

УДК 669.715:538.65:536.421.4

В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, С. С. Затуловский,
А. В. Косинская

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ДО- И ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Al-Ni ПРИ ИХ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В ПОСТОЯННОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследована структура сплавов Al с содержанием до 10 %мас. Ni, затвердевших в постоянном однородном магнитном поле с индукцией до 1 Тл при медленном охлаждении (1 °С/с). Размеры кристаллов α-фазы, интерметаллидов NiAl₃ и микротвердость фаз под действием поля возрастают. Это влияние магнитного поля наиболее выражено в диапазоне индукции 0,1-0,5 Тл.

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

Досліджена структура сплавів Al з вмістом до 10 %мас. Ni, які тверднули у постійному однорідному магнітному полі з індукцією до 1 Тл при повільному охолодженні (1°С/с). Розміри кристалів α-фази, інтерметалідів NiAl₃ та микротвердість фаз під дією поля підвищуються. Цей вплив магнітного поля найбільш виражено у діапазоні індукцій 0,1-0,5 Тл.

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

The structure of alloys of Al with Ni content up to 10 %wt. solidified in a constant homogeneous magnetic field with induction up to 1 tesla during slow cooling (1 °C/s). Under the action of the field crystals α-phase, in intermetallic NiAl₃ and microhardness of phases increases. This influence of the magnetic field is most pronounced in the range of induction of 0,1-0,5 tesla.

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

Никель содержится в ряде алюминиевых литейных сплавов (АК7М2, АЛ11, АЛ25 и другие) в виде легирующего элемента (0,8-3,6 %) и как примесь (0,2-0,3 % Ni). Алюминиевый сплав АНЗ, содержащий 2,7-3,3 Ni; 0,4-0,7 Fe; 0,4 Si; 0,3 % Cu, нашел промышленное применение в подшипниках агрегатов [1]. Сплавы Al-Ni, прежде всего эвтектического состава (5,7 % Ni), в связи с большой прочностью на растяжение волокон интерметаллида Al₃Ni (до 2760 МПа) [2], их значительной микротвердостью (до 770 HV) [3] и высокой термической устойчивостью структуры Al-Al₃Ni

*В работе принимали участие В. Я. Хоружий, К. С. Хаустов, В. В. Давиденко, Ж. Д. Богатырева, Е. А. Набока

рассматриваются как естественные композиционные материалы, на основе которых можно достичь повышенной прочности при термической стабильности литых изделий [2-4]. Содержание никеля в алюминиево-никелевых лигатурах колеблется в диапазоне 6-25 % [5]. Такие лигатуры используются как при легировании [6], так и модифицировании [7] алюминиевых сплавов.

Улучшения механических свойств фасонных отливок из сплавов Al-Ni, упрочненных волокнами Al_3Ni , достигают путем формирования композитной структуры с целью контроля направленной кристаллизации сплава эвтектического состава. При этом достигается высокая прочность сцепления между матрицей и армирующей фазой вследствие их кристаллогеометрического соответствия, обусловленного фазовым превращением при затвердевании сплава. Условиями формирования однонаправленной структуры с армирующими волокнами интерметаллида Al_3Ni являются плоский фронт кристаллизации; отсутствие посторонних примесей в расплаве и определенное сочетание температурно-кинетических параметров процесса. Это требует высокой чистоты исходных компонентов, отсутствия окисления, строгого соответствия состава сплава эвтектическому, точного соблюдения требуемой скорости перемещения фронта кристаллизации и т. п. [2, 4, 8].

Наложение постоянного однородного магнитного поля с индукцией (В) порядка 1,5 Тл на кристаллизующиеся заэвтектические сплавы алюминия с 10 и 20 % Ni без выполнения требований к чистоте компонентов, точности состава сплава, безокислительной атмосфере, скорости и направлению охлаждения позволило преобразовать структуру сплавов с хаотическим распределением интерметаллических соединений Al_3Ni в алюминиевой матрице к преобладающему распределению кристаллов Al_3Ni , ориентированных перпендикулярно силовым линиям магнитного поля [9]. Такой результат достигнут вследствие действия в гетерогенном расплаве сил магнитного поля, достаточных для ориентации кристаллов Al_3Ni , обладающих анизотропией магнитных свойств и значительно превышающих по величине магнитную проницаемость расплава. Изучение влияния алюминиевых сплавов с 8, 10 и 13 % Ni более сильных постоянных магнитных полей (порядка 10 Тл) на процесс кристаллизации показало, что степень упорядочения ориентированной структуры возрастает с увеличением температуры расплавов и индукции накладываемого магнитного поля [10].

В связи со сложностью и высокой энергоемкостью оборудования, создающего сильные магнитные поля, а главное с проблемой достижения однородности поля в 3-мерном пространстве и ограничением его размеров одной из координат, в таких полях пока возможно получение плоских, цилиндрических и сферических литых тел с толщиной или диаметром, не превышающих величины порядка $1 \cdot 10^{-2}$ м. В то же время использование традиционных постоянных магнитов или электромагнитов постоянного тока дает возможность обеспечивать величину магнитной индукции до 1 Тл в объемах с характерной толщиной до 0,3 м [11, 12].

В настоящем исследовании изучено влияние слабых однородных постоянных магнитных полей, силовые линии которых направлены перпендикулярно гравитационной силе, на микроструктуру до- и заэвтектических алюминиево-никелевых сплавов, формирующуюся при их затвердевании. Для ограничения числа факторов, влияющих на процесс структурообразования затвердевающих сплавов, эксперименты проводились в статических условиях при медленном охлаждении расплавов (1,0-1,3 °C/с). Компонентами сплавов служили алюминий технической чистоты (А6) и электролитический никель (Н2). Сплавы массой 5 г готовились в алундовых тиглях в печи электросопротивления с нихромовым нагревателем. Перемешивание расплавов в тиглях осуществлялось молибденовым стержнем. Постоянное горизонтальное однородное магнитное поле создавалось электромагнитом постоянного тока с ферромагнитной С-образной системой с сечением полюсов 0,12х0,14 м. Необходимое

значение магнитной индукции в зазоре электромагнита устанавливалось за счет пропускания по его обмотке электротока соответствующей величины.

Образцы сплавов в алундовых тиглях после приготовления в печи и установления температуры, превышающей температуру солидуса на 150 °С, перемещались в центр межполюсного зазора электромагнита.

Температурный режим охлаждения во всех случаях поддерживался одинаковым. Структура сплавов изучалась в плоскости разреза параллельно силовым линиям магнитного поля. Микротвердость структурных составляющих сплавов определялась с помощью прибора ПМТ-3. Так как в сплавах на основе Al с Ni в мягкой матрице содержатся твердые включения интерметаллидов, для определения степени влияния магнитного поля через структуру на свойства сплавов выбрана такая служебная характеристика металла, как износостойкость. Триботехнические испытания образцов сплавов проводились при трении скольжения по стальному (65Г) контртелу с применением индустриального масла.

Было выплавлено и исследовано 5 серий сплавов Al-Ni (%мас.) при содержании следующего количества никеля: I – 0,3-1,0; II – 1,2-2,05; III – 3,0-4,5; IV – 6; V – 10 %. Проведенные исследования позволили установить, что при содержании никеля в пределах 0,3-4,5 %мас. материалы имели зернистую структуру, основной фазой которой являлись кристаллические образования α -твердого раствора алюминия, рис. 1. В промежутках этих зерен присутствовала эвтектика Al+NiAl₃. Образовывалось также соединение NiAl₃ в виде темных точечных включений, присутствовавшее на поверхности зерен α -фазы. Выделившаяся при кристаллизации эвтектика имела микротвердость 254-489 МПа, что значительно превышало микротвердость α -фазы (табл. 1).

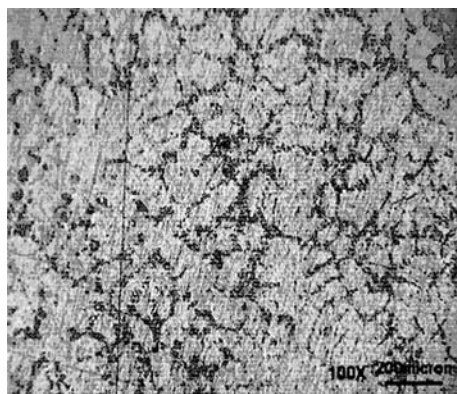


Рис. 1. Структура сплава, содержащего 1,29 %мас. Ni (B = 0 Тл), $\times 100$

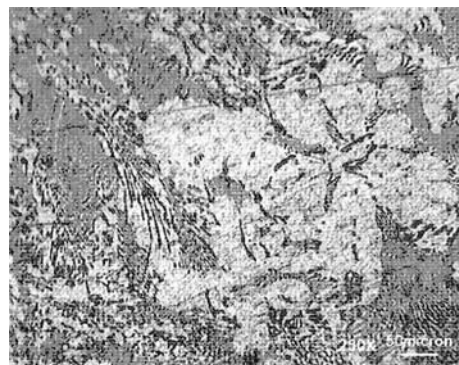


Рис. 2. Структура алюминиевого сплава с добавкой 6 %мас. Ni (B = 0 Тл) (α -фаза; эвтектика Al+NiAl₃ + отдельные игольчатые кристаллы NiAl₃), $\times 250$

Таблица 1. Влияние индукции магнитного поля на показатели микротвердости, количество образовавшейся эвтектики сплавов в зависимости от содержания в них никеля (I – III серии опытов)

Содержание никеля, %мас.	Величина индукции магнитного поля, Тл	Микротвердость α -фазы, МПа	Количество образующейся эвтектики, %
0,77	0	128	3-5
1,29	0	188	4-5
4,38	0	207	20-60
0,94	0,1	173	5-7
1,35	0,1	226	3-10
1,57	0,1	276	7
0,34	1,0	156	2-3
2,43	1,0	234	5-7
3,68	1,0	311	20-60

Новые литые материалы

Количество эвтектики и образований $NiAl_3$ возрастало с увеличением содержания никеля в сплавах независимо от того кристаллизовались расплавы в условиях воздействия магнитного поля, либо без него (см. табл. 1).

Повышение содержания никеля в сплавах до 6 %мас. приводило к изменению их структуры, она становилась эвтектической, только местами встречались участки из зерен или дендритов α -фазы различного размера. Соединение $NiAl_3$ выделялось в виде отдельных иголок (рис. 2). Эвтектика отличается повышенной (по сравнению с α -фазой) микротвердостью (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика кристаллических образований структуры образцов алюминиевых сплавов с добавкой 6 % никеля

Величина индукции магнитного поля, Тл	Размер кристаллов $NiAl_3$, мкм	Микротвердость, МПа	
		α -твердого раствора	эвтектики
0	от 30 до 100	258	389
0,1	от 30 до 200	210	356
0,5	30-50 до 100	243	452
1,0	30-50 до 100	209	420

Еще в большей степени преобразовалась структура сплавов при введении 10 %мас. Ni. Для составов этой серии было характерно выделение скелетных кристаллов $NiAl_3$ различной формы и размеров на фоне эвтектики Al+ $NiAl_3$ (рис. 3, а). Кристаллические образования $NiAl_3$ отличались значительной (по сравнению с эвтектикой) микротвердостью (табл. 3).

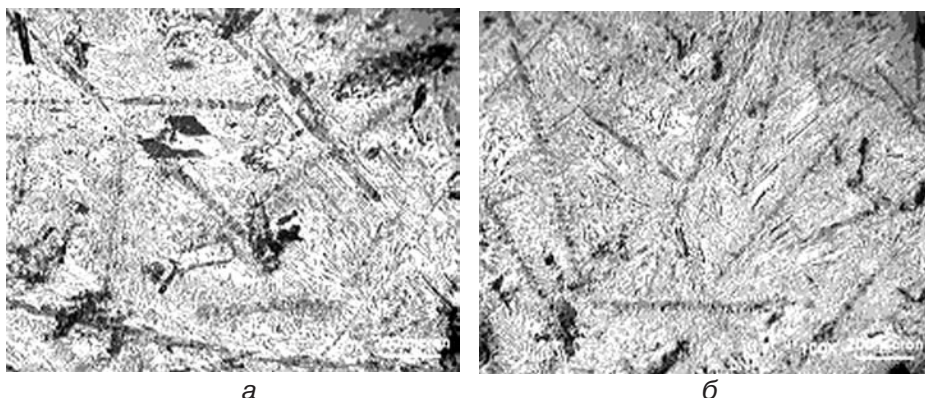


Рис. 3. Микроструктура алюминиевых сплавов с добавкой 10 %мас. Ni: а – 0 Тл; б – 0,1Тл, $\times 100$

При рассмотрении образцов полученных сплавов было установлено, что магнитное поле оказывает влияние на их структуру и свойства независимо от количества в них никеля. В группе сплавов с содержанием 0,3-0,95 %мас. Ni при воздействии индукции 0,1-1,0 Тл в зернистой структуре материалов местами появлялись дендриты α -твердого раствора. Увеличивались размеры кристаллических образований α -фазы и повышалась их микротвердость (табл. 4). На поверхности зерен и дендритов возрастало количество эвтектики и точечных включений $NiAl_3$. Наибольшее воздействие оказывало магнитное поле с индукцией 0,1-0,5 Тл. При кристаллизации расплавов в поле 1,0 Тл происходило некоторое уменьшение эвтектики в структуре материала, снижалась микротвердость алюминиевого твердого раствора.

Таблица 3. Характеристика кристаллических образований структуры образцов алюминиевых сплавов с добавкой 10 % никеля

Величина индукции магнитного поля, Тл	Характеристика кристаллических образований $NiAl_3$			Микротвердость, МПа	
	форма кристаллов	размер, мкм	количество	эвтектики	$NiAl_3$
0	шестоватые пластинчатые	(20-30)x(300-1500) (80-100)x(200-300)	7-8	517	857
0,1	шестоватые	(10-20)x(300-1000)	3-5	514	1940
0,5	шестоватые пластинчатые	(10-20)x(300-1000) (30-50)x300	5-6	558	1340
1,0	шестоватые призматические пластинчатые	(20-30)x(500-1000) (30-50)x(200-300) 100x100; 100x200	3-5	650	1160

Таблица 4. Характеристика кристаллических образований структуры исследованных сплавов в соответствии с изменением индукции магнитного поля и содержания в них никеля (< 1 %мас.)

Величина индукции магнитного поля, Тл	Средний размер кристаллических образований α -твердого раствора, мкм	Количество эвтектики, %	Содержание никеля, %мас.
0	20x60	3-5	0,77
0,1	30x80	5-7	0,94
0,5	30x100	до 10	0,55
1,0	30x70	2-3	0,34

При увеличении содержания никеля в сплавах до 1,2-6,0 %мас. влияние магнитного поля выражалось в изменении размеров кристаллических образований и количества образующихся фаз. По сравнению с образцом, затвердевшим без магнитного поля, в сплаве, который кристаллизовался под воздействием поля с индукцией 0,1 Тл, материал приобрел местами дендритное строение. При этом увеличилось количество $NiAl_3$, возрос размер кристаллических образований α -твердого раствора алюминия (рис. 4, а, б). Интерметаллид $NiAl_3$ сформировался в виде широких иголок, изометричных образований (рис. 4, г) параллельно с точечными включениями на поверхности дендритов и зерен α -фазы. Количество точечных включений возросло, особенно при воздействии поля с индукцией 0,5 Тл. Они полностью покрывали поверхность зерен α -фазы (рис. 4, в).

При воздействии поля индукцией 0,5 Тл структура сплава становилась полностью дендритной. Размер дендритов еще больше возрастал. Повышалось количество эвтектики, отличающейся повышенной микротвердостью по сравнению с α -фазой. Так, например, средняя микротвердость алюминиевого твердого раствора в сплавах этой серии составляла 276 МПа, а микротвердость эвтектики – 399 МПа. Образование эвтектики связано с выделением соединения $NiAl_3$. Чем больше образовывалось эвтектики, тем меньше было включений этой фазы в виде черных точечных образований на поверхности дендритов и тем ниже была микротвердость α -фазы.

При повышении величины индукции магнитного поля до 1,0 Тл уменьшалось количество эвтектики и включений $NiAl_3$. Снижался размер зерен и дендритов α -фазы (табл. 5).

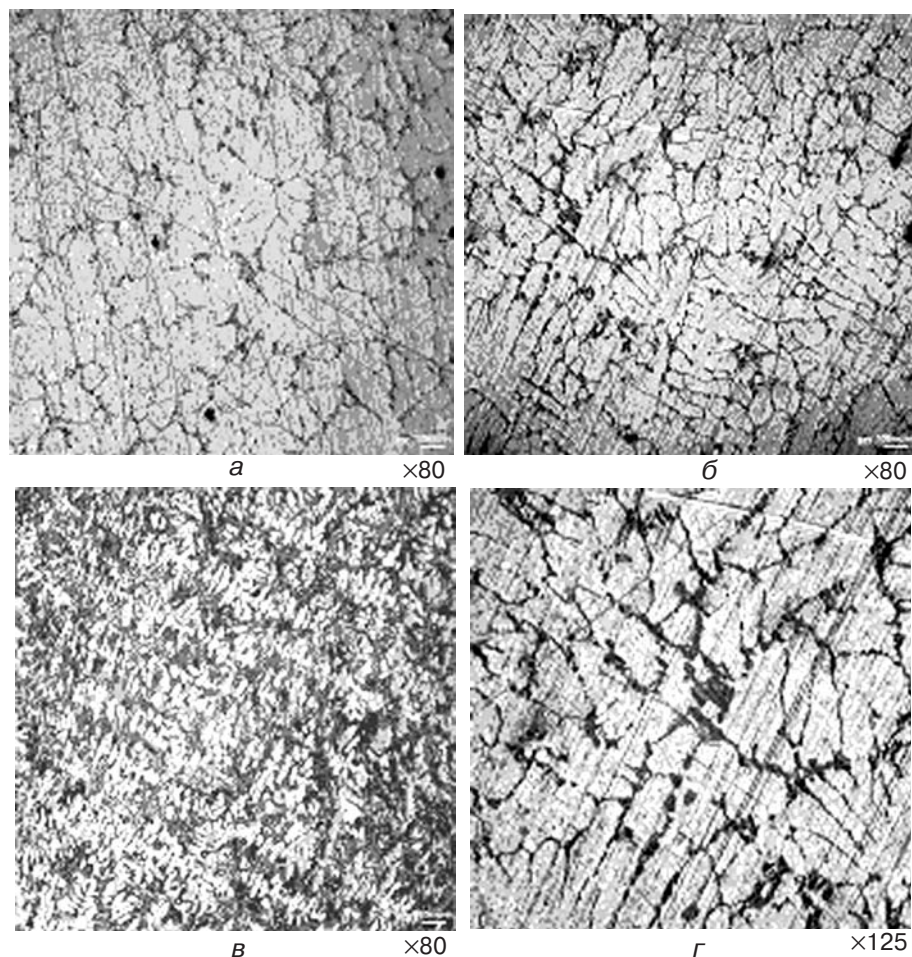


Рис. 4. Микроструктура образцов сплавов системы Al-Ni (1,2-6,0 %мас. Ni), кристаллизовавшихся без (а) и с приложением магнитного поля индукцией 0,1 (б), 0,5 (в); г – включения $NiAl_3$ в образце сплава, кристаллизовавшегося в поле индукцией 0,1 Тл

Таблица 5. Характеристика кристаллических образований структуры образцов алюминиевых сплавов в соответствии с изменением индукции магнитного поля и содержания в них никеля

Содержание никеля, %мас.	Величина индукции магнитного поля, Тл	Размер кристаллических образований α -твердого раствора, мкм	Количество эвтектики, %
1,29	0	(30-100)х150	до 5
1,57	0,1	(50-100)х(150-200)	7
6,3	0,5	(30-50)х(500-1000)	70
2,43	1,0	(30-50)х100	5-7

При введении 6 %мас. Ni с приложением магнитного поля 0,1-0,5 Тл структура сплава укрупнялась (рис. 5, а, б). Увеличивался размер отдельных иголок $NiAl_3$. При этом наблюдалась ориентировка этих кристаллических образований соответственно направлению магнитного поля (рис. 5, в). При действии магнитного поля с индукцией 1,0 Тл несколько уменьшался размер иголок $NiAl_3$, снижалась микротвердость α -фазы. Но можно констатировать, что образцы этой серии сплавов представляли собой материалы, в которых более мягкие образования α -фазы кристаллизовались на фоне более твердой эвтектики.

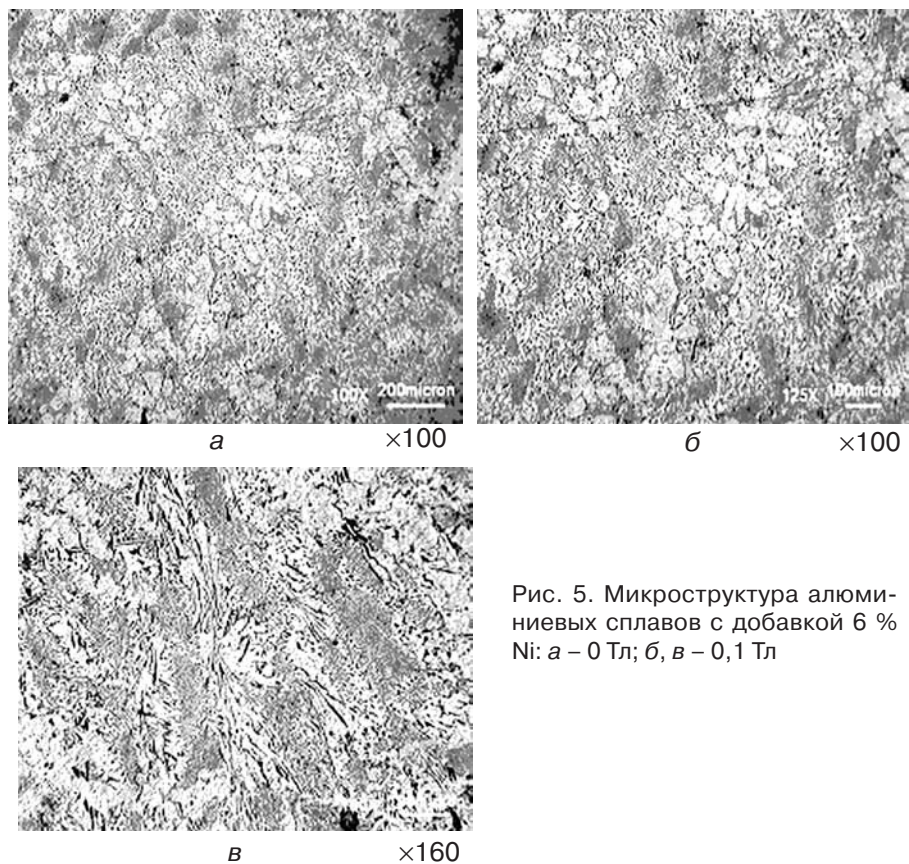


Рис. 5. Микроструктура алюминиевых сплавов с добавкой 6 % Ni: а – 0 Тл; б, в – 0,1 Тл

Образцы с добавкой 10% мас. Ni структурно отличались от всех ранее рассмотренных сплавов. Для составов этой серии было характерно выделение скелетных кристаллов $NiAl_3$ различной формы и размеров на фоне эвтектики $Al+NiAl_3$ (см. рис. 3). Форма кристаллических включений, их размеры и количество находились в тесной связи с величиной прилагаемого при кристаллизации расплавов магнитного поля (см. табл. 3). Наибольшее влияние оказывало поле с индукцией 0, 1 и 0,5 Тл. В образцах, подвергавшихся воздействию поля такой величины, образующиеся включения $NiAl_3$ имели наибольшую микротвердость и размеры (табл. 3). Характер эвтектики остался неизменным, она имела меньшую твердость, чем включения, оставаясь практически в пределах ошибки измерений. Выделение твердых частиц $NiAl_3$ в мягкой эвтектике образовало классический композиционный материал: твердая армирующая фаза в мягкой матрице сплава.

Выявленные изменения в структуре материалов, происходящие в результате действия постоянного магнитного поля на затвердевающие расплавы, оказывали влияние на их свойства. Проведенные исследования и трибоиспытания показали, что повышение микротвердости α -твердого раствора за счет увеличения количества включений $NiAl_3$, образующихся на поверхности зерен, способствует повышению износостойкости материалов. В качестве примера на рис. 6 приведены данные, иллюстрирующие взаимосвязь микротвердости α -фазы с показателями интенсивности изнашивания испытанных образцов двух групп сплавов с различным содержанием никеля.

Анализ представленных результатов исследования показал, что независимо от содержания никеля в сплавах (в пределах 0,3-6,0% мас.) повышение микротвердости α -твердого раствора способствует снижению интенсивности изнашивания материалов. Чем выше содержание никеля в сплавах, тем более выражена эта взаимосвязь.

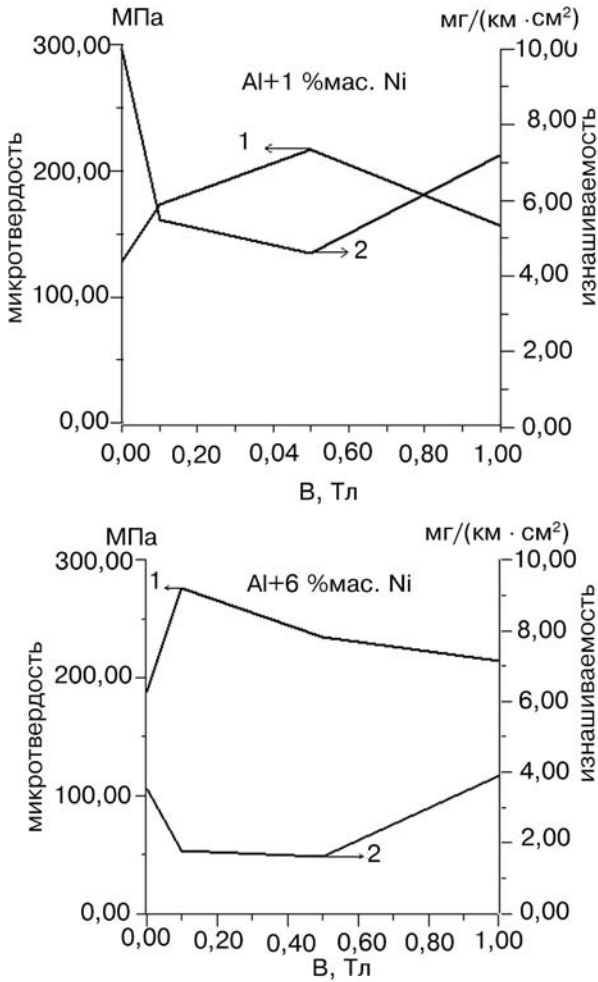


Рис. 6. Взаимосвязь микротвердости (1) и интенсивности изнашивания (2) образцов сплавов системы Al-Ni с величиной индукции внешнего постоянного однородного поля

интерметаллидов, возрастанию количества эвтектики. При этом микротвердость фаз существенно увеличивается. Такое влияние поля повышается с увеличением концентрации никеля в сплавах. Ориентирующее действие поля на игольчатые включения $NiAl_3$ выявлено только на сплаве с 6 % Ni и на локальных участках. Наибольшее повышение микротвердости фаз произошло под действием поля с индукцией 0,1-0,5 Тл, а сплавы, подвергшиеся такому воздействию, обладали повышенной стойкостью к изнашиванию при трении.

Максимальное влияние оказывало магнитное поле с индукцией 0,1 и 0,5 Тл. При воздействии поля с индукцией 1,0 Тл уменьшалось количество $NiAl_3$ и твердой эвтектики в сплаве, понизилась микротвердость α -твердого раствора. Это привело к снижению износостойкости материалов.

Введение в алюминий никеля (более 6 %мас.), приводящее к образованию в сплавах классической композитной структуры (наличию твердых включений $NiAl_3$ в мягкой эвтектичной матрице), должно способствовать еще большему повышению их износостойкости. Этот эффект усиливает используемое при кристаллизации расплавов постоянное магнитное поле, вследствие чего образующиеся включения имеют наибольшую микротвердость и размеры.

Таким образом, постоянное однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно гравитационному, с индукцией до 1 Тл, накладываемое на медленно охлаждающиеся и затвердевающие сплавы Al-Ni, оказывает влияние на их структуру во всем исследованном диапазоне содержания никеля (0,3-10,0 %мас.), но при этом не изменяет фазовый состав сплавов. Действие поля приводит к увеличению размеров кристаллов α -твердого раствора и



Список литературы

1. Шпагин А. И. Антифрикционные сплавы. – М.: Металлургия, 1956. – 320 с.
2. Баландин Г. Ф., Заболоцкий А. А. Перспективы литых композиционных материалов // Литейн. пр-во. – 1971. – № 3. – С. 4-7.
3. Елагин В. И. Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе // Цв. металлы. – 2009. – № 6. – С. 103-111.

4. Влияние условий кристаллизации на свойства эвтектических композиционных сплавов на основе алюминия / Ю. С. Веселянский, Л. П. Горушкина, В. И. Захаров и др. // Литейн. пр-во. – 1973. – № 4. – С. 27-28.
5. Лигатуры для производства алюминиевых и магниевых сплавов / Н. Ю. Напалков, Б. И. Бондарев, В. И. Тарарышкин, М. В. Чухров. – М.: Metallurgia, 1983. – 160 с.
6. Альтман М. Б., Стромская Н. П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgia, 1984. – 128 с.
7. Крушенко Г. Г. Модифицирование доэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов никелем // Расплавы. – 2008. – № 2. – С. 77-80.
8. Тортика А. С., Сомов А. И., Курило Ю. П. Дефекты микроструктуры эвтектических композиций при направленной кристаллизации отливок // Литейн. пр-во. – 1975. – № 2. – С. 12-14.
9. Об управлении структурой кристаллизующихся металлов постоянным магнитным полем / М. Ю. Абрицка, В. Х. Витола, Я. Х. Карклинь и др. // Магнитная гидродинамика. – 1976. – № 3. – С. 119-124.
10. Lix., Ren Z., Deng K. Action of hing magnetic filed on crystalstructural zhase Al_3Ni of Al – Ni alloys // Chin. J. Nonferrous Metals. – 2006. – V. 16, № 3. – P. 476-481.
11. Верте Л. А. МГД-технология в производстве черных металлов. – М.: Metallurgia, 1990. – 120 с.
12. Электромагнитная обработка расплавов / С. Б. Эссельбах, С. В. Куберский, В. Н. Дорофеев и др. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – 138 с.

Поступила 07.04.2010

УДК 521.74.94:669.35:539.24

В. В. Христенко, М. А. Руденко, Б. А. Кириевский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА РАСТВОРИМОСТЬ ХРОМА И ЖЕЛЕЗА В «МЕДНОЙ» ФАЗЕ МОНОТЕКТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ Cu-(Fe-Cr-C)

Представлены экспериментальные данные относительно твердости и удельного электрического сопротивления сплавов системы Cu-(Fe-Cr-C). Установлено, что свойства сплава в целом определяются соотношением содержаний компонентов в упрочняющей добавке. В жидком состоянии на устойчивость составляющих упрочняющей добавки по отношению к растворению в основе наиболее сильное влияние оказывают строения наружных электронных оболочек ионов компонентов сплава.

Ключевые слова: расплав, твердость, электрическое сопротивление, медь, хром, железо, углерод.

Наведено експериментальні дані щодо твердості та питомого електричного опору сплавів системи Cu-(Fe-Cr-C). Встановлено, що властивості сплаву в цілому визначаються співвідношенням вмістів компонентів в зміцнювальній добавці. В рідкому стані на стійкість складових зміцнювальної добавки відносно розчинення в основі найбільш сильно впливають будови зовнішніх електронних оболонок іонів компонентів сплаву.

Ключові слова: розплав, твердість, електричний опір, мідь, хром, залізо, вуглець.