

Эффект от наложения электромагнитных полей на алюминий и его сплавы во время кристаллизации

М. М. Ворон, В. М. Дука, Е. А. Дрозд

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,
Киев, e-mail: mihail.voron@gmail.com

Рассмотрено влияние наложения электромагнитных полей при кристаллизации на структуру и качество алюминиевых сплавов, полученных литьем. Проведена оценка усадочных дефектов и изменения микроструктуры и механических свойств чистого алюминия и его сплавов при наложении переменного электромагнитного поля на металл во время кристаллизации.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, методы физического воздействия на расплав, наложение электромагнитных полей при кристаллизации.*

Введение

Алюминиевые сплавы относятся к одним из наиболее востребованных металлических материалов. Технологии производства изделий из алюминиевых сплавов в подавляющем большинстве включают процессы плавки и литья с последующим получением готового изделия либо полуфабриката. Качество, технологичность и комплекс механических свойств этих продуктов во многом зависят от дефектности получаемых отливок и структуры литого металла [1].

Ввиду ряда особенностей физических свойств алюминия [2] получение из него качественных литых изделий или полуфабрикатов часто требует дополнительных технологических приемов: модифицирования, контролируемого теплоотвода или физического воздействия на расплав при плавке и/или кристаллизации [3—5].

Применение модификаторов не всегда оправдано из-за высокой стоимости, трудностей их ввода в расплав и возможности неравномерного усвоения. Поэтому все большую популярность в последние годы приобретают методы обработки расплава при помощи различных физических воздействий [5—10].

Среди наиболее универсальных и технологически приемлемых методов обработки расплава физическим воздействием можно выделить кавитационную, вибрационную и электромагнитную обработки. Одним из наиболее действенных и технологически оправданных может считаться метод наложения электромагнитных полей на металл при кристаллизации. Недавний опыт многих специалистов [11—14] подтвердил, что кристаллизация в магнитном поле способствует измельчению структуры металла, гомогенизирует химический состав сплавов, повышает растворимость легирующих элементов. Конкретно для алюминиевых сплавов это воздействие выражается в измельчении дендритной структуры и интерметаллидных фаз, изменении количества эвтектики и повышении степени легирования твердого раствора. Помимо положительного воздей-

© М. М. Ворон, В. М. Дука, Е. А. Дрозд, 2015

ствия на структуру металла, наблюдается также повышение качества отливки, что выражается в устранении ряда дефектов усадочного характера.

Экспериментальная часть

В данной работе использовали чистый алюминий марки А5, литейный сплав АК7 и деформируемый сплав Д16. Хотя последний считается непригодным для литья, эксперименты проводили с целью количественной и качественной оценок его фазового состава. Металл плавил в печи сопротивления в графитовом тигле и заливали в графитовый кристаллизатор Ø70 и высотой 250 мм. Толщина стенок кристаллизатора 40 мм обеспечивала медленный теплоотвод. Полученные цилиндрические отливки имели высоту 170—200 мм и массу 1,7—2 кг. Заливку металла проводили с наложением электромагнитного поля (ЭМП) и без него при температурах расплава 680 и 800 °С. Система наложения электромагнитных полей состояла из двух медных водоохлаждаемых катушек Ø180 мм, к которым подводился ток 600 А, 24 В, 50 Гц. Наложение поля длилось с момента полной заливки расплава в кристаллизатор до затвердевания металла и составляло 10—15 с. Движение силовых линий магнитного поля создавало перемещение жидкого металла от стенок к центру кристаллизатора.

Дефекты отливок оценивали визуально, предварительно распилив слиток на две части по плоскости высоты через центр цилиндра. Для исследования микроструктуры получали образцы из объемов ближе к центру слитка, которые далее шлифовали, полировали и травили согласно стандартным методикам [15]. Микроструктурные исследования проводили на оптическом микроскопе Neophot-21.

На первом этапе исследований получали опытные цилиндрические отливки алюминиевых сплавов А5, АК7 и Д16 и оценивали их дефектность. Результаты приведены на рис. 1.

Для чистого алюминия марки А5 очевидна и характерны открытая усадочные раковина, которая уменьшается при наложении на металл во время кристаллизации электромагнитного поля. При более высокой температуре заливки усадочная раковина при наложении ЭМП устранялась наиболее эффективно.

Для алюминиевых сплавов характерны как открытые, так и закрытые усадочные раковины, которые уменьшаются при наложении на металл во время кристаллизации электромагнитного поля. При температуре заливки 680 °С усадочная раковина при наложении ЭМП устранялась наиболее эффективно.

На рис. 2 изображены некоторые наиболее показательные макроструктуры отливок исследуемых сплавов, полученных с наложением электромагнитного поля и без него при разных температурах заливки металла. Установлено, что наложение ЭМП приводит к существенному уменьшению размеров столбчатых и равноосных кристаллов. На рис. 2, б, в также видно, что количество мелких дефектов в виде пор уменьшается.

На рис. 3 приведены некоторые наиболее показательные микроструктуры полученных отливок исследуемых сплавов при разных температурах заливки металла с наложением электромагнитного поля и без него. Видно, что наложение ЭМП приводит к измельчению зерна. Это наиболее харак-

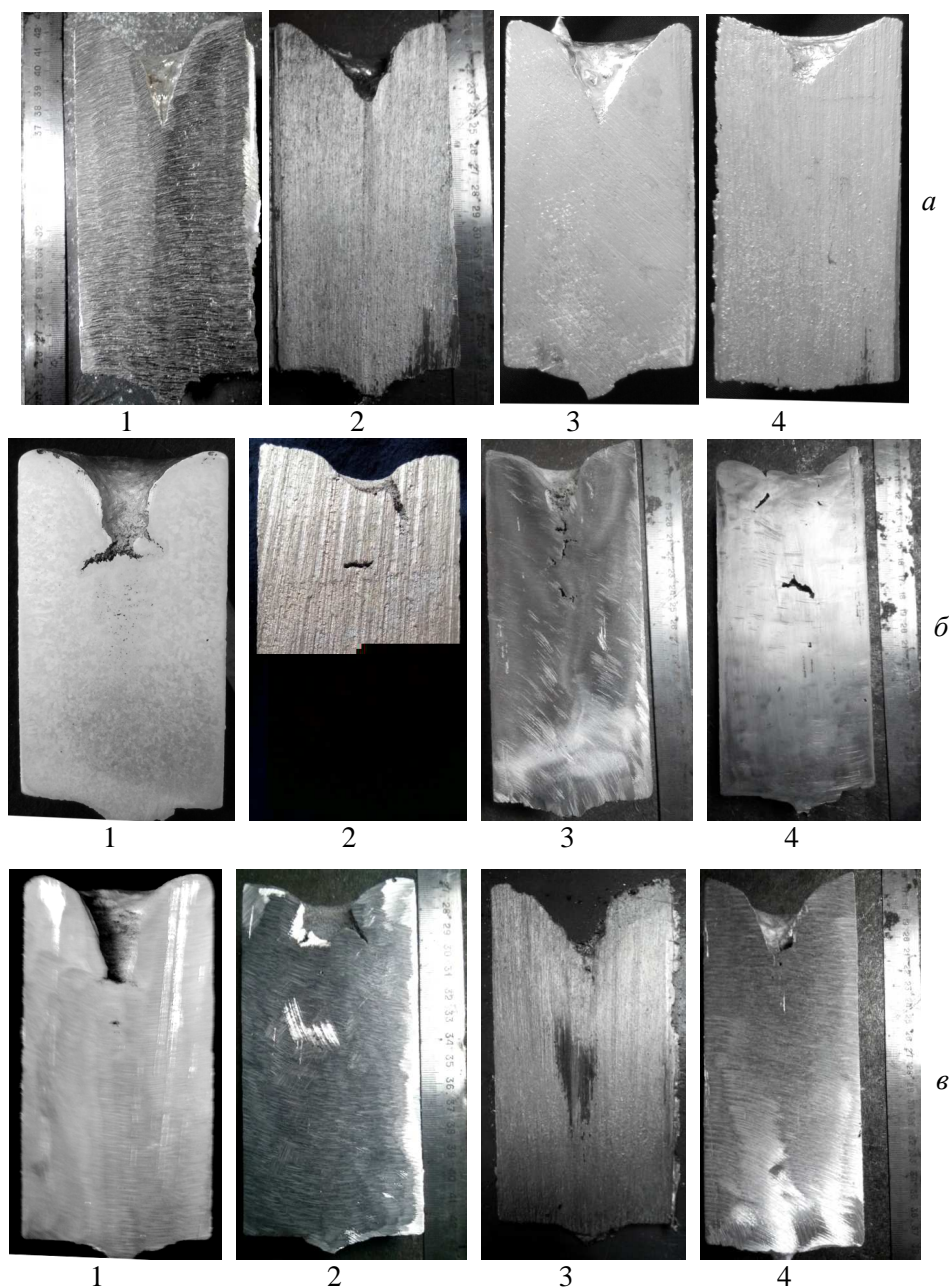


Рис. 1. Дефекты отливок сплавов А5 (а), АК7 (б) и Д16 (в), полученных по разным режимам: 1 — 680 °С; 2 — 680 °С + ЭМП; 3 — 800 °С; 4 — 800 °С + ЭМП.

терно для сплавов, а не для чистого алюминия. Также отмечается уменьшение размеров веток дендритов и большая равномерность структуры.

Данные количественной оценки структурных изменений исследуемых сплавов представлены в табл. 1. Как следует из таблицы, в случаях использования ЭМП наблюдаются заметные изменения основных структурных параметров. У чистого алюминия марки А5 увеличиваются зоны

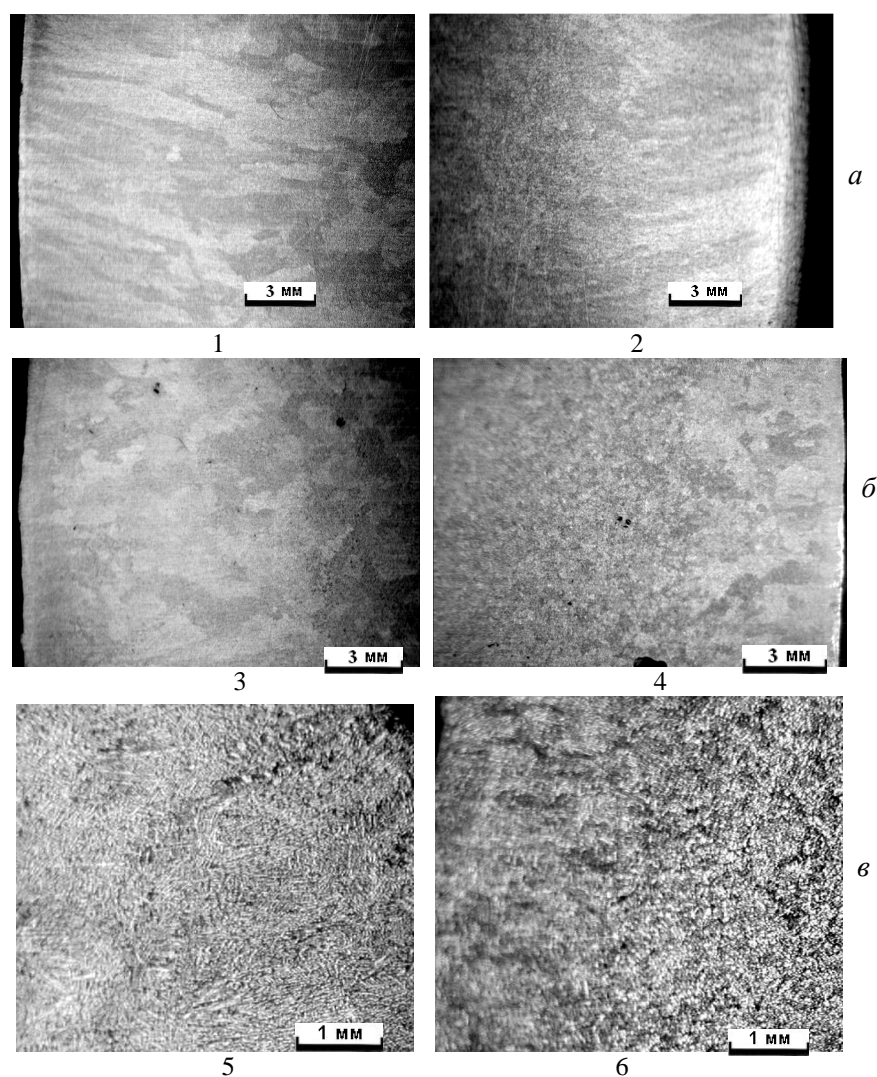


Рис. 2. Макроструктура отливок сплавов А5 (а), АК7 (б) и Д16 (в), полученных по разным режимам: 1, 5 — 800 °С; 2, 6 — 800 °С + ЭМП; 3 — 680 °С; 4 — 680 °С + ЭМП.

столбчатых кристаллов от 6 до 15 мм, но при этом после низкотемпературной заливки дисперсность столбчатых кристаллов несколько возрастает. В то же время в центральной области отмечается значительное измельчение зерен — в 3,6 раза после высокотемпературной заливки.

Для алюминиевого сплава марки Д16 наложение электромагнитных полей вызывает значительное измельчение структуры — до 2,3—5 раз (табл. 1). Однако необходимо отметить, что после низкотемпературной заливки сплава макроструктура отличается большей однородностью по сечению отливки. Для сплава алюминия марки АК7 после воздействия ЭМП также наблюдается значительное измельчение зерен (табл. 1). Но при этом наибольшее измельчение и однородность макроструктуры фиксируются после высокотемпературной заливки, поскольку при низкой температуре заливки образуется пристеночная зона из крупных зерен.

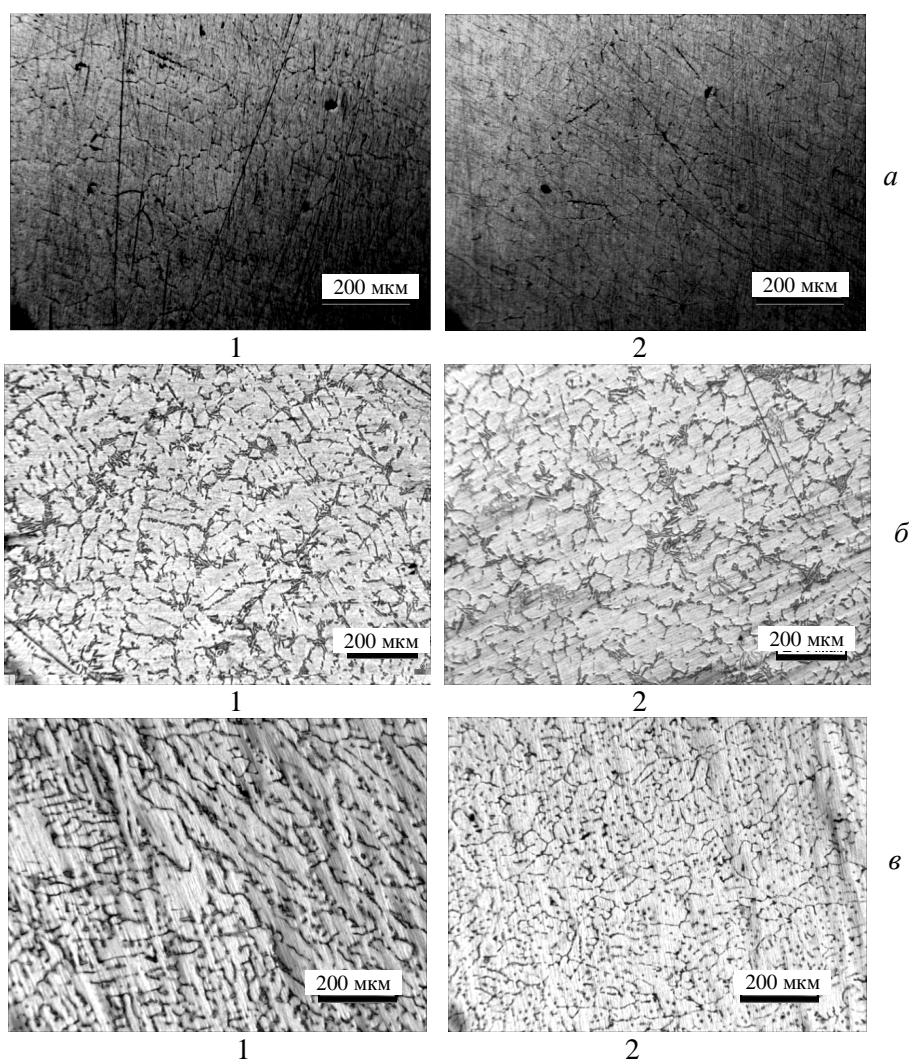


Рис. 3. Микроструктура отливок сплавов А5 (а), АК7 (б) и Д16 (в), полученных по разным режимам: 1 — 800 °С; 2 — 800 °С + ЭМП.

Анализ микроструктуры отливок сплавов выявил следующие особенности. Дендритный параметр первичных кристаллов алюминиевого твердого раствора у пристеночной области отливок практически не изменяется под воздействием ЭМП, а в центральной области увеличивается примерно на 15—20%. Также следует отметить, что под воздействием ЭМП изменяется морфология первичных кристаллов в центральной области: от дендритной до розеточной. Изменения размерных параметров кремния и других эвтектических фаз количественно не оценивали.

Для всех опытных слитков проводили испытания механических свойств. Их результаты приведены в табл. 2. Влияние ЭМП на сплав А5 главным образом выражается в существенном увеличении пластичности (в 1,5—2 раза). У сплава АК7 пластичность возрастала до 2—5%, что намного больше, чем величины, регламентируемые стандартом. Сплав Д16 в литом состоянии после заливки с 680 °С и наложения ЭМП имел

Т а б л и ц а 1. Параметры структуры исследуемых алюминиевых сплавов, измеренные на периферии (1) и в центре (2) отливки

Сплав	$T_{ликв},$ °С	$\Delta T_{пер},$ °С	$T_{зал},$ °С	Обра- ботка	$D, \text{ мм}$		$K, \text{ раз}$		$d, \text{ мкм}$	
					1	2	1	2	1	2
А5	660	140	800	—	8,3/0,65*	3,2	0,7	3,6		
				ЭМП	12/0,7*	0,9				
		20	680	—	6,3/0,4*	1,0	0,4	0,8		
				ЭМП	15/0,3*	1,3				
Д16	640	160	800	—	0,7	0,9	2,3	5,0	29	35
				ЭМП	0,3	0,18			23	41
		40	680	—	0,8	0,6	2,7	2,4	30	36
				ЭМП	0,3	0,25			31	43
АК7	620	180	800	—		1,2		3,3	27	29
				ЭМП	0,37	0,36			28	42
		60	680	—	1,4	1,2	1,2	3,0	19	38
				ЭМП	1,2	0,4			21	44

Примечание: $T_{ликв}$, $\Delta T_{пер}$, $T_{зал}$ — температуры ликвидуса, перегрева и заливки сплава; D — размер зерна; K — измельчение/укрупнение зерна; d — дендритный параметр; *в числителе — длина зоны столбчатых кристаллов, в знаменателе — толщина кристаллов.

Т а б л и ц а 2. Механические свойства исследуемых и стандартных сплавов

Сплав	$\sigma_t, \text{ МПа}$	$\sigma_b, \text{ МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
А5 (ГОСТ 17232-99), плита	—	64—78	20	—
А5, 800 °С	55	63	24	38
А5, 800 °С + ЭМП	51	59	32	36
А5, 680 °С	58	72	32	34
А5, 680 °С + ЭМП	62	78	46	40
АК7 (ГОСТ 1583-93), отливка	—	127—196	0,5—1	—
АК7, 800 °С	134	152	—	—
АК7, 800 °С + ЭМП	141	167	2	—
АК7, 680 °С	127	165	—	—
АК7, 680 °С + ЭМП	138	172	5	—
Д16 (ГОСТ 21488-97), пруток	120	245	12	—
Д16, 800 °С	98	170	3	—
Д16, 800 °С + ЭМП	102	189	10	—
Д16, 680 °С	115	224	8	—
Д16, 680 °С + ЭМП	124	241	7	—

имел уровень прочности и пластичности ненамного ниже, чем свойства стандартного деформированного прутка.

Таким образом, анализ структуры алюминиевых сплавов А5, АК7 и Д16 выявил существенное влияние ЭМП на формирование зеренной структуры отливок, однако характер изменений имеет свои особенности

для разных сплавов. Для литейных сплавов описанный способ повышает пластичность отливок при сохранении уровня прочности, а для деформированных позволяет получать высококачественные литые заготовки и полуфабрикаты с довольно высоким уровнем механических свойств для последующей деформации и термической обработки.

1. *Алюминиевые сплавы* // *Авиация : (Энциклопедия)* / Гл. ред. Г. П. Свищев. — М. : Науч. изд-во "Большая рос. энцикл." : Центр. аэрогидродинам. институт им. Н. Е. Жуковского, 1994. — 736 с.
2. *Смитлз К. Дж.* *Металлы : (Справ.)* / Пер. с англ. — М. : Metallurgia, 1980. — 446 с.
3. *Бялік О. М.* *Металознавство : (Підручник)* // [О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко]. — К. : ІВЦ "Політехніка", 2001. — 375 с.
4. *Баландин Г. Ф.* *Основы теории формирования отливки : (Учебное пособие).* В 2-х ч. — М. : Машиностроение, 1976. — 328 с.
5. *Ефимов В. А.* *Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов* / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. — М. : Metallurgia, 1995. — 272 с.
6. *Эскин Г. И.* *Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформированных легких сплавов* // *Вестник Российской академии естественных наук. Metallurgia.* — 2010. — № 3. — С. 82—89.
7. *Котлярский Ф. М.* *Термовременная обработка алюминиевых сплавов* / [Ф. М. Котлярский, А. Г. Борисов, В. Н. Цуркин и др.] // *Процессы литья.* — 2012. — № 3. — С. 42—53.
8. *Мысик Р. К.* *Использование вибрационной обработки при производстве стальных отливок* / Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, И. А. Груздева // *Науч. труды XIV отчетной конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.* — Екатеринбург, 2008. — № 41. — С. 30—33.
9. *Лобода П. І.* *Вплив ультразвуку на структуру і властивості спрямовано закристилізованих евтектичних сплавів* / П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, Т. О. Соловйова // *Металознавство та обробка металів.* — 2012. — № 4. — С. 23—28.
10. *Дубоделов В. И.* *Электромагнитное и электрогидроимпульсное воздействие на расплав многокомпонентного алюминиевого сплава* / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, В. Н. Фиксен // *Литейное производство на рубеже столетий : Тез. докл., 2—6 июня 2003 г., ФТИМС НАН Украины.* — К. : Процессы литья, МП "Информлитъ", 2003. — С. 23—26.
11. *Волков Г. В.* *Обработка расплава внешними физическими полями как инструмент воздействия на элементы различных структурных уровней* // *Там же.* — С. 41—42.
12. *Гладков А. С.* *Разработка формы для получения трубных заготовок из тугоплавких металлов с наложением электромагнитных полей при кристаллизации расплава* // *Литейное производство : Высококачественные отливки на основе эффективных технологий : Тез. докл., 2—4 июня 2004 г., ФТИМС НАН Украины.* — К. : Процессы литья, МП "Информлитъ", 2004. — С. 80—81.
13. *Дубоделов В. И.* *Структура и свойства алюминиевого сплава эвтектического состава, закристилізованного в постоянном магнитном поле* / [В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, А. В. Косинская, В. Я. Хоружий] // *Процессы литья.* — 2010. — № 4. — С. 14—20.
14. *Скоробагатько Ю. П.* *Фізичне модифікування заевтектичних алюмінієвих сплавів з використанням електромагнітної дії* // *Металознавство та обробка металів.* — 2011. — № 4. — С. 44—49.
15. *Способы металлографического травления : (Справ. изд.)* / Пер. с нем., М. Бекерт, Х. Клемм. — М. : Metallurgia, 1988. — 400 с.

Ефект від накладання електромагнітних полів на алюміній та його сплави під час кристалізації

М. М. Ворон, В. М. Дука, О. А. Дрозд

Розглянуто вплив електромагнітних полів при кристалізації на структуру та якість алюмінієвих сплавів, одержаних литвом. Проведено оцінку усадкових дефектів та зміни мікроструктури і механічних властивостей чистого алюмінію і його сплавів при накладанні змінного електромагнітного поля на метал під час кристалізації.

Ключові слова: алюмінієві сплави, методи фізичного впливу на розплав, накладання електромагнітних полів при кристалізації.

The effect of electromagnetic fields imposition on aluminum and its alloys during solidification

M. M. Voron, V. M. Duka, O. A. Drozd

The effect of electromagnetic fields imposition and its influence on the structure and quality of the cast aluminum and its alloys is overviewed. The shrinkage defects and changes in microstructure and mechanical properties of pure aluminum and its alloys after solidification in alternating electromagnetic field are estimated.

Keywords: aluminum alloys, methods of physical influence on the melt, imposition of electromagnetic fields in the crystallization.