
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 669.715.004.12

Ю. В. Моисеев, Н. А. Кудрявченко, С. А. Терновой

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрены общие вопросы связи структурного состояния алюминиевых сплавов с их механическими и физическими свойствами. Обсуждены практические возможности экспресс-контроля этого состояния электромагнитными вихретоковыми методами.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, структурное состояние, алюминиевые сплавы, электромагнитные методы.

Розглянуто загальні питання зв'язку структурного стану алюмінієвих сплавів з їх механічними та фізичними властивостями. Обговорено практичні можливості експрес-контролю цього стану електромагнітними вихреструмівими методами.

Ключові слова: неруйнівний контроль, структурний стан, алюмінієві сплави, електромагнітні методи.

Shown is practical possibility nondestructive control of structure aluminium alloys using electromagnetic methods.

Keywords: nondestructive testing, structure, aluminium alloys, electromagnetic methods.

Структурное состояние металлических изделий определяется совокупностью нескольких таких характеристик сплава, как фазовый состав, размерные значения и морфологические особенности структурных составляющих, плотность дефектов кристаллического строения и степень предварительной обработки изделия давлением.

Можно выделить пять важнейших структурных факторов, интенсивно влияющих на эксплуатационные свойства металлических изделий [1]:

- величина зерен твердого раствора;
- количество и температура кристаллизации эвтектики, а также морфологические особенности ее структурных составляющих;
- количество, размерные характеристики, форма и месторасположение интерметаллидов и вторичных фаз;
- количество и характер распределения дефектов кристаллической решетки (вакансии, дислокации, примесные атомы);

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

– уровень (зонный, кристаллический) и степень дисперсности продуктов распада пересыщенного твердого раствора.

О роли и значении этих факторов написано много монографий и статей, поэтому уместно будет упомянуть лишь о некоторых обобщающих сведениях, характеризующих особую роль отдельных структурных факторов.

С размерами зерна связаны прочность и пластичность сплава как результат влияния поверхности межзеренных границ, являющихся стоками вакансий и дислокаций. Границы зерен термодинамически неустойчивы, но их стабильность может быть повышена путем легирования сплава переходными элементами. Последние способствуют образованию по границам зерен температурно устойчивых интерметаллических соединений, снижают диффузионную зернограничную подвижность различных химических элементов и повышают температуру рекристаллизации, что особенно важно для деформируемых сплавов.

Количество эвтектики определяет литейные свойства сплава. Роль эвтектики в упрочнении невелика и может быть даже отрицательной. Жаропрочность сложнелегированных поршневых сплавов обеспечивает сложная (по фазовому составу) эвтектика. В деформируемых сплавах наличие легкоплавкой эвтектики может приводить при термической обработке к пережегу – неисправимому дефекту структуры.

Интерметаллические соединения, образующиеся в процессе кристаллизации из жидкого расплава, устойчивы при повышенных температурах, не склонны к укрупнению и коагуляции и способствуют гетерогенизации структуры как при выделении по границам зерен, так и в виде мелкодисперсных внутризеренных прослоек. Препятствуя передвижению дислокаций, они способствуют упрочнению сплава и повышают его жаропрочность.

Для промышленных алюминиевых сплавов важное значение имеет переменная растворимость легирующих элементов в алюминии. На этом свойстве основана упрочняющая термообработка алюминиевых сплавов. Степень распада пересыщенного твердого раствора можно варьировать в широких пределах. Продуктами распада могут быть зоны Гинье-Престона, метастабильные частично когерентные выделения вторых фаз и дисперсные некогерентные частицы. Наибольшую роль в упрочнении играют дисперсные выделения устойчивых некогерентных частиц внутри зерен твердого раствора.

На устойчивость твердого раствора сильное влияние оказывают переходные элементы (марганец, хром, цирконий). Правильный выбор легирующих элементов и режимов термической обработки позволяет получать структуры с оптимальным соотношением количества ультрадисперсных частиц как по границам зерен, так и внутри зерен твердого раствора.

Точечные и линейные дефекты кристаллического строения определяют способность сплава к деформации. Получение после горячей деформации нерекристаллизованной структуры (при высокой температуре рекристаллизации) приводит к структурному упрочнению (увеличение прочности на 30-40 %), а холодная деформация, увеличивая плотность дислокаций, изменяет температурную устойчивость структуры при естественном или искусственном старении сплава.

Структурное состояние чутко реагирует на изменение химического состава сплава, условий затвердевания и режимов термической и механической обработки изделия. Прямыми методами контроля этого состояния являются достаточно длительные и трудоемкие методы металлографического анализа структур.

Для неразрушающего экспресс-контроля структурного состояния алюминиевых сплавов наиболее удобным и простым оказался электромагнитный метод оценки этого состояния по измерениям такого структурно-чувствительного свойства, как электропроводимость « ρ ». Удобство и простота заключаются в возможности быстрого проведения оценочных измерений непосредственно на изделиях любой формы и размеров (с соблюдением, естественно, определенных требований).

Устанавливая корреляционные зависимости между изменениями электропро-

Таблица 1. Значения « B_i » ($\times 10^{-4}$, Ом·мм²/(м·%) C_i [2]*

Элементы	B_i	C_i , %мас.
B	13,2	H^{**}
Be	7,2	H
Cr	$\frac{421}{340}$	<0,29 >0,29
Cu	30,6	P^{**}
Fe	$\frac{85}{9,3}$	<0,007 >0,007
Ge	31	P
Zi	367	P
Mg	55,7	P
Ni	4,6	H
Si	$\frac{51,6}{3,9}$	<0,14 >0,14
Ti	258	H
V	332	H
Zn	9,9	P
Zr	$\frac{454}{65,7}$	<0,031 >0,031
Mn	$\frac{306}{161}$	<0,095 >0,095

*1 м/Ом·мм² = 1 МСм/м²;

** H – вне раствора; P – в растворе

водимости и различными структурно-механическими свойствами сплава, можно решать большой круг задач структурных превращений или неразрушающего контроля качества продукции.

Легирующие элементы и примеси понижают удельную электропроводимость алюминия, особенно интенсивно в растворенном состоянии и менее интенсивно – в виде избыточных фаз. Их влияние на электропроводимость алюминия можно оценить по следующему уравнению [2]:

$$\lambda = \frac{1}{S} = \frac{1}{S_{Al} + B_i \cdot [C]_i} \quad (1)$$

где $S_{Al} = 0,02633$ Ом·мм²/м; примесей в Al < 0,004 %; B_i – интенсивность влияния i -го элемента (табл. 1); $[C]_i$ – концентрация (%мас.) i -го элемента.

Общие закономерности изменения удельной электропроводимости алюминиевых сплавов при изменении их структурного состояния может проиллюстрировать гистограмма, представленная на рис. 1 [3].

Наименьшую электропроводимость имеют алюминиевые сплавы в литом, закаленном и естественно состаренном состояниях. Зонный характер распада пересыщенного твердого раствора при естественном старении приводит к снижению электропроводимости после закалки, а увеличение доли фазового превращения и частичная коагуляция дисперсных частиц при искусственном старении способствуют незна-

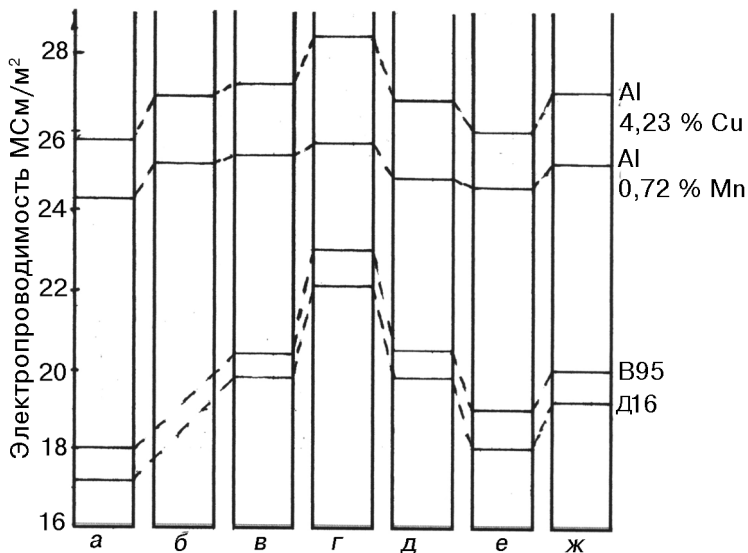


Рис. 1. Зависимость электропроводности алюминиевых сплавов от их структурного состояния [3]: а – литое не гомогенизированное; б – литое гомогенизированное; в – после горячего прессования; г – после отжига; д – закаленное; е – естественное старение; ж – искусственное старение

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

чительному росту электропроводимости. Максимальной прочности соответствует определенная степень распада пересыщенного раствора, количественная оценка которой может быть сделана с помощью безразмерного параметра «с» [2]

$$c = \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_{\text{макс}} - \gamma_0}, \quad (2)$$

где γ – удельная электропроводимость сплава в контролируемом состоянии; γ_0 – удельная электропроводимость сплава в закаленном состоянии; $\gamma_{\text{макс}}$ – удельная электропроводимость сплава после полного отжига.

Значения удельной электропроводимости некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл. 2-4.

Таблица 2. Удельная электропроводимость « γ » термически не упрочняемых алюминиевых деформируемых сплавов [4]

Сплав	A995	A99	A85	АД00	АДО	АД1	АМц	АМг2	АМг3	АМг5	АМг6
γ , МСм/м	37,0	36,8	35,7	35,6	35,4	35,4	26,9	20,2	18,9	15,5	14,9

Таблица 3. Удельная электропроводимость « γ » деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов [4], МСм/м

Сплав γ	Структурное состояние				
	исходное	закалка	естественное старение	искусственное старение	полный отжиг
АД31	27,7	28,4	27,5	28,7	31,0
АВ	24,9	26,2	24,9	26,5	32,0
АД33	23,9	23,9	23,9	24,8	27,5
АК4	22,6	19,9	-	22,6	24,8
АК6	20,9	22,4	21,0	21,9	28,6
1201	20,7	17,5	-	20,7	25,1
1915	19,1	20,4	19,1	19,8	23,0
Д1	18,5	19,0	18,5	-	27,4
В95	18,4	18,0	-	18,3	-
Д19	17,0	19,1	17,0	19,7	25,6
Д16	16,8	18,2	16,8	19,5	26,9

Для обеспечения единства измерений в ОАО ВИЛС разработаны Государственные стандартные образцы удельной электропроводимости сплавов в диапазоне значений « γ » 0,5-60 МСм/м. Образцы представляют собой пластины размером 30x30x5 мм, на которые нанесены значения их удельной электропроводимости (табл. 5) [6].

Существует большая номенклатура приборов для измерения электропроводимости сплавов вихретоковым методом [7]. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины (ФТИМС, г. Киев) разработан испытатель электропроводимости ИЭ-199, имеющий малые габариты и автономное питание (рис. 2). Прибор имеет четыре фиксированных диапазона измерений (МСм/м): 0,5-3,5 (титановые сплавы); 3,0-15,0 (магниево- и легированные медные сплавы); 10,0-35,0 (алюминиевые сплавы); 30,0-60,0 (медные сплавы и медь). В зависимости от сложности решаемых задач прибор может работать в двух испытательных режимах или одном измерительном:

- первый испытательный используют, как правило, для сортировки шихтовых материалов;
- второй испытательный – для оценки отклонений структуры изделия от показателя образцовой детали, принятой за базовую;

Таблица 4. Удельная электропроводимость литейных алюминиевых сплавов [1, 5], МСм/м

Сплав	γ , МСм/м
АЛ1	18,9
АЛ2	18,2
АЛ3	22,3
АЛ4	24,4
АЛ5	21,6
АЛ9	21,9
АЛ19	16,8
АЛ20	19,3
АЛ21	17,5
ВАЛ-1	18,3
ВАЛ-5	21,6
ВАЛ-10М	16,9

– измерительный режим – для численной оценки удельной электропроводимости сплава в различных аналитических исследованиях.

Длительность измерения не превышает 3-5 с, а процесс контроля может сопровождать специальная звуковая сигнализация.

Как уже было отмечено выше, резистометрический неразрушающий контроль позволяет решать разнообразные задачи, в частности, статические задачи оценки механических свойств изготавливаемой продукции [8], но для изготовителя наиболее актуальными являются задачи текущего контроля браковочных признаков продукции, особенно неисправимых, свидетельствующих о серьезном нарушении технологического процесса. К одному из массовых дефектов такого вида относится пережег структуры, возникающий при нагреве заготовки под горячую деформацию или при гомогенизации сплава перед закалкой. Пережег характеризуется оплавлением границ зерен твердого раствора и образованием глобулей внутри зерна. При пережеге наблюдается охрупчивание сплава, снижение коррозионной стойкости и усталостной прочности,

резкое ухудшение деформируемости и нарушение режимов прессования. Химическая неоднородность литой структуры исходного слитка в виде сложных легкоплавких эвтектик по границам зерен и частично по границам ветвей дендритов внутри зерен предрасполагает к возникновению жидкой фазы при перегреве термообрабатываемой заготовки, особенно в ее литом состоянии. Предварительное прессование литой заготовки, разрушая и диспергируя зернограницный каркас эвтектики, снижает опасность пережега и появления жидкой фазы тем эффективнее, чем выше степень деформации. Анализируя на одном из заводов причины повышенного брака деталей из высокопрочного алюминиевого сплава В95 при механической обработке заготовок, прошедших закалку и искусственное старение, в данной работе провели комплекс металлографических и резистометрических исследований структуры заготовок в различном структурном состоянии из разных партий, дающих бракованные или качественные детали, и убедились в согласовании результатов этих параллельных исследований (табл. 6, рис. 3). Граничное нижнее значение удельной электропроводимости сплава В95, гарантирующее отсутствие пережега после термической обработки, составляет 18, МСм/м, а с увеличением этой характеристики (свыше 21,0 МСм/м) уменьшается прочность и возрастает пластичность сплава.

Анализ микроструктур, представленных на рис. 3, свидетельствует о том, что заготовки из сплава В95 уже в состоянии поставки имели признаки пережега (по-видимому, как результат неправильного режима нагрева заготовок перед горячим деформированием – рис. 3 а, б), а последующая термообработка перед закалкой лишь усугубила этот эффект до аварийного состояния. Этот факт лишь подтверж-

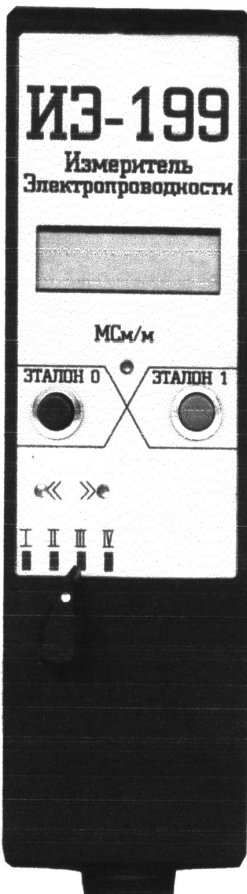
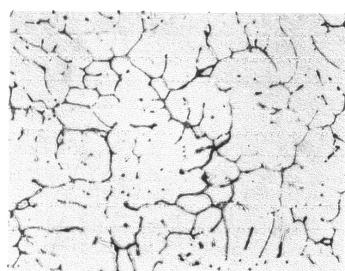


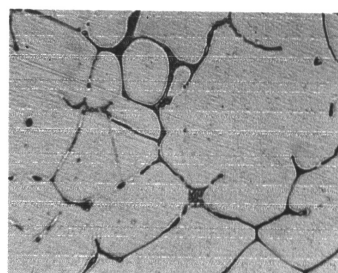
Рис. 2. Измеритель электропроводности (ИЭ-199)

Таблица 5. Стандартные образцы удельной электрической проводимости « γ » сплавов [6]

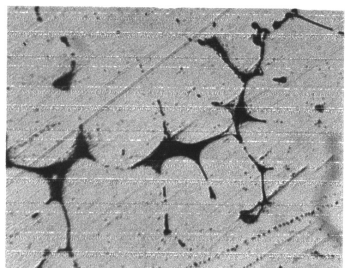
Номер образца	γ , МСм/м	Сплавы	Количество образцов в комплекте
3447-89П-3458-89П	0,55 - 2,14	титановые	12
3435-86-3446-86	3,20 - 14,20	медные	12
1395-90П-1412-90П	14 - 37	алюминиевые	18
4529-89-4536-89	37,7 - 59,4	медные	8



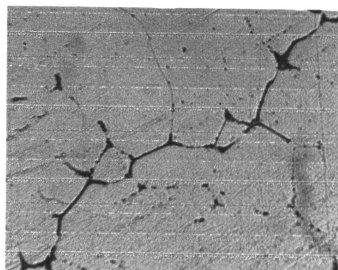
а x100



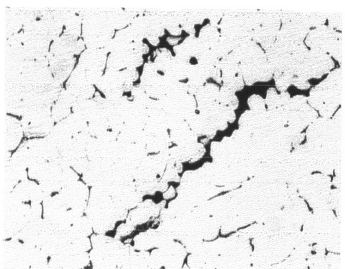
б x300



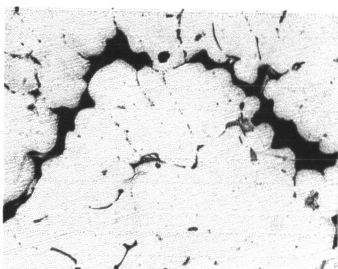
в x300



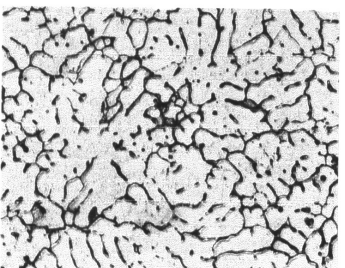
г x300



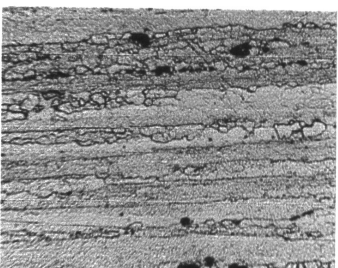
д x100



е x200



ж x100



з x300

Рис. 3. Микроструктуры образцов из сплава В95

Таблица 6. Влияние структурного состояния на электропроводимость сплава В95

Номер образца	Структурное состояние	Твердость HV	Электропроводимость, МСм/м	Структура	Примечания
2	состояние поставки	123	16,4	рис. 3 (а, б)	партия с повышенным браком
5	после закалки и старения	165	17,9	рис. 3 (в, з)	- " -
6	- " -	165	17,5	рис. 3 (д, е)	из разрушенной при механической обработке детали
7	состояние поставки	88	14,4	рис. 3 (ж)	партия с качественными деталями
7к	после закалки и старения	162	21,0	рис. 3 (з)	- " -

дает необходимость входного контроля и простую возможность его проведения с помощью вихретокового прибора.

Ограничения используемого метода неразрушающего контроля связаны с крайними эффектами (расстояние до края детали не должно превышать радиуса накладного датчика), толщиной детали (не менее 1,0 мм) и неконтролируемым зазором между поверхностью детали и датчиком. Метод может быть также использован для других ферромагнитных сплавов (медных, титановых, магниевых).



Список литературы

1. Колобнев И. Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.
2. Телешов В. В. Исследование электрических свойств в областях металловедения, термической обработки и контроля качества полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2000.1. – № 3. – С. 52-78.
3. Наумов М. Н., Микляев П. Г. Резистометрический неразрушающий контроль деформируемых алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
4. Илларионов Э. И., Ривлин Ф. М. Удельное электросопротивление и удельная электропроводимость промышленных алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2000. – № 5. – С 51-55.
5. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.
6. Илларионов Э. И. Метрологическое и приборное обеспечение для изменения удельной электрической проводимости металлов вихретоковым методом // Технология легких сплавов. – 2001. – № 2. – С. 46-54.
7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник /Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 352 с.
8. Бакунов А. С., Мужижкий В. Ф., Попов Б. Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом // Дефектоскопия. – 1995. – № 2. – С. 61-67.

Поступила 12.08.2010