

УДК 669.715: 538.12: 669.265

**В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, А. В. Косинская,  
Ж. Д. Богатырева, Е. А. Набока**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cr**

*Исследована структура алюминиевых сплавов, содержащих до 2 % мас. Cr, затвердевших в постоянном однородном магнитном поле с индукцией до 1,0 Тл при медленном охлаждении. Изменения структуры и морфологии фаз, происходящие под действием поля, способствуют повышению микротвердости и износостойкости сплавов.*

**Ключевые слова:** сплавы Al-Cr, затвердевание, постоянное магнитное поле, структура.

*Досліджена структура алюмінієвих сплавів з вмістом до 2 % мас. Cr, які тверднули в постійному магнітному полі з індукцією до 1,0 Тл при повільному охолодженні. Зміна структури та морфології фаз, які відбувались під дією поля, сприяли підвищенню микротвердості та зносостійкості сплавів.*

**Ключові слова:** сплави Al-Cr, твердіння, постійне магнітне поле, структура.

*The structure of Al alloys with Cr content up to 2 % wt. solidified in a constant homogeneous magnetic field with induction up to 1 tesla during slow cooling was investigated. It was shown that the change of structure and morphology under the influence of this field help to increase the microhardness and resistance to wear of alloy.*

**Keywords:** alloys of Al-Cr, hardening, permanent magnetic field, structure.

**А**люминий, его сплавы и композиты занимают лидирующие позиции среди конструкционных и функциональных материалов по росту применения в различных отраслях техники. Повышение требований к уровню и стабильности свойств металлоизделий не всегда удовлетворяется за счет традиционных способов их обработки. Это вызывает необходимость развития новых методов воздействия на металлы, в том числе постоянными магнитными полями, как на жидкие, так и кристаллизующиеся металлические системы.

Процессы, происходящие в расплавленных и затвердевающих металлах под воздействием постоянных магнитных полей, на микроуровне очень сложные, а механизмы такого влияния раскрыты лишь частично.

В сплавах алюминия с рядом элементов (железо, марганец, никель, хром, медь и другие) в связи с уменьшением растворимости легирующих добавок при переходе системы из жидкого состояния в твердое выделяются интерметаллидные фазы, имеющие магнитные проницаемости и удельные электропроводимости, отличающиеся от матричного расплава. Это дает возможность осуществлять целенаправленное

воздействие постоянных магнитных полей на характеристики отдельных фаз (дисперсность, форму, распределение структурных составляющих и т. п.) [1-6].

С целью использования постоянных магнитных полей с небольшой индукцией (до 1 Тл) при медленном охлаждении и кристаллизации сплавов эвтектической системы Al-Fe (до 6 %мас.) [5] и Al-Ni (до 10 %мас.) [6] установили, в частности, что действие поля приводит к существенному увеличению микротвердости интерметаллидных фаз. Определили также, что такое влияние магнитного поля усиливается с увеличением концентрации легирующих добавок в сплавах. При этом наибольшее повышение микротвердости фаз произошло под действием поля с индукцией 0,1-0,5 Тл, а сплавы, подвергнутые такому воздействию, обладали повышенной стойкостью к изнашиванию.

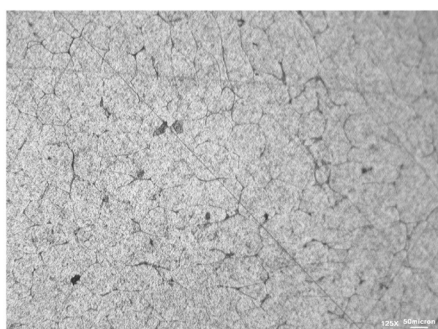
С целью установления особенностей влияния постоянного магнитного поля на алюминийевые сплавы с перитектическим типом диаграммы состояния, которые ранее не были объектом исследования, выбрали систему Al-Cr. Микротвердость интерметаллидной фазы  $\text{CrAl}_7$  (500-700 HV) близка по величине к этому показателю у  $\text{NiAl}_3$  (700-770 HV) и  $\text{FeAl}_3$  (800-1100 HV) [7]. Задачей настоящего исследования являлось определение изменений в структуре сплавов и некоторых их свойств, происходящих под действием постоянного магнитного поля с индукцией до 1 Тл в зоне концентраций, соответствующих началу перитектической реакции и образования твердого раствора при температуре перитектики, а также в зоне с большим содержанием хрома в сплаве, при котором образуется первичное соединение  $\text{CrAl}_7$ .

Перитектическая реакция диаграммы равновесия системы Al-Cr происходит при температуре 661 °С между жидкостью, содержащей 0,35-0,41 % Cr, и соединением  $\text{Cr}_2\text{Al}_7$  с образованием твердого раствора с 0,87 % Cr [8]. При этом до концентрации хрома 2 % образуется соединение  $\text{CrAl}_7$ , которое может иметь разные кристаллические структуры: орторомбическую и моноклинную с различными параметрами решетки. Растворение хрома в алюминии уменьшает период решетки. При быстром охлаждении кристаллизующихся сплавов хром образует пересыщенные твердые растворы.

Изучили влияние слабых однородных постоянных магнитных полей, силовые линии которых направлены перпендикулярно гравитационной силе, на структуру двух серий сплавов выбранной системы (при содержании хрома 0,4-0,7 и 1,3-1,9 %мас.), формирующуюся при их затвердевании. Эксперименты проводили в статических условиях при медленном охлаждении расплавов (1,0-1,3 °С/с). Компонентами сплавов служили алюминий технической чистоты (А6) и металлический хром, содержащий (%мас.): Si – 0,17; Cr – 99,83. Сплавы массой 5 г готовили в тиглях в печи электросопротивления. Постоянное горизонтальное однородное магнитное поле создавалось электромагнитом постоянного тока. Необходимое значение индукции в зазоре электромагнита устанавливалось за счет пропуска по его обмотке электрического тока соответствующей величины. Образцы сплавов после расплавления и установления температуры, превышающей температуру солидуса на 150 °С, перемещали в центр межполюсного зазора электромагнита. Структуру сплавов изучали в плоскости разреза параллельно силовым линиям магнитного поля. Микротвердость исследуемых образцов определяли с помощью прибора ПМТ-3. Триботехнические испытания проводили при трении скольжения по стальному контртелу (65Г) с применением индустриального масла.

Проведенные исследования показали, что сплавы 1-й группы составов имеют дендритную структуру. По границам и внутри дендритов твердого раствора Al-Cr выделяются темные точечные (< 1 мкм) включения фазы  $\text{CrAl}_7$ . При содержании хрома более 0,5 %мас. присутствуют также единичные пластинчатые кристаллы этой фазы (рис. 1, а).

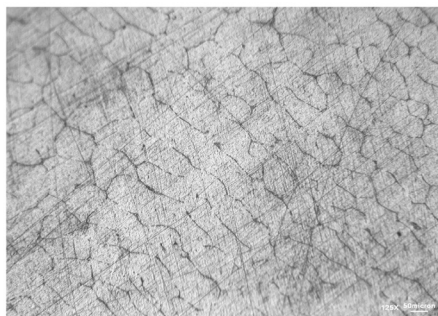
Для всех образцов 2-й группы составов характерным является образование микрокристаллического твердого раствора Al-Cr, на фоне которого выделяются светлые кристаллы  $\text{AlCr}_7$  (рис. 2, а). Они имеют различные размеры и конфигурацию



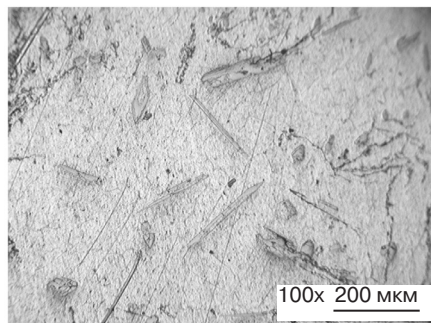
а



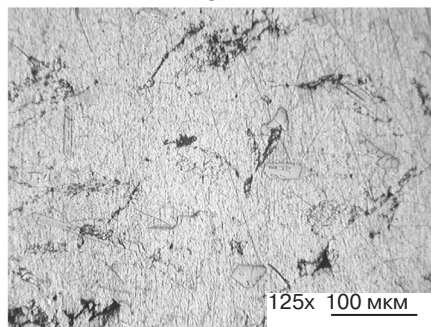
б



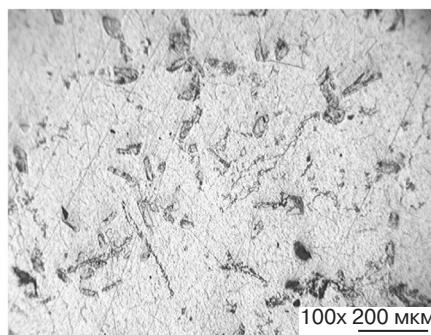
в



а



б



в

Рис. 1. Микроструктуры сплавов 1-й группы составов в зависимости от величины индукции магнитного поля, Тл: а = 0; б = 0,1; в = 0,5, x125

Рис. 2. Микроструктуры сплавов 2-й группы составов в зависимости от величины индукции магнитного поля, Тл: а = 0; б = 0,1; в = 1,0, x100

(таблица) и распределяются по площади шлифа неравномерно. Количество кристаллов не превышает 1%, они отличаются высокой твердостью, которая в 4,5-9,5 раз превышает твердость микрокристаллического твердого раствора.

С приложением магнитного поля в период затвердевания расплавов наблюдаются изменения в структуре образцов, содержащих 0,4-0,7 %мас. Сг. Размер дендритов возрастает с 50-70 (в образце с В = 0 Тл) до 100 мкм (при В = 0,1 Тл) с дальнейшим увеличением до 200 мкм при действии поля с индукцией 0,5 Тл. В условиях воздействия магнитного поля с индукцией 1,0 Тл размер дендритов несколько уменьшается и составляет 50-100 мкм (рис. 1, б, в). Поле влияет и на образование темных точечных включений  $\text{CrAl}_7$ , их количество увеличивается с приложением поля индукцией 0,1 и 0,5 Тл и уменьшается при кристаллизации образцов в поле В = 1,0 Тл. При воздействии магнитного поля на затвердевающие сплавы в структуре образцов по границам зерен появляется эвтектика  $\text{Al} + \text{CrAl}_7$ .

Во второй группе сплавов при содержании хрома в пределах 1,3-1,9 %мас. влияние магнитного поля выражается в увеличении твердости включений алюминидов хрома. Микротвердость образующихся включений  $\text{AlCr}_7$  повышается в 1,5-2,0 раза

Характеристика кристаллических образований структуры сплавов, содержащих 1,3-1,9 %мас. Cr

Группы образцов	Величина индукционного магнитного поля, Тл	Характеристика кристаллических образований CrAl <sub>7</sub>			Микротвердость Н <sub>μ</sub> ср, кг/мм <sup>2</sup>		Износ I, мг/(км·см <sup>2</sup> )
		форма кристаллов	размер, мкм	количество, образцов, %	твердость раствора	CrAl <sub>7</sub>	
1	0	шестоватые пластинчатые призматические	(10-20)х(300-400) (40-50)х(30-50) (20-30)х(50-100)	1,0	30,0	154	20,7
2	0,1	пластинчатые	(30х30); (30х50)	1,0	28,4	266	10,5
3	0,5	пластинчатые призматические	(30х50); (20х30) (10-20)х50	1,5	29,4	270	4,5
4	1,0	пластинчатые призматические	(20-30)х(30-50) (30-500)х(150-300)	2,0	31,0	303	7,1

(таблица), микротвердость твердого раствора Al-Cr практически остается на уровне близких по значению показателей, а приводимые данные находятся в пределах ошибки эксперимента. Магнитное поле влияет также на морфологию кристаллических образований CrAl<sub>7</sub>.

В образце сравнения (B = 0 Тл) образуются в основном шестоватые кристаллы (рис. 2, а). В сплавах, кристаллизовавшихся в условиях действия постоянного магнита, формируются включения преимущественно пластинчатой формы (рис. 2, б, в).

Проведенные трибоиспытания полученных образцов показали, что существует взаимосвязь между износостойкостью исследуемых сплавов, их структурой и фазовым составом. Чем больше образуется по границам и внутри дендритов α-фазы сплавов 1-й серии точечных включений CrAl<sub>7</sub>, тем выше их микротвердость. Например, в образце сравнения она составляет 21,2 кг/мм<sup>2</sup>, а в сплаве, затвердевавшем в поле постоянного магнита при B = 0,5 Тл, – 41,1 кг/мм<sup>2</sup>. Наибольшее воздействие оказывает поле индукцией 0,1-0,5 Тл. С повышением твердости материалобразующей фазы сплава снижаются показатели потерь массы образцов при трении, уменьшается интенсивность их изнашивания (рис. 3). С возрастанием значений индукции воздействующего магнитного поля до 1,0 Тл количество точечных включений фазы CrAl<sub>7</sub> уменьшается, понижается микротвердость и растет износ материала.

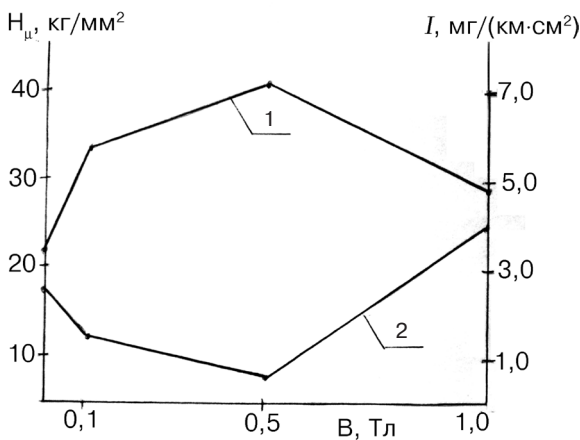


Рис. 3. Изменения микротвердости (1) и интенсивности изнашивания (2) образцов бинарных Al-(0,4-0,7 %мас.) Cr сплавов в зависимости от величины индукции воздействующего магнитного поля (Тл)

Образцы сплавов 2-й серии структурно отличаются от материалов с малым содержанием (0,4-0,7 %мас.) хрома. В них формируется гетерогенная структура композита, когда на фоне относительно мягкой матрицы (в данном случае твердого раствора) выделяются включения, отличающиеся значительной твердостью (CrAl<sub>7</sub>). Структурные особенности сплавов этой серии составов способствуют повышению их износостойкости (таблица). Этот эффект усиливает используемое при кристаллизации расплавов постоянное магнитное поле, вследствие чего повышаются микротвердость образующихся включений и их ко-



личество. Данное явление имеет место во всем диапазоне применяемых значений индукции постоянного магнитного поля.

Таким образом, постоянное однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно гравитационному, с индукцией до 1Тл, накладываемое на медленно охлаждающиеся и затвердевающие сплавы Al-Cr, оказывает влияние на их структуру во всем диапазоне исследуемого содержания хрома (0,4-1,9 %мас.), но при этом не изменяет фазовый состав сплавов. Действие поля при 0,4-0,7 %мас. Cr приводит к увеличению размеров кристаллов твердого раствора, количества точечных образований  $CrAl_7$  и повышению микротвердости. При содержании хрома в пределах 1,3-1,9 %мас. возрастают количество и микротвердость скелетных кристаллов – включений  $CrAl_7$ , изменяются их размеры и конфигурация, повышается суммарная микротвердость сплавов. Такое влияние поля способствует улучшению износостойкости материалов. Однако тенденция снижения износа с ростом концентрации легирующего элемента, установленная для сплавов эвтектической системы [6], для сплава Al-Cr перитектического типа в пределах исследованных концентраций изменилась на противоположную. В сплавах алюминия с 0,4-0,7 %мас. Cr показатель износа значительно лучше, чем у сплавов с 1,3-1,9 %мас. Cr. При этом достигнутый минимальный уровень износа ( $< 1 \text{ мг}/(\text{км}\cdot\text{см}^2)$  при  $V = 0,5 \text{ Тл}$ ) сплава Al-Cr с содержанием Cr  $< 1 \text{ %мас.}$  соответствует минимальной величине износа заэвтектического сплава Al-Fe, полученной при концентрации 6 % Fe и при  $V = 0,5 \text{ Тл}$  [5]. Этот уровень износа существенно меньше, чем достигнутый при обработке полем сплавов системы Al-Ni (6 % Ni при  $V = 0,5 \text{ Тл}$ ) [6].

Дальнейшие исследования воздействия постоянного магнитного поля на затвердевающие алюминиевые сплавы с перитектическим типом диаграммы состояния представляются перспективными в направлении изучения изменения дисперсности и распределения в объеме алюминиевой матрицы интерметаллидов при концентрациях легирующих элементов, близких к началу перитектической реакции.



### Список литературы

1. Ren W., Deng K. Progress in Research on Solidification in a Strong Static Magnetic Field // Steel Research International. – 2007. – V. 78, № 5. – P. 373-378.
2. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, О. И. Нохрина и др. // Литейщик России. – 2008. – № 3. – С. 23 -25.
3. Haifang S., Chunlei G., Qing L. Constant magnetic field action on the Al-Cu alloys directional solidification // Nonferrous Metals. – 2003. – V. 55, № 1. – P. 14-17.
4. Вплив постійного магнітного поля на дендритну структуру сплавів системи Al-Cu при охолодженні розплавів / В. І. Дубодєлов, В. О. Середенко, С. С. Затуловський, А. В. Косинська // Металознавство та обробка металів. – 2009. – № 2 – С. 14-19.
5. Структура і зношення заэвтектичного сплаву Al-Fe, що закристалізований у постійному магнітному полі / В. І. Дубодєлов, В. О. Середенко, С. С. Затуловський, А. В. Косинська // Там же. – 2010. – № 2. – С. 21-26.
6. Структурообразование до- и заэвтектических сплавов Al-Ni при их затвердевании в постоянном магнитном поле / В. І. Дубодєлов, В. О. Середенко, С. С. Затуловський, А. В. Косинська // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 44-53.
7. Елагин В. И. Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе // Цв. металлы. – 2009. – № 6. – С. 103-111.
8. Мондольфо Л. Ф. Структуры и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

Поступила 25.10.2010