

PACS numbers: 03.50.De, 61.25.Mv, 61.72.Mm, 64.75.Nx, 81.30.Fb

## **Влияние на зёрна $\alpha$ -твёрдого раствора Al в сплавах Al–Cu постоянного магнитного поля, воздействующего при затвердевании расплава**

Е. В. Середенко

*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,  
03142 Київ, Україна*

Определено, что с помощью постоянного магнитного поля возможно управлять размерами зёрен литого сплава, усиливать эффективность действия модифицирующих элементов, влиять на количество легирующих и примесных компонентов, содержащихся в зёрнах основы сплава. Установлены особенности распределения Cu в зёрнах  $\alpha$ -твёрдого раствора Al, обработанного постоянным магнитным полем, которые определяют их микротвёрдость. Выяснено, что постоянное магнитное поле снижает дендритную ликвацию меди.

**Ключевые слова:** сплав Al–Cu, содержание компонентов в зёрнах, микротвёрдость, постоянное магнитное поле.

Встановлено, що за допомогою постійного магнітного поля можливо управляти розмірами зерен литого стопу, підсилювати ефективність дії модифікуючих елементів, впливати на кількість легуючих і домішкових компонентів, що містяться в зернах основи стопу. Визначено особливості розподілу Cu в зернах  $\alpha$ -твердого розчину Al, обробленого постійним магнітним полем, які обумовлюють їх микротвердість. Вияснено, що постійне магнітне поле знижує дендритну ліквідацію міді.

**Ключові слова:** стоп Al–Cu, вміст компонентів в зернах, микротвердість,

---

Corresponding author: Elena Vladimirovna Seredenko  
E-mail: [mgd@ptima.kiev.ua](mailto:mgd@ptima.kiev.ua)

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine,  
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: E. V. Seredenko, Influence of a Constant Magnetic Field, which Acts during Melt Solidification, on the Grain of Al  $\alpha$ -solid Solution in Al–Cu Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 7: 873–887 (2019), DOI: [10.15407/mfint.41.07.873](https://doi.org/10.15407/mfint.41.07.873).

постійне магнітне поле.

As determined, with the help of a constant magnetic field it is possible to control the size of the grains of the cast alloy, to enhance the efficiency of the modifying elements, and to affect the quantity of alloying and impurity components contained in the grains of the alloy matrix. Specific features of the distribution of Cu in grains of Al  $\alpha$ -solid solution, treated with a constant magnetic field, which determine their micro-hardness, are established. As found, the constant magnetic field reduces a dendritic liquation of copper.

**Key words:** Al–Cu alloy, components' concentration in grains, micro-hardness, constant magnetic field.

*(Получено 11 октября 2018 г.; окончат. вариант — 18 февраля 2019 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития техники увеличивается спрос на конструкционные и функциональные материалы из сплавов и композитов на основе алюминия в различных отраслях: от авиа- и автостроения до бытовой сферы. Медь — наиболее распространенный и важный легирующий элемент для алюминия. Разработан ряд сплавов, в которых медь является главной добавкой. Многие промышленные алюминиевые сплавы содержат медь наряду с другими легирующими элементами в количестве от 1 до 10% масс. [1]. Наибольшее применение из этой группы имеют сплавы с 4 и 8% масс. меди.

Эксплуатационные свойства металлических материалов, в частности полученных методами литья, во многом определяются размерами зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al, количеством компонентов, легирующих зерно и особенностью их распределения внутри кристаллитов. Рост требований к уровню и стабильности свойств металлоизделий радикально не может быть удовлетворен за счет использования традиционных методов обработки: легирования, модифицирования, термического воздействия и т.п. Поэтому актуально развитие новых методов обработки металлов, в том числе постоянными магнитными полями, воздействующими на жидкие и кристаллизующиеся металлические системы, в том числе, на алюминиевой основе. В настоящее время исследования по влиянию постоянного магнитного поля на дендриты в сплавах системы Al–Cu ведутся с использованием чистых компонентов при содержании Cu в широком диапазоне — от 0,85 до 40% масс. преимущественно в условиях направленного затвердевания расплава [2, 3]. Применяются магнитные поля с небольшими значениями индукции ( $B$ ) 0,1–1,0 Тл и более высокими — 1–10 Тл [2–7]. Создание сильных магнитных полей требует дорогостоящего оборудования, поэтому ра-

ционально применение магнитных полей с индукцией до 1 Тл, которые можно реализовать при гораздо меньших затратах. Исследования бинарных систем Al–Cu, Pb–Sn, Sb–Mn, Zn–Cu, а также многокомпонентного сплава Ni–Cr–Mo–Co–Al–Ti–Fe–V–C–Mn–Si–B–P–S показали, что действие магнитного поля имеет сложный характер и может способствовать как измельчению, так и укрупнению зерна [6–11]. При фиксированном уровне индукции влияние поля на размер зерна различных сплавов может быть противоположным [8, 9]. Отмечалось, что с увеличением скорости образования твёрдой фазы при направленном затвердевании сплава эффект измельчения дендритов в магнитном поле ослабляется [11]. Аналогичное изменение размеров зёрен также происходило в сплаве при росте индукции магнитного поля выше критического значения [10]. В работах по исследованию влияния постоянного магнитного поля на литую структуру сплавов даётся только качественная оценка изменениям размеров и морфологии дендритов первичной фазы. Механизм такого неоднозначного влияния поля пока неясен.

Уровень насыщения зерна  $\alpha$ -твёрдого раствора Al медью является важным фактором в упрочнении сплава [12]. Мелкое зерно и повышенное содержание в нём Cu существенно увеличивают эффективность термообработки. Количество Fe в зёрнах определяет твёрдость и прочность металла [13]. Добавки модифицирующих элементов (например, Sc, Ti, Zr, Mn) способствуют измельчению зерна. Из-за различия в физических свойствах компонентов в бинарных сплавах постоянное магнитное поле в ряде случаев действует на них противоположным образом. Так, в слитках сплавов Al–10,6% масс. Mg и Al–5% масс. Cu, закристаллизованных в тиглях под действием сильных магнитных полей (до 12 Тл), растворимость Cu (диамагнетик) в матрице становится больше, а Mg (парамагнетик) меньше с увеличением индукции поля [14]. Повышение растворимости добавки в твёрдой фазе сплавов Al–Cu также отмечалось при их направленном затвердевании в постоянном магнитном поле [15]. В настоящее время недостаточно данных по влиянию магнитного поля с  $B \leq 1,0$  Тл на особенности насыщения зерна  $\alpha$ -твёрдого раствора Al компонентами сплава. Имеются отдельные сведения [16], что под воздействием слабого (до 0,3 Тл) магнитного поля возрастает микротвёрдость дендритов сплава АЛ 4, полученного полунепрерывным литьём. Это связывалось с увеличением растворимости Si, Mn и Fe в  $\alpha$ -твёрдом растворе Al. В направленно закристаллизованных слитках сплава Zn–2,2% ат. Cu под воздействием магнитного поля с индукциями 0,1, 0,3 и 0,5 Тл возрастало содержание меди в твёрдой фазе [11].

На структуру и свойства литого сплава оказывает сильное влияние дендритная ликвация, вызванная неравновесными условиями кристаллизации сплавов, затвердевающих в интервале температур,

для сплавов эвтектического типа выражающаяся в резком возрастании концентрации второго компонента в сравнительно узком слое. Академиком А. А. Бочваром была предложена качественная зависимость степени дендритной ликвации от скорости затвердевания, количественно исследованная впоследствии для разных температур термовременной обработки жидких сплавов на основе алюминия и скоростей их охлаждения. Результаты показали, что максимум неоднородного распределения легирующего компонента возникает в диапазоне скоростей охлаждения, реализуемых при традиционных методах литья ( $10^{-3}$ – $1$  К/с) [17, 18]. Для устранения неоднородного распределения легирующих элементов и примесей в зёрнах сплава применяется диффузионный отжиг, являющийся длительной и энергозатратной технологической операцией.

Использование воздействия магнитного поля на размеры зёрен сплавов, а также на содержание в них легирующих компонентов, в частности, для системы Al–Cu сдерживается из-за отсутствия систематизации экспериментальных данных по влиянию магнитного поля на размеры зёрен основы сплава, недостаточной изученности особенностей распределения компонентов в  $\alpha$ -твёрдом растворе Al при кристаллизации сплавов, характерной для обычных способов литья.

Цель работы заключалась в исследовании влияния постоянного магнитного поля с индукцией 0–1 Тл на размер зерна и микротвёрдость бинарных сплавов системы Al–Cu, а также особенностей распределения компонентов, являющихся модификаторами и примесями в  $\alpha$ -твёрдом растворе Al, во взаимосвязи с размером зерна основы сплава, его структурой и микротвёрдостью.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Цикл исследований влияния постоянного магнитного поля (до 1 Тл) на процессы структурообразования сплавов был начат при медленном охлаждении расплавов ( $\sim 1$  К/с) в статических условиях.

Было проведено три серии экспериментов. Целью серии I было установление влияния содержания Cu и величины индукции магнитного поля на размер и микротвёрдость зёрен бинарных сплавов. В серии II экспериментов изучалось совместное влияние модифицирующих элементов и магнитного поля на размер и микротвёрдость зёрен. Влияние магнитного поля на содержание компонентов в  $\alpha$ -твёрдом растворе Al, дендритную ликвацию меди исследовалось в серии III экспериментов.

В I серии экспериментов были приготовлены бинарные сплавы на основе алюминия с содержанием Cu 2, 4, 8 и 16% масс. Количество компонентов в сплаве II и III серии экспериментов составляло, % масс.: легирующего элемента Cu — 3,7; модифицирующих элемен-

тов Mn, Ti, Zr —  $\sim 0,01$ ; примесей Fe —  $\sim 0,2$  и Si —  $\sim 0,1$ .

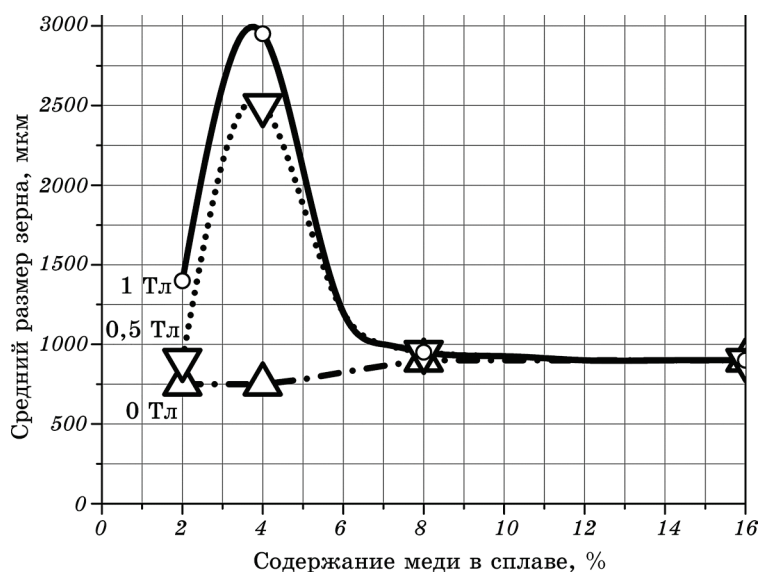
Масса компонентов сплавов определялась с помощью лабораторных весов типа ЗЛГ. Сплавы массой 5 г готовились в печи электросопротивления с нихромовым нагревателем в цилиндрических алундовых тиглях. Температура металла в тигле и температура печного пространства контролировалась термопарами типа ТХА и прибором М4231. После расплавления компонентов расплав перегревался на 150 К выше температуры солидуса и выдерживался при данной температуре 10 мин. Во время выдержки производилось перемешивание расплава в тигле молибденовым стержнем диаметром 1,5 мм. Затем тигель с расплавом извлекался из печи и помещался в зазор электромагнита, где охлаждался и затвердевал при воздействии постоянного магнитного поля. В I серии экспериментов величина индукции магнитного поля была 0,5 и 1,0 Тл. Во II и III сериях значения индукции составили — 0,1, 0,25, 0,5, 0,75 и 1,0 Тл. Контрольные образцы сплавов получались без воздействия магнитного поля, величина электротока контролировалась прибором типа М4213. Магнитная индукция в зазоре электромагнита измерялась теслоамперметром Ф4354/1 при варьировании величины электротока в системе питания магнита.

Влияние постоянного магнитного поля на размеры зёрен сплавов и содержание в них компонентов сплава изучалось в плоскости разреза образцов параллельной силовым линиям магнитного поля и проходящей по их вертикальной оси. Металлографические исследования литой структуры проводились с помощью оптического металлографического микроскопа МЕТАМ-Р1 на шлифах, травленных раствором, состоящем из 2% HF, 30% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH и 68% H<sub>2</sub>O. Размеры зёрен определялись согласно ГОСТ 5639-82 методом подсчёта пересечений границ зёрен. Количество микрообъёмов с разным содержанием меди, входящих в зерно, определялось на основе ГОСТ 1778-70 (метод Л). Количество компонентов в зёрнах сплава определялось с помощью микроанализатора REMMA-102 (точность измерения 0,01%, диаметр локальной зоны измерения  $\sim 1$  мкм, пятно рассеяния пучка электронов  $\sim 3$  мкм) на нетравленных шлифах контрольного сплава и обработанного магнитным полем с индукцией 0,1, 0,25 и 0,5 Тл. При анализе особенностей дендритной ликвации Cu в зёрнах сплава переходом от центральной зоны зерна к его периферии принимался участок в сечении зерна (шириной до 5 мкм) при переходе через который содержание меди резко возрастало (в  $\sim 2$  раза) по сравнению с центром зерна. Изменение содержания меди в центральной зоне и периферии характеризовалось отношением разницы её концентраций между началом и концом зон ( $\Delta C$ , % масс.) к протяжённости участка, на котором это изменение произошло ( $l_c$ , мкм). Соотношение  $\Delta C/l_c$  характеризовало дендритную ликвацию меди. Для зоны периферии крайняя точка измерения со-

держания меди располагалась на расстоянии 3 мкм от границы зерна с межзёренным пространством, что исключало перекрытие пучком электронов области межзёренного пространства. Микротвёрдость зёрен сплава для всех значений индукции поля измерялась на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа литых структур контрольных сплавов в I серии экспериментов показали, что при содержании Cu в сплаве от 2 до 4% масс. размер зерна контрольных сплавов не изменяется. С увеличением количества Cu до 6–8% масс. размер зерна в них незначительно возрастал — в 1,2 раза (рис. 1). Влияние магнитного поля на размер зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al имело сложный характер. В диапазоне концентраций 2–8% масс. Cu зерно укрупняется, а при 16% масс. Cu влияния магнитного поля не выявлено. При 4% масс. Cu произошёл наиболее резкий рост зёрен сплава по сравнению с контрольным сплавом с 2% масс. Cu — в 3,3 раза при  $B = 0,5$  Тл и в 4 раза при  $B = 1,0$  Тл (см. рис. 1). Отмечено, что наибольшее изменение размера зерна в сплаве произошло при концентрации легирующего элемента, близкой к границе максимального насыщения



**Рис. 1.** Зависимости размера зерна бинарных сплавов Al–Cu от содержания меди в сплаве и индукции постоянного магнитного поля.

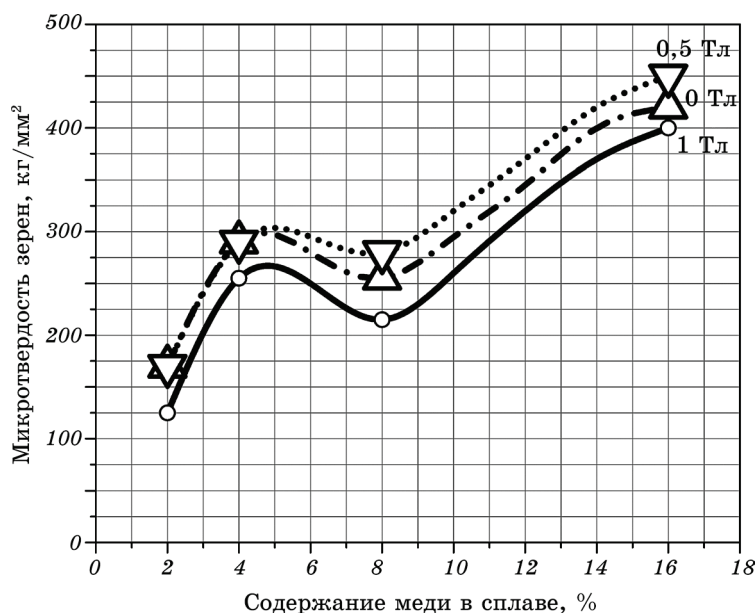
**Fig. 1.** Dependences of grain size of Al–Cu binary alloys on the copper content in the alloy and induction of a constant magnetic field.

зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al медью согласно равновесной диаграмме состояния.

С ростом содержания Cu в образцах контрольных сплавов микротвёрдость зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al возрастала нелинейным образом (рис. 2). Наложение постоянного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл увеличило данную характеристику при условии превышения концентрации Cu в сплаве 4% масс. Увеличение значения индукции магнитного поля до 1 Тл привело к противоположному эффекту — уменьшению микротвёрдости  $\alpha$ -твёрдого раствора Al для всех исследованных составов.

Исходя из полученных данных, изучение комплексного воздействия модификаторов и постоянного магнитного поля проводился на сплаве с содержанием Cu, при котором произошло максимальное увеличение размера зерна сплава, а изменение микротвёрдости было неоднозначным (3,7% масс.).

Добавка в бинарный сплав модифицирующих элементов привела к существенному уменьшению размера зерна в контрольных образцах сплава — более чем в 10 раз (рис. 3 и см. рис. 1). Наложение на затвердевающий расплав постоянного магнитного поля с индукцией  $B < 0,5$  Тл и  $B > 0,5$  Тл усилило действие модификаторов. Тен-

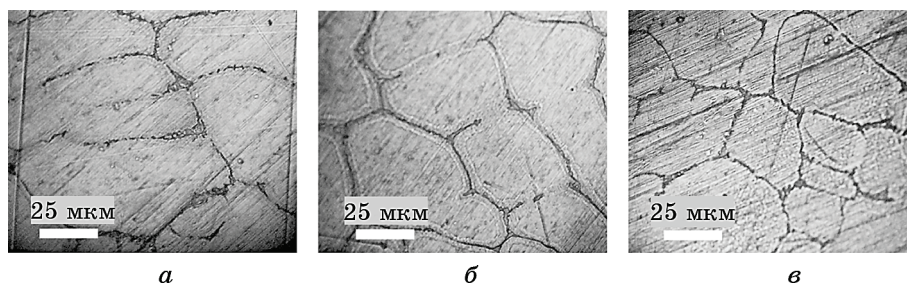


**Рис. 2.** Влияние содержания меди и индукции магнитного поля на микротвёрдость зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al бинарных сплавов Al–Cu.

**Fig. 2.** Influence of copper content and magnetic field induction on microhardness of grains of Al  $\alpha$ -solid solution of binary Al–Cu alloys.

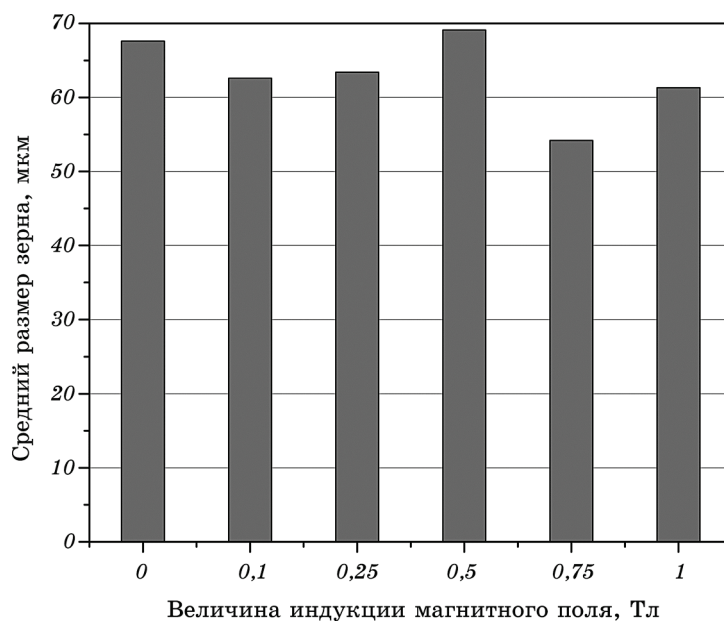
денция к укрупнению зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al, наблюдаемая в бинарном сплаве, сохранилась только при  $B = 0,5$  Тл — средний размер зерна увеличился незначительно (в 1,02 раза) (рис. 4).

Наибольшим образом влияние модификаторов было усилено полем с индукцией 0,75 Тл (в 1,25 раза по сравнению с контрольным



**Рис. 3.** Структура сплава Al–3,7% Cu с модификаторами:  $B = 0$  Тл (а),  $B = 0,5$  Тл (б),  $B = 0,75$  Тл (в).

**Fig. 3.** The structure of Al–3.7% Cu alloy with modifiers:  $B = 0$  T (a),  $B = 0.5$  T (б),  $B = 0.75$  T (в).



**Рис. 4.** Влияние постоянного магнитного поля на размер зерна сплава Al–3,7% Cu с модификаторами.

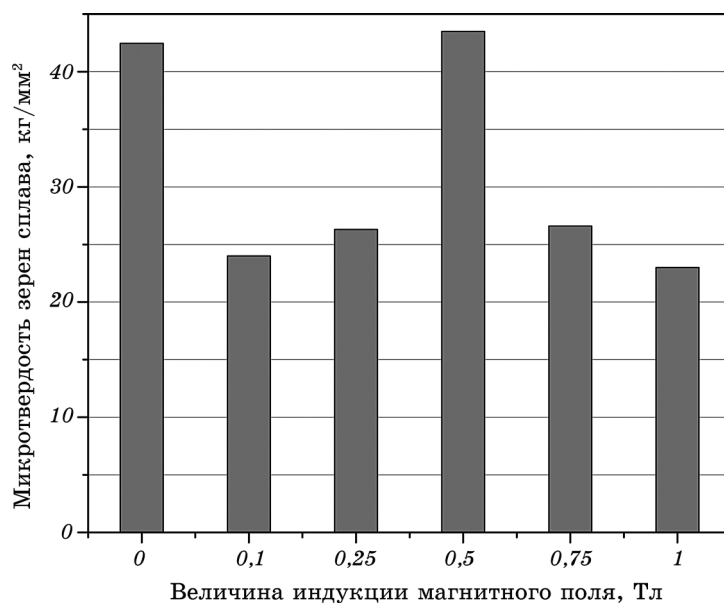
**Fig. 4.** Effect of a constant magnetic field on the grain size of the Al–3.7% Cu alloy with modifiers.



сплавом, содержащим модификаторы). Десятикратное увеличение индукции поля от 0,1 до 1 Тл почти не снизило размеры зёрен сплава (в 1,02 раза).

Измерение микротвёрдости зёрен сплава показало, что её значение при обработке сплава полем с индукцией 0,5 Тл существенно отличается от величин, полученных в остальных вариантах (до 1,8 раза) между которыми различия были не более 1,2 раза (рис. 5). Исходя из данных рис. 4 и 5, для установления причин изменения размеров зёрен и их микротвёрдости с помощью сканирующего электронного микроскопа были исследованы сплавы, полученные под воздействием поля с индукциями 0, 0,1, 0,25 и 0,5 Тл. Эти значения индукции выбраны как характерные режимы обработки, сочетающие наибольшие изменения характеристик  $\alpha$ -твёрдого раствора Al и существенно более дешёвые в реализации на практике. Влияние поля с большими значениями индукции оценивалось на базе полученных результатов.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что под воздействием магнитного поля происходит перераспределение компонентов сплава между зерном и межзёренным пространством. Определено, что с увеличением количества модификаторов Ti и Mn

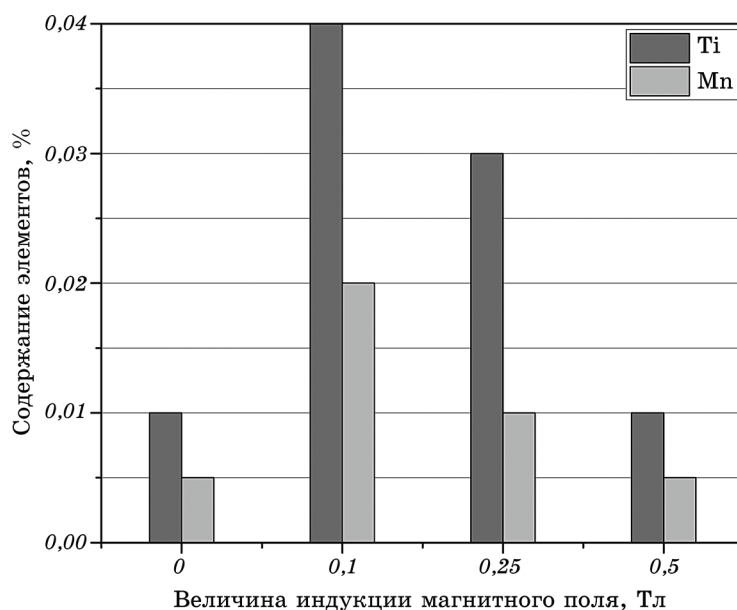


**Рис. 5.** Влияние магнитного поля на микротвёрдость зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al сплава Al–3,7% Cu с модификаторами.

**Fig. 5.** Influence of the magnetic field on the microhardness of grains of Al  $\alpha$ -solid solution of Al–3.7% Cu alloy with modifiers.

в центральной зоне всего зерна размер зёрен сплава уменьшался, а при снижении их содержания возрастал (рис. 6 и см. рис. 4). Так же измельчение зерна сопровождалось возрастанием содержания Zr (более чем вдвое) на расстоянии  $\sim 12$  мкм от границы зерна по сравнению с контрольным сплавом и обработанным полем с  $B = 0,5$  Тл.

По данным микрорентгеноспектрального анализа распределение Си в объёме зёрен было неоднородно — её количество в центральной зоне зерна меньше, чем на периферии. В центре зерна контрольного сплава содержание Си было на уровне 1,5% масс. Наложение магнитного поля с индукцией 0,1 Тл не повлияло на данный показатель. При возрастании индукции до 0,25 Тл содержание меди в центре зерна несколько возросло (в 1,2 раза), а до 0,5 Тл — снизилось в 1,5 раза. С удалением от центра зерна к области, разделяющей его центральную зону и периферию, происходило небольшое нарастание содержания Си. В контрольном сплаве  $\Delta C/l_c = 0,019\%$  масс./мкм, а в обработанном магнитным полем с индукциями 0,1, 0,25 и 0,5 Тл величина  $\Delta C/l_c$  имела значения 0,013, 0,056 и 0,03% масс./мкм соответственно. Для контрольного сплава резкое возрастание содержания меди происходило на расстоянии 6 мкм от границы зерна.

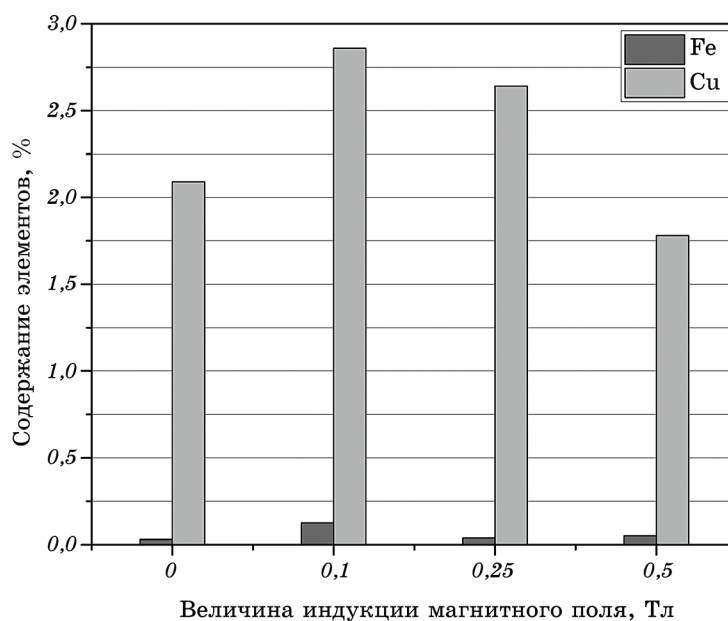


**Рис. 6.** Влияние магнитного поля на содержание модифицирующих элементов в центре зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al сплава Al–3,7% Cu.

**Fig. 6.** Influence of the magnetic field on the content of modifying elements in the centre of grains of Al  $\alpha$ -solid solution of Al–3.7% Cu alloy.

Аналогичный рост концентрации Cu при наложении магнитного поля с индукцией 0,1 Тл отмечен на расстоянии 9 мкм, 0,25 Тл — 6 мкм и 0,5 Тл — на уровне 12 мкм от границы зерна. На периферии зерна в зоне, максимально приближенной к его границе (на расстоянии 3 мкм от неё), было зафиксировано наибольшее количество меди для всех сплавов. В контрольном сплаве это различие между центром зерна и данной зоной составило 2,3 раза. Под воздействием магнитного поля с индукцией 0,1, 0,25 и 0,5 Тл это различие увеличилось в 4 и 2,5 и 3 раза соответственно. Нарастание содержания меди в периферийной зоне характеризовалось значениями  $\Delta C/l_c$  для  $B = 0, 0,1, 0,25$  и  $0,5$  Тл соответственно 1,14, 0,54, 0,43 и 0,14% масс./мкм. Увеличение содержания меди в центральной зоне зерна по мере удаления от центра и его уменьшение на периферии под воздействием магнитного поля благоприятно для выравнивания содержания легирующего элемента в объёме зерна при термообработке. Среднее количество меди в зерне при учёте её количества в центральной зоне и периферии возросло при  $B < 0,5$  Тл ( $B = 0,1$  Тл в 1,4 раза и  $B = 0,25$  Тл в 1,3 раза) и снизилось при  $B = 0,5$  Тл (в 1,2 раза) (рис. 7).

Сопоставление данных результатов с величинами микротвёрдо-

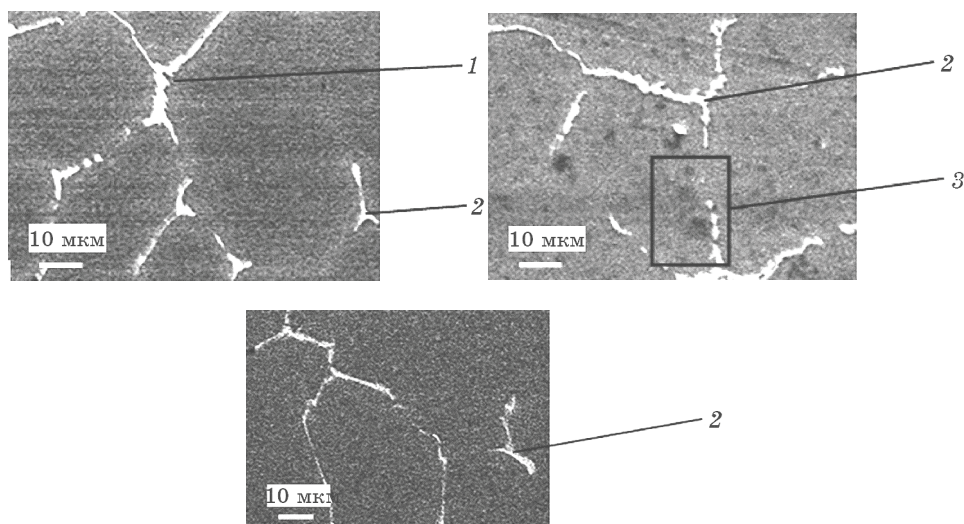


**Рис. 7.** Влияние магнитного поля на содержание легирующего (Cu) и примесного (Fe) элементов в зернах сплава Al–3,7% Cu.

**Fig. 7.** Effect of magnetic field on the content of alloying (Cu) and impurity (Fe) elements in the grains of the Al–3.7% Cu alloy.

сти зёрен сплава показало, что с ростом содержания меди в  $\alpha$ -твёрдом растворе Al его микротвёрдость понижается (см. рис. 5 и 7). Вероятно, на данное свойство повлияло не только количество легирующего компонента, а и особенность структуры зёрен, обусловленная действием магнитного поля.

На изображениях структур зёрненной основы сплавов, полученных на сканирующем электронном микроскопе REMMA-102 в режиме отражённых электронов, видно, что она неоднородна и представляет собой основу —  $\alpha$ -твёрдый раствор Al, на фоне которого выделяются более тёмные микрообъёмы, не имеющие чёткой межфазной поверхности. С помощью микроанализатора было качественно идентифицировано, что они отличаются от матричной фазы пониженным содержанием меди. Часть этих микрообъемов была обособлена, остальные соединялись в цепочки и компактные конгломераты. В контрольном сплаве общее количество этих образований на единице площади шлифа ( $q$ ,  $\text{мм}^{-2}$  — количество единиц на  $1 \text{ мм}^2$ ) составляло  $q = (0,9 \pm 0,15) \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$  (рис. 8, а). Размер микрообъемов был  $\sim 0,7 \text{ мкм}$ . Соотношение количества соединённых



**Рис. 8.** Особенности структуры зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора Al:  $B = 0 \text{ Тл}$  (а),  $B = 0,25 \text{ Тл}$  (б),  $B = 0,5 \text{ Тл}$  (в); 1 — зона вблизи границ зёрен, обогащённая микрообъёмами, содержащими Cu; 2 — межзёренное пространство; 3 — компактные скопления микрообъемов, обеднённых Cu.

**Fig. 8.** The structural features of the grains of the Al  $\alpha$ -solid solution:  $B = 0 \text{ T}$  (а),  $B = 0,25 \text{ T}$  (б),  $B = 0,5 \text{ T}$  (в); 1 is a zone near grain boundaries enriched with micro-volumes containing Cu; 2 is an intergranular space; 3 are compact clusters of micro-volumes depleted with Cu.

включений к обособленным составляло 6:1. Цепочки в среднем содержали по 6 микрообъёмов и компактные конгломераты по 3–4.

Под воздействием поля с индукцией 0,25 Тл размер тёмных микрообъёмов не изменился; в структуре зерна возникли компактные округлые скопления из этих микрообъёмов (включающие их до 35 штук), зафиксированные в плоскости шлифа. Размеры скоплений микрообъёмов доходили до 6 мкм. В окружающей их основе число  $q$  тёмных микрообъёмов незначительно отличалось от такового в контрольном сплаве (в пределах погрешности измерения; см. рис. 8, б). В скоплениях тёмных микрообъёмов их количество было в 2,4 раза больше, чем в окружающем поле зерна. За счёт возникновения такого типа микроликвации соотношение количества соединённых включений к обособленным в основе сплава несколько уменьшилось по сравнению с контрольным металлом (до 5:1). Цепочки микрообъёмов не изменились. Магнитное поле с индукцией 0,5 Тл увеличило количество тёмных микрообъёмов по сравнению с контрольным сплавом в 1,7 раза при уменьшении их размера до  $\sim 0,6$  мкм. Распределение включений, наблюдаемое в плоскости шлифа, стало более однородным — соотношение соединённых и обособленных микрообъёмов уменьшилось и составило 3:1, количество включений в цепочке сократилось до 5, конгломераты микрообъёмов были аналогичны контрольному металлу (см. рис. 8, в).

Под воздействием магнитного поля произошло увеличение содержания железа в зёрнах  $\alpha$ -твёрдого раствора Al за счёт его перераспределения между зерном и межзёренным пространством. По сравнению с контрольным металлом среднее количество железа в зёрнах выросло при  $B = 0,1$  Тл в 4,1 раза, при  $B = 0,25$  Тл в 1,2 раза и при  $B = 0,5$  Тл в 1,9 раза (см. рис. 6). Тенденция повышения содержания в зёрнах под воздействием поля проявилась и для Si, в большей степени при  $B = 0,1$  Тл.

#### 4. ВЫВОДЫ

Установлено, что при охлаждении бинарного сплава Al–Cu со скоростью  $\sim 1$  К/с постоянное магнитное поле вызывает увеличение размера зерна, особенно для составов сплавов близких к концентрации максимального насыщения медью  $\alpha$ -твёрдого раствора Al (4% масс.).

Выяснено, что постоянное магнитное поле вызывает перераспределение компонентов сплава между зерном и межзёренным пространством в структуре сплава. За счёт этого магнитное поле с индукциями  $B < 0,5$  Тл и  $B > 0,5$  Тл усиливает действие модификаторов Zr, Ti, Mn по измельчению зёрен сплава, вследствие увеличения их количества в зёрнах  $\alpha$ -твёрдого раствора Al. Поле с индукцией 0,5 Тл уменьшает количество модификаторов в зерне и ослабляет

их влияние. Постоянное магнитное поле при  $B < 0,5$  Тл и  $B > 0,5$  Тл повышает содержание Си в зёрнах  $\alpha$ -твёрдого раствора Al, а при  $B = 0,5$  Тл — понижает. Действие магнитного поля способствует повышению количества Fe и Si в зёрнах сплава.

Определено, что повышение легированности зёрен основы сплава Си сопровождается уменьшением их микротвёрдости вследствие увеличения неоднородности распределения обеднённых медью микрообъёмов в объёме зерна. Выявлено, что постоянное магнитное поле понижает дендритную ликвацию меди.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ф. Мондольфо, *Структура и свойства алюминиевых сплавов* (Москва: Металлургия: 1979).
2. S. Haifang, G. Chunlei, and L. Qing, *Nonferrous Metals*, No. 1: 14 (2003).
3. Y. Shen, R. Zhongming, L. Xi, R. Weili, and X. Yan, *J. Crystal Growth*, **336**, No. 1: 67 (2011).
4. Z. Ren, *J. Iron and Steel Research International*, **19**, Supl. 1: 18 (2012).
5. G. Zhigu, X. Fengling, and Z. Weiqiang, *Spec. Cast. Nonferrous Alloys*, **27**, No. 1: 16 (2007).
6. Ю. В. Казаков, В. А. Блинков, Т. П. Половинкина, *Физика и химия обработки материалов*, № 2: 77 (1975).
7. Г. Н. Панкин, В. О. Есин, В. В. Пономарев, А. И. Катаев, *Тезисы докладов 12<sup>го</sup> Рижского совещания по МГД* (Саласпилс: Издательство Института физики АН Латвийской ССР: 1987), том. 2, с. 107.
8. T. Liu, Q. Wang, C. Zhany, A. Gao, C. Lou, and J. He, *Proc. 7-th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD* (Pusgu le de Gience: France: 2008), vol. 1, p. 203.
9. W. L. Ren, Z. M. Ren, T. Zhang, J. W. Dong, X. Li, Y. B. Zhong, K. Deng, Z. S. Lei, and J. T. Gua, *Proc. 6-th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials* (Dresden: Germany: 2009), p. 792.
10. J. Yu, D. Du, Z. Ren, Y. Fautrelle, R. Moreau, and X. Li, *ISIJ International*, **57**, No. 2: 337 (2017).
11. Z. Lu, Y. Zhang, Z. Ren, Y. Fautrelle, and X. Li, *ISIJ International*, **57**, No. 1: 84 (2017).
12. Н. А. Аристова, И. Ф. Колобнёв, *Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов* (Москва: Металлургия: 1977).
13. Q. Wang, X.-J. Pang, C.-J. Wang, Y.-B. Li, and J.-C. He, *Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials* (Sendai: Japan: 2006), p. 387.
14. В. М. Живодёров, Т. О. Ананченко, *Литейное производство*, № 5: 7 (1986).
15. S. He, C. Li, R. Guo, W. Xuan, Z. Ren, X. Li, and Y. Zhong, *ISIJ International*, **58**, No. 5: 899 (2018).

## REFERENCES

1. L. F. Mondol'fo, *Struktura i Svoystva Alyuminievykh Splavov* [Structure and

- Properties of Aluminium Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1979) (in Russian).
2. S. Haifang, G. Chunlei, and L. Qing, *Nonferrous Metals*, No. 1: 14 (2003).
3. Y. Shen, R. Zhongming, L. Xi, R. Weili, and X. Yan, *J. Crystal Growth*, **336**, No. 1: 67 (2011).
4. Z. Ren, *J. Iron and Steel Research International*, **19**, Supl. 1: 18 (2012).
5. G. Zhigu, X. Fengling, and Z. Weiqiang, *Spec. Cast. Nonferrous Alloys*, **27**, No. 1: 16 (2007).
6. Yu. V. Kazakov, V. A. Blinkov, and T. P. Polovinkina, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 2: 77 (1975) (in Russian).
7. G. N. Pankin, V. O. Esin, V. V. Ponomarev, and A. I. Kataev, *Proc. 12-th MHD Riga Symposium* (Salaspils: Izdatel'stvo Instituta Fiziki AN Latvyskoy SSR: 1987), vol. 2, p. 107 (in Russian).
8. T. Liu, Q. Wang, C. Zhany, A. Gao, C. Lou, and J. He, *Proc. 7-th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD* (Pusgu le de Gience: France: 2008), vol. 1, p. 203.
9. W. L. Ren, Z. M. Ren, T. Zhang, J. W. Dong, X. Li, Y. B. Zhong, K. Deng, Z. S. Lei, and J. T. Gua, *Proc. 6-th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials* (Dresden: Germany: 2009), p. 792.
10. J. Yu, D. Du, Z. Ren, Y. Fautrelle, R. Moreau, and X. Li, *ISIJ International*, **57**, No. 2: 337 (2017).
11. Z. Lu, Y. Zhang, Z. Ren, Y. Fautrelle, and X. Li, *ISIJ International*, **57**, No. 1: 84 (2017).
12. N. A. Aristova and I. F. Kolobnev, *Termicheskaya Obrabotka Liteynykh Alyuminievykh Splavov* [Heat Treatment of Foundry Aluminium Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1977) (in Russian).
13. Q. Wang, X.-J. Pang, C.-J. Wang, Y.-B. Li, and J.-C. He, *Proc. 5-th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials* (Sendai: Japan: 2006), p. 387.
14. V. M. Zhivoderov and T. O. Ananchenko, *Liteynoe Proizvodstvo*, No. 5: 7 (1986) (in Russian).
15. S. He, C. Li, R. Guo, W. Xuan, Z. Ren, X. Li, and Y. Zhong, *ISIJ International*, **58**, No. 5: 899 (2018).