Si, Mn і Fe (відповідно діамангнетик, пара- і ферромагнетиків) у дендритах α -твердого розчину Al. Однак, цей ефект проявлявся тільки при певному рівні індукції магнітного поля. Ймовірно, складний вплив магнітного поля на параметри литій структури і розчинність компонентів у зернах основи сплавів пов'язано з особливостями зміни магнітної вразливості фаз у залежності від температури і їх складу. Подібним залежностям мають тільки окремі дані для деяких інтерметаллідів і рідких сплавів алюмінію. Ці дані показують, що зміна магнітної вразливості сплаву у залежності від концентрації розчиненого компонента має хвилюватий характер і амплітуда її коливань неоднакова при різних температурах [26]. Для деяких інтерметаллідів магнітна вразливість майже не змінюється з температурою, а для інших така залежність виражена і має лінійний або складний характер [27].

Діяльність постійного магнітного поля призводить до зміни механічних властивостей алюмінієвих сплавів, отриманих в умовах направленої затвердівання в кристалізаторах (прочності, твердості, відносного подовження) [19, 20], що також має складний характер.

Про вплив постійного магнітного поля на корозійну стійкість алюмінію і його сплавів мають обмежені дані. Крім того, вони стосуються гальванопо-

крытий, полученных под воздействием постоянного магнитного поля [28], и также свидетельствуют о сложной зависимости сопротивления коррозии металла от индукции поля. В работе [29] отмечено, что действие постоянного магнитного поля на морфологию зерен диа- и парамагнитных металлических покрытий одинаково, а на ферромагнитные имеет отличные от них особенности.

Вопрос о воздействии постоянного магнитного поля на твердость и стойкость к коррозии сплавов алюминия, легированных кремнием и медью, полученных литьем в формы, изучен не достаточно.

Для управления структурой и свойствами сплавов на основе алюминия применяются постоянные магнитные поля в широком диапазоне индукций: от $\sim 0,1$ до 29 Тл [17–20, 30]. Использование магнитного поля с индукцией ≤ 1 Тл является актуальным, поскольку для его создания не требуются дорогостоящее оборудование и высокие энергозатраты.

Сложный характер влияния постоянного магнитного поля, действующего на охлаждающийся и затвердевающий расплав, на литую структуру сплавов алюминия, распределение компонентов между его фазами и ограниченные сведения по его воздействию на специальные свойства сдерживают применение постоянного магнитного поля в производстве литых заготовок, в частности из медистых силуминов.

Целью данной работы было исследование действия постоянного магнитного поля с индукцией < 1 Тл, наложенного на охлаждающийся и затвердевающий сплав системы Al–Si–Cu, на его литую структуру и специальные свойства. Изучалось влияние поля на размер зерен α -твердого раствора Al, количество интерметаллидных фаз, содержание компонентов в зернах основы сплава в металле, где в наибольшей степени произошло их измельчение, твердость и межкристаллитная коррозия.

Исследуемый медистый силумин типа АК12М2 имел состав, %мас.: Si – 10,60; Cu – 2,87; Zn – 0,86; Fe – 0,36; Mn – 0,17; Ti $< 0,01$; (Sn + Pb) $\sim 0,10$; остальное Al. Металл выплавлялся в алундовом тигле в печи электросопротивления. После расплавления шихты расплав перегревался до температуры 800 °С и выдерживался при ней 10 мин. В течение плавки производилось перемешивание ванны с расплавом. После обработки в печи жидкий металл разливался в цилиндрические алундовые формы с диаметром полости 14 мм. Они были помещены в зазор электромагнита. Расплав охлаждался со скоростью ~ 1 °С/с. Во время охлаждения и затвердевания на жидкий сплав воздействовало постоянное магнитное поле с индукцией (B) < 1 Тл. Контрольный металл магнитным полем не обрабатывался. Для характеристики действия магнитного поля, наложенного на расплав, было использовано число Гартмана (Ha), учитывающее величину его индукции и физических свойств обрабатываемого металла. Данное число представляет отношение электромагнитной силы к силе вязкости [31]:

$$Ha = BL \sqrt{\rho \rho^e \nu},$$

где B – индукция магнитного поля, Тл; L – характерный размер объекта, на который действует поле, м (в данной работе это внутренний диаметр формы с расплавом, в котором перемещались атомы при формировании структуры сплава в период его охлаждения); ρ – плотность жидкого сплава, кг/м³; ρ^e – удельное электросопротивление расплава, Ом·м; ν – кинематическая вязкость расплава, м²/с. Величины физических характеристик для расчета Ha взяты из источников [32, 33]. В экспериментах число Ha имело значения 0; 16; 17; 18; 160 и 170.

Для металлографических исследований образцы сплава разрезались по оси в вертикальном направлении параллельно силовым линиям магнитного поля. После шлифования и полирования поверхность образцов травилась 1%-ным раствором плавиковой кислоты в смеси воды и этилового спирта. Анализ литой структуры производился с помощью оптического металлографического микроскопа METAM–P1. Фазы сплава идентифицировались по форме и цвету на основе данных [7].

Изучалось действие магнитного поля на размеры зерен α -твердого раствора Al, которые определялись согласно ГОСТ 5639-82 методом подсчета пересечений границ зерен. Установление особенностей влияния магнитного поля на перераспределение компонентов в сплаве проводилось по количеству фаз в образцах, полученных в условиях, характеризующихся соответствующими числами Ha . Для оценки количества включений интерметаллидов было введено безразмерное число K , характеризующее относительную площадь, занятую фазой на поверхности шлифа:

$$K = l_{\text{cp}} \cdot b_{\text{cp}} \cdot q,$$

где l – длина включения, мм; b – ширина включения, мм; q – количество включений на единице площади шлифа мм²; «ср» – среднее значение. Размеры и количество включений интерметаллидов определялись на основе ГОСТ 1778-70 (метод Л). При определении K разветвленных фаз суммировались l и b ветвей всех порядков для каждого включения. Для оценки влияния магнитного поля на количество фаз в сплаве использовалось отношение числа K для фазы в сплаве, обработанном полем, к числу K этой фазы в контрольном металле. Данное отношение обозначено $K_{\text{в}}$.

Определялось влияние магнитного поля на содержание компонентов сплава в зернах α -твердого раствора Al в центре зерна и на расстоянии 5 мкм от границы зерна и межзеренного объема в металле, полученном при $Ha = 0$ и 17. Измерения выполнялись на нетравленных образцах с помощью микроанализатора REMMA-102 (точность измерения 0,01 %). Значения атомной магнитной восприимчивости (χ) для анализа поведения компонентов сплава под воздействием постоянного магнитного поля брались из источников [34, 35].

Испытание образцов сплава на межкристаллитную коррозию проводилось по ГОСТ 9.021-74, оценка глубины межкристаллитной коррозии – по ГОСТ 9.908-85. Твердость образцов металла измерялась по ГОСТ 9012-59.

Анализ литой структуры сплава показал, что она состояла из зерен α -твердого раствора Al и включений, находившихся в межзеренном объеме. На рис. 1 показаны фазы, наблюдавшиеся в сплаве: включения Si (удлиненные), CuAl_2 (сложной формы), участки тройной эвтектики с дисперсными включениями Al + Si + CuAl_2 , а также интерметаллиды AlFeSiMn (разветвленные) и AlCuFeSi (игольчатые). Соединения с Ti, Zn, Sn и Pb не выявлены.

Под воздействием магнитного поля в сплаве произошло изменение размера зерна α -твердого раствора Al. В режиме $Ha = 16$ зерна укрупнились. Наложение на охлаждающийся и затвердевающий расплав поля, характеризующегося $Ha = 17-170$, привело к уменьшению размеров зерен сплава, наибольшим образом при $Ha=7$ (рис. 2).

Микрорентгеноспектральным анализом сплава, полученного при $Ha = 0$, установлено содержание компонентов в соответствующих зонах зерен α -твердого раствора Al, приведенное в табл. 1. При анализе металла, затвердевшего в условиях $Ha = 17$, определено, что в центре зерна под воздействием постоянного магнитного поля возросло содержание компонентов: парамагнитных Sn ($\chi \sim 5$) – в 1,9 и Ti ($\chi \sim 160$) – в 1,7; диамагнитных Cu – в 1,6 ($\chi \sim (-5)$); Si ($\chi \sim (-4)$) – в 1,3 и Zn ($\chi \sim (-10)$) – в 1,03 раза. На расстоянии 5 мкм от границы зерна под воздействием поля усилилась тенденция повышения количества Cu и Sn: соответственно, в 1,8 и 2,0 раза, Zn – в 1,1 раза. Количество Si снизилось в 3,3 раза.

Согласно графическим данным по распределению меди в литом сплаве типа 319 с 8,3 % Si и 2,8 % Cu [36], ее количество в центре зерен основы сплава было 0,60, на периферии $\sim 1,64$ %. В результате термообработки данного сплава при 505 °C в течение 30 мин достигнуто среднее содержание Cu в аналогичных зонах зерен, соответственно, 2,3 и 2,5 %. Причем распределение меди было неоднородным для разных зерен. Минимальное количество Cu в центре и периферии зерен было на уровне 1,6 %. В сплаве типа АК12М2 в результате действия магнитного поля только во время его охлаждения и затвердевания содержание меди в исследованных зонах зерен было 1,2 и 2,1 %.

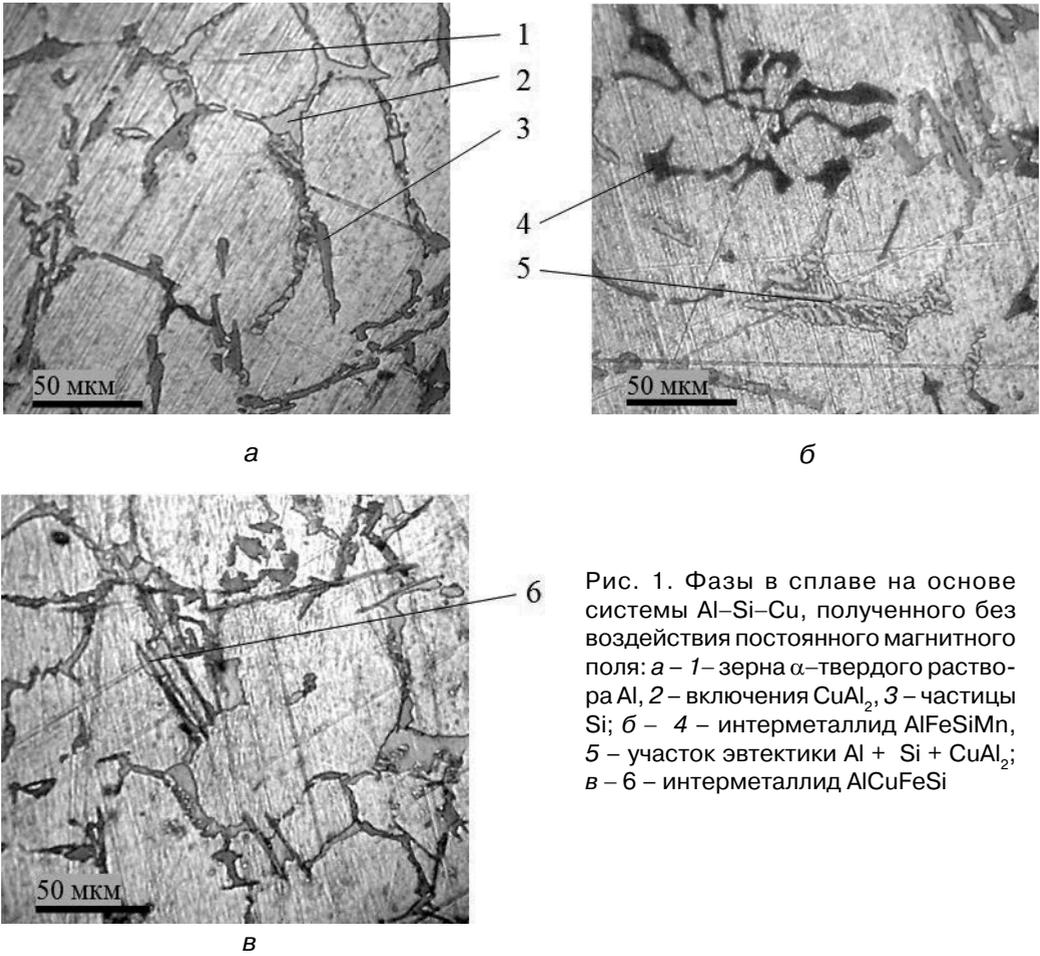


Рис. 1. Фази в сплаве на основе системы Al-Si-Cu, полученного без воздействия постоянного магнитного поля: а – 1 – зерна α -твердого раствора Al, 2 – включения CuAl_2 , 3 – частицы Si; б – 4 – интерметаллид AlFeSiMn, 5 – участок эвтектики Al + Si + CuAl_2 ; в – 6 – интерметаллид AlCuFeSi

Обработка магнитным полем привела к изменению количества фаз в сплаве, наблюдавшихся на поверхности шлифа, вероятно, вследствие перераспределения компонентов сплава между ними. Для контрольного металла значения параметра K фаз, находившихся в межзеренном объеме, приведены в табл. 2. Результат дей-

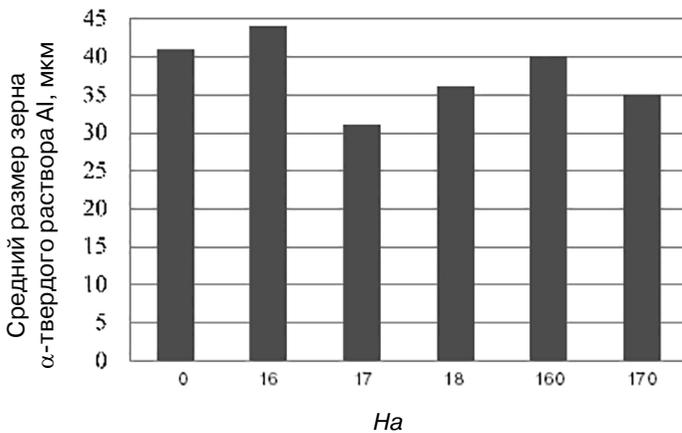


Рис. 2. Зависимость среднего размера зерна α -твердого раствора Al сплава системы Al-Si-Cu от величины индукции магнитного поля, выраженной через число H_a

Таблиця 1

Среднее содержание компонентов сплава в зонах зерен α -твердого раствора Al, полученного при $H_a = 0$, %мас.*

Зона зерна	Al	Si	Cu	Zn	Ti	Sn
Центр зерна	98,3	0,31	0,76	0,57	0,015	0,045
На расстоянии 5 мкм от границы зерна и межзеренного пространства	97,62	0,39	1,16	0,82	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$

* Содержание Fe, Mn и Pb $\leq 0,005$ % в зонах зерна

ствия поля, характеризуемый параметром K_B , показан на рис. 3. Из данного рисунка видно, что магнитное поле сложным образом влияет на количество фаз в сплаве. Наибольшие изменения в структуре сплава происходили для диапазона чисел H_a от 0 до 18, что выразилось в колебаниях значений числа K_B всех фаз сплава. Возрастание индукции поля, отображавшееся десятикратным увеличением H_a (от 16 до 170) не привело к аналогичным различиям в величинах K_B . Наибольшие изменения в количестве фаз сплава произошли в диапазонах значений чисел H_a : Si, $CuAl_2$ и $AlFeSiMn$ – 0–18; $AlCuFeSi$ и $Al + Si + CuAl_2$ – 0–170. В частности, при $H_a = 18$ полем подавлено образование тройной эвтектики, а при $H_a = 160$ – железосодержащей фазы $AlCuFeSi$. Из рис. 3 видно, что для частиц Si в исследованном диапазоне чисел H_a разница между максимальным и минимальным значениями (колебания) K_B составила 0,54. Для фазы $CuAl_2$ она была 0,8; $AlFeSiMn$ – 1,34; $AlCuFeSi$ – 5,24 и тройной эвтектики $Al + Si + CuAl_2$ – 6,46.

Таблиця 2

Значения параметра K фаз, находящихся в межзеренном объеме сплава, полученного при $H_a = 0$

Фаза	Si	$CuAl_2$	$AlFeSiMn$	$AlCuFeSi$	$Al + Si + CuAl_2$
K	0,054	0,015	0,065	0,0042	0,0065

Таким образом, фазы в сплаве можно разделить на 2 группы: 1) K порядка 10^{-2} – Si, $CuAl_2$ и $AlFeSiMn$, K_B порядка 1; 2) K порядка 10^{-3} – $AlCuFeSi$ и $Al + Si + CuAl_2$, K_B порядка 10 (см. табл. 2 и рис. 3). В 1 группе наименьшим образом в диапазоне чисел H_a изменяется количество Si – диамагнетика, в котором компоненты входящие в состав сплава практически не растворяются (растворимость $< 0,01$ %). Колебания K_B фазы $CuAl_2$ больше, чем у Si, вероятно, вследствие того, что в ее составе присутствуют диа- и парамагнетик. Кроме того, по данным [37] в фазе $CuAl_2$ растворяется Al, в частности при 500 °C до 2,5 %. Возможно, магнитная восприимчивость данного соединения более сложным образом зависит от его состава и температуры, чем Si. Тенденция увеличения колебаний K_B усиливается для фазы более сложного состава – $AlFeSiMn$, в которую кроме диа- и парамагнетика входит и ферромагнетик. Фаза $AlFeSiMn$, образуемая на базе соединения $AlFeSi$, содержит Fe и Si, соответственно, в диапазонах: 26,7–27,2 % и 13,8–15,0 % [38]. Количество Mn в данной фазе под воздействием поля существенно не изменяется, о чем свидетельствовала одинаковость ее цвета [39]. В фазе $AlCuFeSi$ 2 группы содержание элементов с разными магнитными восприимчивостями может изменяться в более широком диапазоне, чем у предыдущих, %: Fe – 20–37; Cu – 5–22; Si – 4,6–11 [38]. По отношению к Si, $CuAl_2$, входивших в состав двойных эвтектик и $AlFeSiMn$, которая может формироваться в результате перитектической реакции или непосредственно из расплава [40], фаза $Al + Si + CuAl_2$ является более сложной, содержащей три типа дисперсных включений с разной магнитной восприимчивостью, образующих

Одержання та обробка розплавів

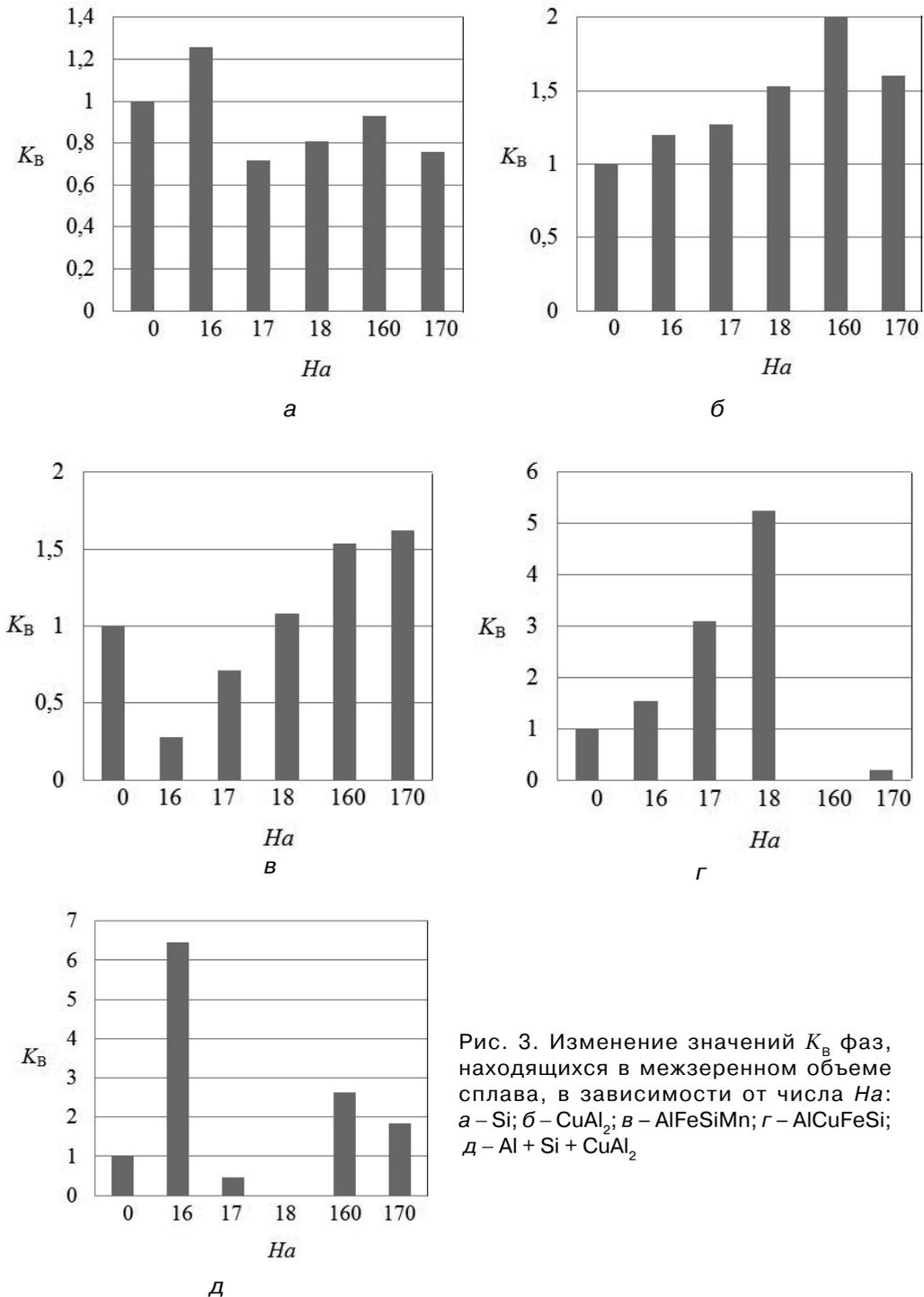


Рис. 3. Изменение значений K_B фаз, находящихся в межзеренном объеме сплава, в зависимости от числа Ha : а – Si; б – CuAl_2 ; в – AlFeSiMn ; г – AlCuFeSi ; д – $\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$

компактные участки. Таким образом, с усложнением состава фазы, расширением диапазона концентраций входящих в нее компонентов и уменьшением ее количества в сплаве, увеличиваются колебания K_B в диапазоне индукций магнитного поля.

Для 2 группы фаз сплава в диапазоне $Ha = 16\text{--}170$ колебания K_B являются противоположными (см. рис. 3, г и д). Вероятно, количество $\text{Al} + \text{Si} + \text{CuAl}_2$ зависит от AlCuFeSi , которая первая образуется во время охлаждения расплава и при температуре на $\sim 100^\circ\text{C}$ выше, чем образования тройной эвтектики – 525°C , с самой низкой температурой затвердевания в сплаве.

Одержання та обробка розплавів

Влияние постоянного магнитного поля на твердость изучаемого сплава также имело нелинейный характер (рис. 4, а). Наибольшей величиной твердости характеризовался металл, полученный в режиме $Ha = 17$ –82,6 *HB* (см. рис. 4, а). В частности, согласно ГОСТ1583-93, твердость сплава АК12М2, отлитого под давлением и термообработанного по режиму Т1, равна 83,4 *HB*. Вероятно, на этот результат повлияло наибольшее измельчение зерна в режиме $Ha = 17$ (см. рис. 2), уменьшение среднего размера включений Si до 9,6 мкм (в 1,14–1,6 раза по сравнению с остальными образцами сплава) и отсутствие их остроконечных форм, а также измельчение включений AlCuFeSi – вдвое по сравнению с контрольным металлом (рис. 5). Сплав, закристаллизованный при $Ha = 18$ –170 со скоростью охлаждения, характерной для песчаных форм, имел значение твердости ≥ 70 (см. рис. 4, а). У отлитого в кокиль сплава, согласно ГОСТ, твердость составляет 70 *HB*.

Наиболее стойким к межкристаллитной коррозии был сплав, полученный с применением магнитного поля в режиме $Ha = 18$. Как видно из рис. 2, д и 4, б, измене-

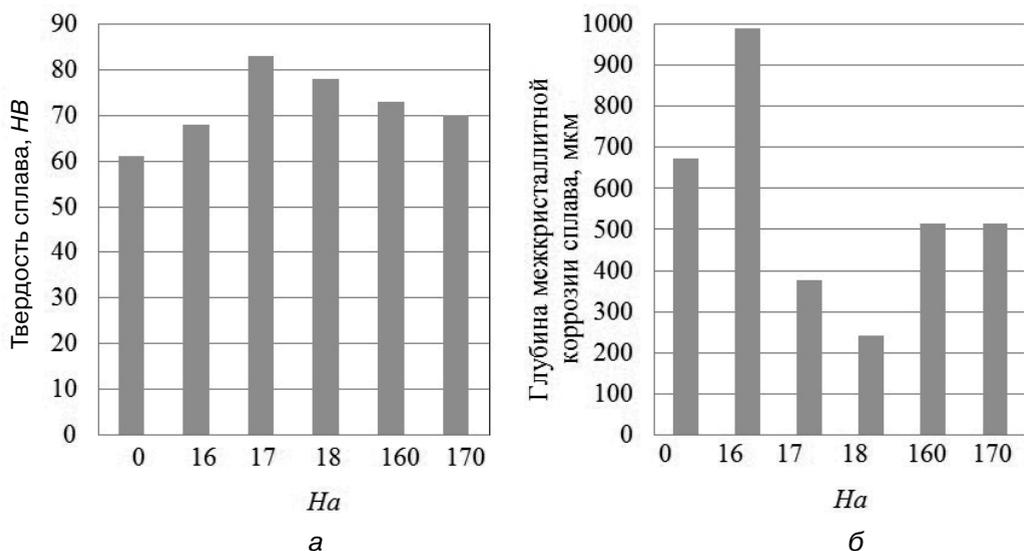


Рис. 4. Зависимость свойств сплава системы Al–Si–Cu от величины числа Ha : а – твердости; б – глубины межкристаллитной коррозии

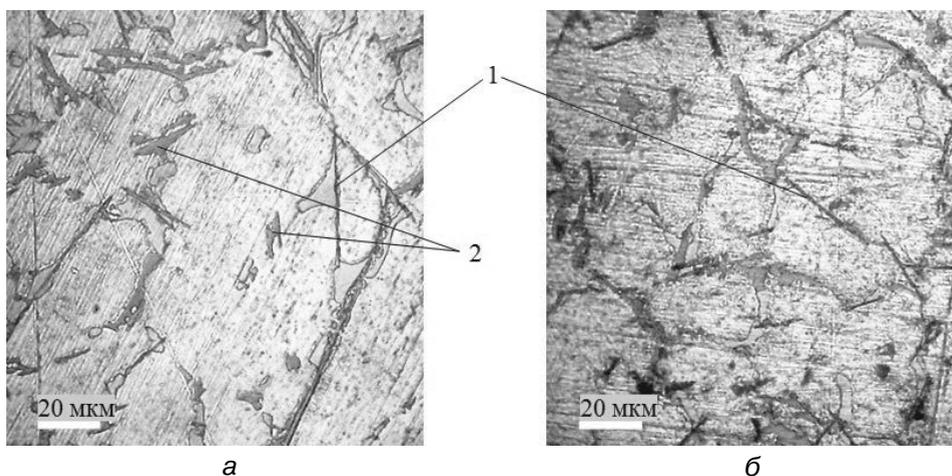


Рис. 5. Структура сплава на базе системы AlSiCu: а – $Ha = 0$; б – $Ha = 17$: 1 – игольчатые включения AlCuFeSi; 2 – остроконечные частицы Si

ние количества областей тройной эвтектики в сплаве и глубины межкристаллитной коррозии в зависимости от величины Ha имеют подобный характер. В частности, при максимальном количестве в сплаве $Al + Si + CuAl_2$ глубина межкристаллитной коррозии также имеет максимальное значение. В случае отсутствия в структуре сплава данной фазы ($Ha = 18$) глубина межкристаллитной коррозии минимальна. Области тройной эвтектики в среднем имели протяженность больше, чем средняя длина включений $CuAl_2$, в 1,3 раза ($Ha = 160$), в 1,8 раза ($Ha = 17$ и 170) и в 2,3 раза ($Ha = 0$ и 16). В результате влияние областей тройной эвтектики с дисперсными, но соединяющимися между собой включениями $CuAl_2$ на глубину межкристаллитной коррозии оказалось большим, чем вклад более крупных, но разделенных интерметаллидов $CuAl_2$ (см. рис. 1 а, б). Так, при $Ha = 18$ в сплаве К для $CuAl_2$ в 1,53 раза больше, чем контрольного сплава, однако вследствие отсутствия тройной эвтектики глубина межкристаллитной коррозии в 2,8 раза меньше (см. рис. 3, б, д и рис. 4, б).

Выводы

- Под воздействием магнитного поля на охлаждающийся и затвердевающий сплав в режиме $Ha = 16$ происходило укрупнение размера зерна, а при $Ha = 17-170$ – измельчение. Наиболее эффективно на измельчение зерна действовала обработка полем в режиме $Ha = 17$. Установлено, что при $Ha = 17$ зерна α -твердого раствора Al насыщались парамагнитными элементами Ti , Sn и диамагнитными Cu и Zn . Насыщение медью зерна литого сплава непосредственно при кристаллизации приближает ее количество к термообработанному состоянию материала. Под воздействием магнитного поля происходило перераспределение компонентов между фазами. Выявлено, что колебания количества фаз в межзеренном объеме сплава в зависимости от величины индукции магнитного поля увеличиваются с усложнением состава и уменьшением количества фазы в сплаве.

- Выяснено, что максимальную твердость сплав имел после его обработки в режиме $Ha = 17$, уровень которой соответствует термообработанному сплаву, полученному при скоростях охлаждения, характерных для литья под давлением. Для других вариантов обработки сплава магнитным полем твердость медленно охлажденного металла соответствовала кокильному литью.

- Определено, что наиболее стойким к межкристаллитной коррозии был сплав, полученный при $Ha = 18$.

- Выявлено, что наибольшим образом на глубину межкристаллитной коррозии влияет количество тройной эвтектики $Al + Si + CuAl_2$.

- Таким образом, с помощью магнитного поля возможно регулировать размер зерна и количество фаз в сплаве, добиваться увеличения содержания меди в зерне сплава непосредственно при его охлаждении и затвердевании. Также повышать твердость и коррозионную стойкость сплава без использования специальных добавок, ускоренного охлаждения и быстроохлажденных модификаторов. Перспектива дальнейших исследований заключается в изучении возможностей применения магнитного поля для уменьшения времени и температуры термообработки сплавов алюминия.

Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Под. общей редакцией И. Н. Фридляндера. Раздел II. Материалы в машиностроении. Том II – 3. – Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
2. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Производство отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 416 с.
3. Гончаренко Е. С., Корнышева И. С. Перспективы применения отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 2012. – № 1. – С. 21–23.
4. Hirsh J., Skrotzki B., Gottstein G. Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Properties. – FRG, Darmstadt: Betz- druck Gmbll. – 2008. – 2504 p.

5. *Kurcharikova L., Tillova E., Uhricik M., Bilan J.* Porosity formation and fatigue properties of AlSiCu Cast Alloy // Machine Modeling and Simulations (MMS 2017). – Materials Web Conference, 2018. – Vol. 157. – P. 9.
6. *Wang Q., Pang X., Wang C., Li Y., He J.* Effects of high magnetic fields on the distribution of solute elements in Al-alloys // Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. – Sendai (Japan), 2006. – pp. 387–390.
7. *Аристова Н. А., Колобнев И. Ф.* Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 144 с.
8. *Кур А. А.* Разработка методик количественной оценки микроструктуры для прогнозирования механических свойств промышленных доэвтектических силуминов: дис... канд. техн. наук 05.16. 01. – Санкт-Петербург, 2017. – 171 с.
9. *Белов Н. А.* Фазовый состав промышленных и перспективных сплавов. – М.: Издательский дом МИСиС, 2010. – 511 с.
10. *Добаткин В. И., Елагин В. И.* Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
11. *Акользин А. П., Жуков А. П.* Кислородная коррозия оборудования химических производств. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
12. *Гулов С. С.* Физико-химические свойства медистых силуминов, легированных элементами подгруппы германия: автореф. канд. физ.-мат. наук: 02. 00. 04. – Душанбе, 2010. – 20 с.
13. *Угай Я. А.* Неорганическая химия. – М.: Высшая школа, 1989. – 463 с.
14. *Химия и технология редких и рассеянных элементов / Под ред. К. А. Большакова.* Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 360 с.
15. *Проблемы развития технологии машиностроения / Под ред. Э. А. Сетели.* – М.: Машиностроение, 1968. – 597 с.
16. *Sugiyama T., Tahashi M., Sassa K., Asai S.* The control of crystal orientation in nonmagnetic metals by imposition of a high magnetic field // Journal of Iron and Steel Research International. – 2003. – Vol. 43. – № 6. – pp. 855–861.
17. *Yu S., Zhongming R., Xi L., Weili R., Yan X.* Effect of a low axial magnetic field on the primary Al₂Cu phase in a directionally solidified Al-Cu hypereutectic alloy // Journal of Crystal Growth. 2011. – Vol. 336. – № 1. – pp. 67–71.
18. *Li X., Fautrelle Y., Gagnoud A., Ren Z., Moreau R.* Investigation on thermoelectric magnetic convection and its effect on solidification structure during directional solidification under an axial magnetic field // Proc. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials. – Dresden: Germany, 2009. – pp. 652–655.
19. *Живодеров В. М., Ананченко Т. О.* Повышение структурной и химической однородности сплава АЛ 4 // Литейное производство. – 1986. – № 5. – С. 7–8.
20. *Dong Y., Shuai S., Yu J., Xuan W., Zhang Z., Wang J., Ren Z.* Effect of high static magnetic field on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified alloy 2024 // Journal of Alloys and Compounds. 2018. – Vol. 749, 15 June. – pp. 978–989.
21. *Ren Z.* Progress in research of solidification of metals under a strong magnetic field // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – Vol. 19, suppl. 1 – 1. – pp. 18–24.
22. *Li X., Ren Z., Fautrelle Y.* Investigation on morphological instability of call and dendrite during directional solidification under a high magnetic field // Proc. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials. – Dresden: Germany, 2009. – pp. 761–764.
23. *Li C., Yang H., Ren Z., Wu Y.* Application of differential thermal analysis to investigation of magnetic field effect on solidification of Al-Cu hypoeutectic alloy // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 505. – № 1. – pp. 108–112.
24. *He J., Wang Q., Wang C., Liu T., Pang X.* Crustal growth and microstructure evolution in solidification processes of metallic materials under high magnetic field conditions // Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. – Sendai (Japan), 2006. – pp. 15–19.
25. *Ban C., Ba Q., Cui J., Zeng G.* Effect of magnetic field on microstructure of tree aluminum alloys in crystallization // Journal Northeast University Nature Science. – 2002. – Vol. 23. – № 8. – pp. 779–782.
26. *Быков В. А.* Магнитная восприимчивость разбавленных сплавов Al-Ce, Al-Dy, Al-Yb при высоких температурах: автореф. канд. физ.-мат. наук: 01. 04. 07. – Екатеринбург, 2007. – 20 с.
27. *Упорова Н. С.* Магнитная восприимчивость интерметаллических соединений Al₂PЗМ и сплавов Al-Y, AlNi-PЗМ при высоких температурах: автореф. канд. физ.-мат. наук: 01. 04. 07. – Екатеринбург, 2011. – 23 с.

28. *Schutze M., Wieser D., Bender R.* Corrosion Resistance of Aluminum and Aluminum Alloys. – Frankfurt (Main): John Wiley & Sons, 2010. – 636 p.
29. *Kolodziejczuk K., Miekos E., Zielinski M., Jaksender M., Szczukocki D., Czarny K., Krawczyk B.* Influence of constant magnetic field on electrodeposition of metals, alloys, conductive polymers and organic reactions // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2018. – Vol. 22, Issue 6. – pp. 1629–1647.
30. *Zheng T., Zhou B., Wang J., Shuai S., Zhang Y., Ren W., Ren Z., Debray F., Beaunon E.* Compression properties enhancement of Al – Cu alloy solidified under 29 T high static magnetic field // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 733, 22 August. – pp. 170–178.
31. *Гельфгат Ю. М., Лиелаусис О. А., Щербинин Э. В.* Жидкий металл под действием электромагнитных сил. – Рига: Зинатне, 1975. – 248 с.
32. *Андронов В. И., Чекин Б. В., Нестеренко С. В.* Жидкие металлы и шлаки: –М.: Metallurgiya, 1977. – 128 с.
33. *Фомин Н. Н., Затуловский С. С.* Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Metallurgiya, 1979. – 247с.
34. *Вонсовский С. В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 870 с.
35. *Чечерников В. И.* Магнитные измерения. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Московского университета, 1969. – 420 с.
36. *Colley L. J., Wells M. A., Mackay R., Kasprzak W.* Dissolution of Second Phase Particles in 319 – Type Aluminum Alloy // *Proceedings of the 26-th ASM Heat Treating Society Conference*. – Cincinnati, Ohio (USA), 2011. – pp. 189–198.
37. *Кузей А. М.* Структурно-фазовые превращения в быстрозакаленных алюминиевых сплавах. – Минск: Litres, 2017. – 380 с.
38. *Чернова Е. П., Гульдин И. Т., Захаров А. М., Арнольд А. А.* Фазовые равновесия в многокомпонентных системах алюминия с медью, железом, кремнием, марганцем и титаном // *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия*. – 1987. – № 5. – С. 73–76.
39. *Буйнов Н. Н., Мальцев М. В., Фридляндер И. Н.* Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов. Справочное руководство. – М.: Metallurgiya, 1971. – 352 с.
40. *Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А.* Металлография цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 372 с.

Поступила 05.11.2019

References

1. *Fridlyander, I. N.* (Ed.) (2001) *Engineering. Encyclopedia. Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials, Section II. Materials in mechanical engineering. Volume II – 3.* Moscow: Mashinostroyeniye, 880 p. [in Russian].
2. *Kurdyumov, A. I., Pikunov, M. V., Chursin, V. M., Bibikov, E. L.* (1986) *Manufacture of castings from alloys of non-ferrous metals.* Moscow: Metallurgiya, 416 p. [in Russian].
3. *Goncharenko, E. S., Kornysheva, I. S.* (2012) Prospects for the use of castings from aluminum alloys. *Liteynoye proizvodstvo*, no. 1, pp 21–23 [in Russian].
4. *Hirsh, J., Skrotzki, B., Gottsetein, G.* (2008) *Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Properties.* FRG: Darmstadt: Betzdruck GmbH, 2504 p. [in English].
5. *Kurcharikova, L., Tillova, E., Uhrick, M., Belan, J.* (2018) Porosity formation and fatigue properties of AlSiCu Cast Alloy. *Machine Modeling and Simulations*, Vol. 157, p. 9. DOI: 10.1051/mateconf/201815707003 [in English].
6. *Wang, Q., Pang, X., Wang, C., Li, Y., He, J.* (2006) Effects of high magnetic fields on the distribution of solute elements in Alalloys. *Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials.* Japan: Sendai p. 387 [in English].
7. *Aristova, N. A., Kolobnev, I. F.* (1977) *Heat treatment of foundry aluminum alloys.* Moscow: Metallurgiya, 144 p. [in Russian].
8. *Kur, A. A.* (2017) *Development of methods for the quantitative assessment of the microstructure for predicting the mechanical properties of industrial aluminum with silicon hypoeutectic alloys* thesis of Dissert. for the Degree of Cand. Techn. Sci. 05.16.01 Petersburg Polytechnic University [in Russian].
9. *Belov, N. A.* (2010) *Phase composition of industrial and advanced alloys.* Moscow: MISiS, 511 p. [in Russian].

10. *Dobatkin, V. I., Elagin, V. I.* (1981) Granular aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 176 p. [in Russian].
11. *Akolzin, A. P., Zhukov, A. P.* (1985) Oxygen corrosion of chemical equipment. Moscow: Khimiya, 240 p. [in Russian].
12. *Gulov, S. S.* (2010) Physical and chemical properties of copper and silicon aluminum alloys doped with elements of the germanium subgroup (Abstract for the Degree of Cand. Phys.-Math. Sci.), Dushanbe: Tajik Technical University [in Russian].
13. *Ugay, Ya. A.* (1989) Inorganic chemistry. Moscow: Vysshaya shkola, 463 p. [in Russian].
14. *Bolshakov, K. A.* (Ed.) (1976) Chemistry and technology of rare and trace elements. Moscow: Vysshaya shkola, 360 p. [in Russian].
15. *Seteli, E. A.* (Ed.) (1968) Problems of development of engineering technology. Moscow: Mashinostroyeniye, 597 p. [in Russian].
16. *Sugiyama, T., Tahashi, M., Sassa, K., Asai, S.* (2003) The control of crystal orientation in nonmagnetic metals by imposition of a high magnetic field. *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 43, no. 6, pp. 855–861 [in English].
17. *Yu, S., Zhongming, R., Xi, L., Weili, R., Yan, X.* (2011) Effect of a low axial magnetic field on the primary Al₂Cu phase in a directionally solidified Al-Cu hypereutectic alloy. *Journal of Crystal Growth*, Vol. 336, no. 1, pp. 67–71 [in English].
18. *Li, X., Fautrelle, Y., Gagnoud, A., Ren, Z., Moreau, R.* (2009) Investigation on thermoelectric magnetic convection and its effect on solidification structure during directional solidification under an axial magnetic field. *Proc. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials*. Germany: Dresden, pp. 652–655 [in English].
19. *Zhivoderov, V. M., Ananchenko, T. O.* (1986) Improving the structural and chemical uniformity of AL 4 alloy. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 5, pp. 7–8 [in Russian].
20. *Dong, Y., Shuai, S., Yu, J., Xuan, W., Zhang, Z., Wang, J., Ren, Z.* (2018) Effect of high static magnetic field on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified alloy 2024. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 749, 15 June, pp. 978–989 [in English].
21. *Ren, Z.* (2012) Progress in research of solidification of metals under a strong magnetic field. *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 19, suppl. 1 – 1, pp. 18–24 [in English].
22. *Li, X., Ren, Z., Fautrelle, Y.* (2009) Investigation on morphological instability of cell and dendrite during directional solidification under a high magnetic field. *Proc. 6th Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials*. Germany: Dresden, pp. 761–764 [in English].
23. *Li, C., Yang, H., Ren, Z., Wu, Y.* (2010) Application of differential thermal analysis to investigation of magnetic field effect on solidification of Al-Cu hypoeutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 505, no. 1, pp. 108–112 [in English].
24. *He, J., Wang, Q., Wang, C., Liu, T., Pang, X.* (2006) Crystal growth and microstructure evolution in solidification processes of metallic materials under high magnetic field conditions. *Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials*. Japan: Sendai, pp. 15–19 [in English].
25. *Ban, C., Ba, Q., Cui, J., Zeng, G.* (2002) Effect of magnetic field on microstructure of tree aluminum alloys in crystallization. *Journal Northeast University Nature Science*, Vol. 23, no. 8, pp. 779–782 [in English].
26. *Bykov, V. A.* (2007) Magnetic susceptibility of dilute Al-Ce, Al-Dy, Al-Yb alloys at high temperatures (Thesis of Disser. for the Degree of Cand. Phys.-Math. Sci.). Institut metallurgii URO RAN [in Russian].
27. *Uporova, N. S.* (2011) Magnetic susceptibility of intermetallic compounds Al₂REM and alloys Al-Y, AlNi-REM at high temperatures (Abstract for the Degree of Cand. Phys.-Math. Sci.). *Uralskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet* [in Russian].
28. *Schutze, M., Wieser, D., Bender, R.* (2010) Corrosion Resistance of Aluminum and Aluminum Alloys. Frankfurt: John Wiley & Sons, 636 p. [in English].
29. *Kolodziejczuk, K., Miekos, E., Zielinski, M., Jaksender, M., Szczukocki, D., Czarny, K., Krawczyk, B.* (2018) Influence of constant magnetic field on electrodeposition of metals, alloys, conductive polymers and organic reactions. *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 22, Issue 6, pp. 1629–1647 [in English].

30. Zheng, T., Zhou, B., Wang, J., Shuai, S., Zhang, Y., Ren, W., Ren, Z., Debray, F., Beaunon, E. (2018) Compression properties enhancement of Al-Cu alloy solidified under 29 T high static magnetic field. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 733, 22 August, pp. 170–178 [in English].
31. Gelfgat, Yu. M., Lielausis, O. A., Shcherbinin, E. V. (1975) Liquid metal under the influence of electromagnetic forces. Riga: Zinatne, 248 p. [in Russian].
32. Andronov, V. I., Chekin, B. V., Nesterenko, S. V. (1977) Liquid metals and slags. Moscow: Metallurgiya, 128 p. [in Russian].
33. Fomin, N. N., Zatulovskiy, S. S. (1979) Electric furnaces and induction heating installations. Moscow: Metallurgiya, 247 p. [in Russian].
34. Vonsovsky, S. V. (1971) Magnetism. Moscow: Nauka, 870 p. [in Russian].
35. Chechernikov, V. I. (1969) Magnetic measurements, 2nd ed., revised. and add. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 420 p. [in Russian].
36. Colley, L. J., Wells, M. A., Mackay, R., Kasprzak, W. (2011) Dissolution of Second Phase Particles in 319 – Type Aluminum Alloy. Proc. of the 26-th ASM Heat Treating Society Conference. USA: Ohio: Cincinnati pp. 189–198. [in English].
37. Kuzei, A. M. (2017) Structural-phase transformations in rapidly quenched aluminum alloys. Minsk: Litres, 380 p. [in Russian].
38. Chernova, E. P., Guldin, I. T., Zakharov, A. M., Arnold, A. A. (1987) Phase equilibria in multicomponent aluminum systems with copper, iron, silicon, manganese, and titanium. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, no. 5, pp. 73–76 [in Russian].
39. Buynov, N. N., Maltsev, M. V., Fridlyander, I. N. (1971) Aluminum alloys. Metallurgy of aluminum and its alloys. Moscow: Metallurgiya, 352 p. [in Russian].
40. Maltsev, M. V., Barsukova, T. A., Borin, F. A. (1960) Metallography of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 372 p. [in Russian].

Received 05.11.2019

О. В. Середенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ДІЯ НА ФАЗИ І ВЛАСТИВОСТІ ЛИТОГО СИЛУМІНУ З МІДДЮ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ, НАКЛАДЕНОГО НА РОЗПЛАВ, ЩО ОХОЛОДЖУЄТЬСЯ І ТВЕРДНЕ

Досліджено дію постійного магнітного поля в діапазоні чисел $H_a = 0-170$ на структуру і властивості литого силуміну з міддю типу АК12М2. За допомогою обробки магнітним полем здійснюється як укрупнення, так і подрібнення зерен сплаву, їхнє насичення парамагнітними елементами Ti , Sn і діамагнітними Cu і Zn , регулювання співвідношення фаз у литій структурі. У результаті рівень твердості сплаву, повільно охолодженого в алундовій формі при дії поля, відповідав термообробленому сплаву, закристалізованому під тиском. Рівень насиченості міддю зерен сплаву, отриманий безпосередньо при кристалізації в полі, був наближений до термообробленого металу. Корозійна стійкість сплаву збільшилась без використання спеціальних добавок. Застосування постійного магнітного поля при кристалізації сплаву дає можливість економії добавок для його легування, модифікування, а також збереження електроенергії.

Ключові слова: силумін з міддю, постійне магнітне поле, розплав, що твердне, структура, твердість, міжкристалічна корозія.

E. V. Seredenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: mgd@ptima.kiev.ua

Physico-technological institute of metals and alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

ACTION ON PHASES AND PROPERTIES OF CAST ALUMINUM ALLOY WITH COPPER AND SILICON OF CONSTANT MAGNETIC FIELD, SUPPOSED ON A COOLING AND SOLIDIFYING MELT

The effect of a constant magnetic field in the range of numbers $Ha = 0-170$ on the structure and properties of cast aluminum alloy with copper and silicon of AK12M2 type is investigated. Using magnetic field treatment, both coarsening and grinding of the grains of the alloy are carried out, they are saturated with paramagnetic elements Ti, Sn and diamagnetic Cu and Zn, and the phase ratio in the cast structure is regulated. As a result, the hardness level of the alloy, slowly cooled in the aluminum form under the influence of the field, corresponded to the heat-treated alloy crystallized under pressure. The level of copper saturation of the grains of the alloy obtained directly during crystallization in the field was close to the heat-treated metal. The corrosion resistance of the alloy increased without the use of special additives. The use of a constant magnetic field during crystallization of the alloy makes it possible to save alloying, modifying additives and electricity.

Keywords: aluminum alloy with copper and silicon, constant magnetic field, solidifying melt, structure, hardness, intergranular corrosion.

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию с 2020 г., должны быть только на украинском или английском языках, а также иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи — не более 12 стр., рисунков — не более 5.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат doc. Для графических материалов — формат jpeg. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.