

УДК 538.27:669.715

**В. И. Дубоделов, Ю. П. Скоробагатько, В. Н. Фиксен,  
Н. А. Слажнев, М. С. Горюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

*Рассмотрены функциональные возможности магнитодинамического оборудования для приготовления и разливки алюминиевых сплавов. Исследовано комплексное МГД воздействие на жидкий доэвтектический силумин в магнитодинамической установке. Установлено влияние такой электрофизической обработки на структуру и свойства сплава в твердом состоянии.*

*Розглянуто функціональні можливості магнітодинамічного обладнання для приготування і розливання алюмінієвих сплавів. Досліджено комплексну МГД дію на рідкий доевтектичний силумін у магнітодинамічній установці. Встановлено вплив такої електрофізичної обробки на структуру та властивості сплаву в твердому стані.*

*There are considered the functional capability of magnetodynamic equipment for preparation and pouring of aluminium alloys. Integrated MHD action on liquid hypocutectic silumin in the magnetodynamic installation is studied. It is determined the influence of such electrophysical treatment on the structure and properties of alloy in the solid state.*

**Ключевые слова:** электрофизическая обработка, магнитодинамическая установка, доэвтектический силумин, температура, выдержка, микроструктура, микрообласти.

Сплавы системы Al-Si благодаря сочетанию высоких литейных, механических и специальных свойств широко используются в различных отраслях промышленности. Однако развитие высокотехнологичной техники обуславливает необходимость постоянного повышения уровня их свойств. С этой целью совершенствуют процессы обработки сплавов и кристаллизации отливок [1]. Поскольку традиционные способы решения этой проблемы себя исчерпали, то ведется активный поиск новых, основанных в том числе на использовании внешних воздействий на жидкий металл [2, 3]. При этом к числу наиболее перспективных из них относятся те, в которых применяются физические способы обработки металлических расплавов [4].

В частности, в последние годы в литейном производстве широкое распространение получили электрофизические способы воздействия на расплавленные металлы [5]. Это связано с тем, что они не только способствуют очистке алюминиевых сплавов от газов и неметаллических включений, но и приводят к улучшению структуры и повышению свойств литых заготовок [6], изготовленных из них.

Для практической реализации таких концептуальных подходов весьма перспективным представляется применение многофункциональных электротехнологических установок магнитодинамического типа (МДН), разработанных в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины. Они широко используются в промышленности в качестве миксеров-дозаторов черных и цветных металлов [7].

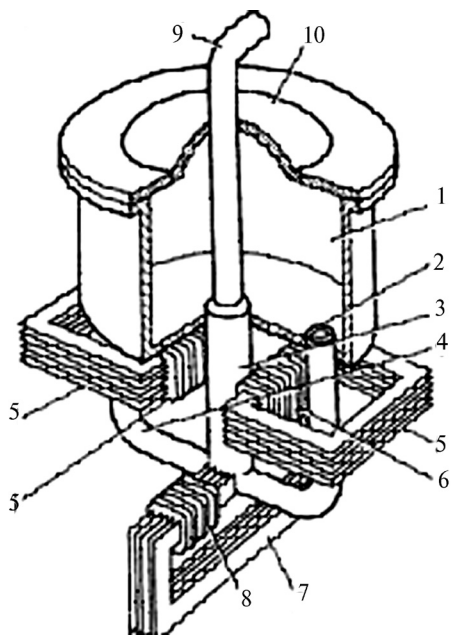


Рис. 1. Магнитодинамическая установка МДН-6А: 1 – тигель; 2-4 – боковые и центральная ветви индукционного канала; 5, 6 – соответственно магнитопровод и обмотка индуктора; 7, 8 – магнитопровод и обмотка электромагнита; 9 – съемный металлопровод; 10 – крышка

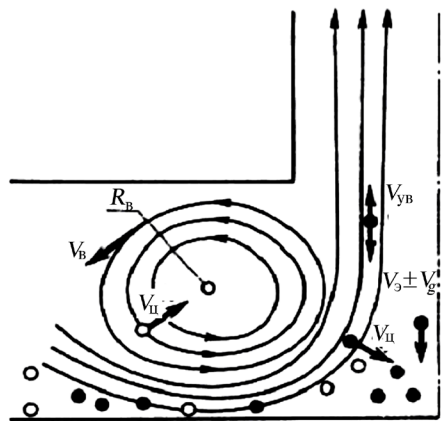


Рис. 2. Поведение неметаллических примесей в канале и рабочей зоне установки МДН-6А [10]: светлые точки (○) –  $H_2$ , темные точки (●) –  $Al_2O_3$ ,  $V_3/V_g = (50-100)$ ;  $R_v$  – радиус вихря, создаваемого сбоку от рабочей зоны, м,  $V_v$  – результирующая линейная скорость движения включения или пузыря под действием нескольких сил, м/с,  $V_3$  – скорость перемещения включения или пузыря под действием электромагнитной силы, м/с,  $V_g$  – скорость движения включения или пузыря под действием силы тяжести, м/с,  $V_u$  – скорость перемещения включения или пузыря под действием центробежной силы, м/с,  $V_{uv}$  – скорость движения включения или пузыря под действием увлекающих потоков расплава, м/с

В частности, установки типа МДН-6А применяются для внепечной обработки и разливки алюминиевых расплавов [7]. Они обеспечивают регулируемый индукционный нагрев жидкого металла, его электромагнитное перемешивание, выдержку и управляемую электромагнитную разливку по закрытым трубопроводам в металлоприемники (рис. 1) [8].

Конструктивно такое устройство (рис. 1) [8] представляет собой индукционную каналную электропечь, совмещенную с электромагнитным насосом.

Тигель 1 установки сообщается с каналами 2-4. Каналы 2 и 4 охвачены магнитопроводами индукторов 5 с обмотками 6. Участок соединения каналов 2-4 (рабочая зона – р. з.) находится в межполюсном зазоре магнитопровода электромагнита 7 с обмотками 8. С каналом 3 стыкуется съемный металлопровод 9, а тигель закрывается крышкой 10. Раздельное управление электромагнитными системами позволяет независимо регулировать главные параметры процесса обработки жидкого металла – температуру и скорость движения.

Нагрев расплава в магнитодинамической установке происходит согласно закону Джоуля–Ленца при прохождении через жидкий металл в каналах электрического тока, возбужденного индукционным путем. Эта особенность характерна для всех типов каналных печей и миксеров, однако принципиальным отличием от них магнитодинамических установок является наличие дополнительной электромагнитной системы [7]. Она создает в рабочей зоне переменное магнитное поле, которое взаимодействует с индуцированным переменным электрическим током в канале с металлическим расплавом, в результате в р. з. возникает однонаправленная пульсирующая электромагнитная сила, под действием которой жидкий металл приходит в движение, а по бокам р. з. генерируются вихревые структуры (рис. 2). При этом характер, интенсивность и направление перемещения расплава зависят от параметров и особенностей включения индукторов и электромагнита магнитодинамической установки. На практике реализуются различные схемы транзитного движения металла по каналам МДН-6А [8] (рис. 3, а-в).

Электромагнитные и магнитогидродинамические воздействия на жидкий металл, осуществляемые в магнитодинамических агрегатах [9], подобны тем, которые наблюдаются в обычных индукционных каналных печах [10]. Так, пинч-эффект и вихревые силы проявляются в

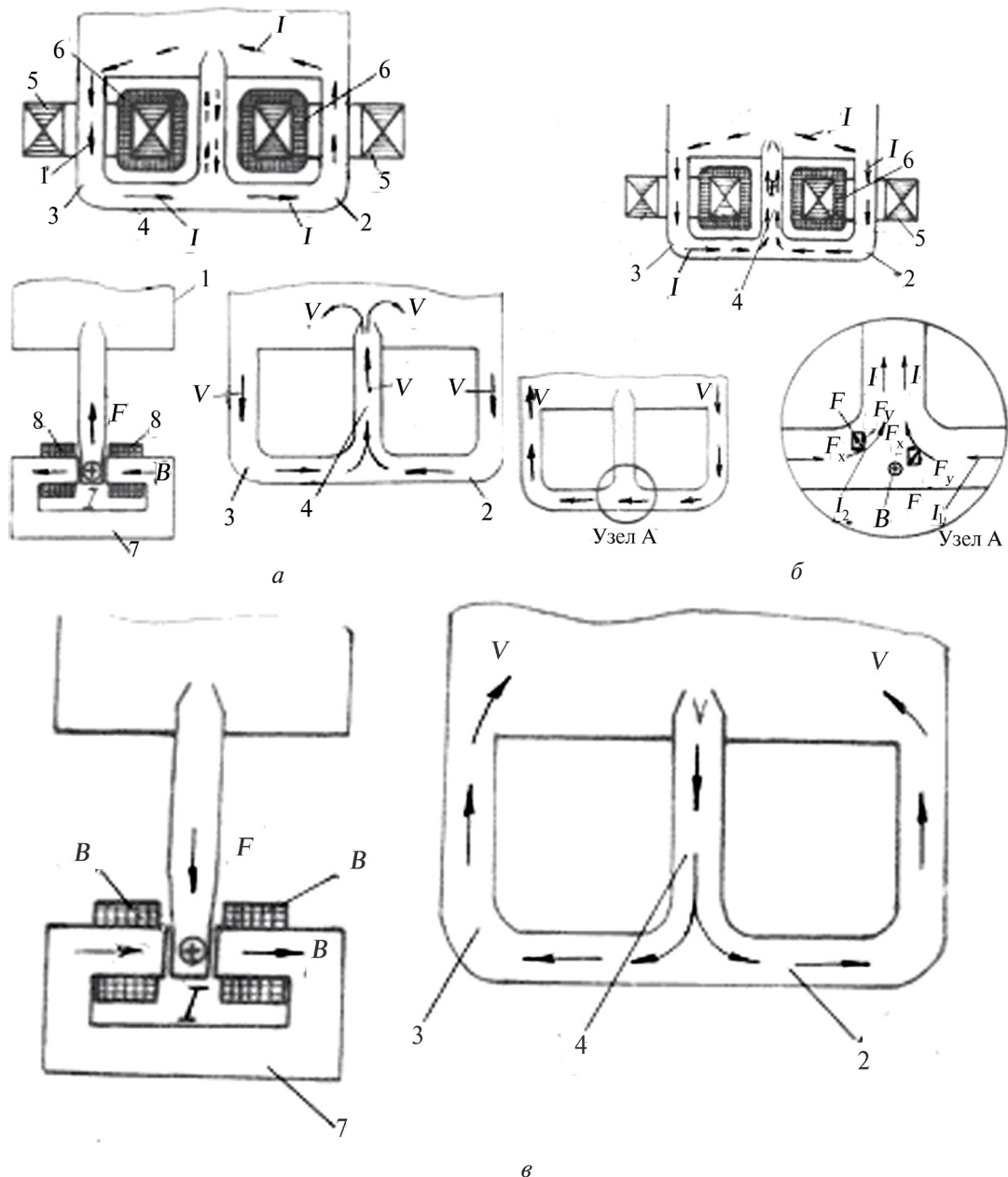


Рис. 3. Схемы движения жидкого металла по контуру «тигель-канал-тигель» магнитодинамической установки МДН-6А [8] (номера позиций соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1): а - при включении обмоток индукторов в синфазном режиме, а электромагнита – в режиме «нагнетание», б - при включении обмоток индукторов в противофазном режиме, а электромагнита – в режиме «боковое перемешивание», в - при включении обмоток индукторов в синфазном режиме, а электромагнита – в режиме «всасывание»;  $I$  – электрический ток,  $I_1, I_2$  – электрический ток в боковых ветвях канала,  $B$  – индукция магнитного поля, создаваемого электромагнитом,  $F$  – результирующая электромагнитная сила,  $F_x, F_y$  – составляющие электромагнитной силы по осям координат,  $V$  – направление движения расплава

каждом из типов названного оборудования, однако, в магнитодинамических устройствах они более контролируемые и усиливаются по сравнению с традиционными каналными печами. Кроме того, в магнитодинамических установках можно создавать значительные электромагнитные усилия (до  $(20-40) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^3$ ) и давления  $(2,5-3,0) \cdot 10^5 \text{ Па}$  [10-12], которые можно применять для обработки и перемешивания жидких сплавов (табл. 1).

При использовании установок МДН-6А в качестве миксеров-дозаторов алюминиевых сплавов происходит постепенное зарастание полостей каналов преимущественно оксидом алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), который находится в жидком металле во взвешенном состоянии [11].

**Таблица 1. Электромагнитные и МГД эффекты, проявляющиеся в индукционных каналах электротехнологических установок [10-12]**

Эффекты	Тип индукционного оборудования для металлургии и литейного производства	
	индукционная канальная печь	магнитодинамическая установка
Тепловой (в соответствии с законом Джоуля-Ленца): $\vec{q} = j(E + v \times B)$	присутствует и контролируется	присутствует и контролируется
Моторный: $dF_{\max} = I_{C\max} dl B_{S\max} \sin(dl, B_S);$ $p_{\text{mot}} = k_1 \frac{I_i \cdot U_i \cdot \sin\varphi}{f \cdot b_S \cdot l_S}$	присутствует и контролируется частично	присутствует и контролируется частично
Пинч-эффект: $p_{P\max} = k_2 \left(\frac{I_C}{a_C}\right)^2 \mu;$ $h_{\min} \geq \frac{p_{P\max} - p_{\text{atm}}}{k_3 \cdot \rho \cdot g}$	присутствует, контролируется частично и вреден для печи	присутствует и более контролируем (может быть использован для повышения качества жидкого металла)
Вихревых сил: $F_{\text{vort}} = k_4 \cdot I_C^2 \frac{b_{C2} - b_{C1}}{a_C}$	присутствует и контролируется частично	присутствует, усилен и более контролируем (включая эффект так называемого «электромагнитного сита», который может быть использован для повышения качества жидкого металла)

Имеется ряд публикаций, в которых подчеркивается решающая роль электромагнитных сил в процессе зарастания каналов индукционной канальной печи при работе на алюминиевых сплавах [7, 11], однако в установке МДН-6А этот процесс имеет свою специфику, обуславливаемую наличием рабочей зоны, в которой металл подвергается воздействию скрещенных электромагнитных полей [7].

Известно также, что на процесс зарастания каналов дополнительно влияют такие факторы, как изменение характера течения металла в поперечном электромагнитном поле и условий обтекания потоком расплава неэлектропроводных оксидных частиц, а также их вытеснение из проводящей жидкости [11].

Наряду с этим в магнитодинамических установках дополнительно наблюдаются два существенных фактора (табл. 2).

Если магнитное поле в канале индукционной печи - плоскопараллельное, то электромагнитная сила действует перпендикулярно продольной оси канала в направлении от индуктора. Так как реальное поле в канале отличается от плоскопараллельного, то частицы под действием его горизонтальной составляющей направляются к торцевым частям канала, но с меньшей скоростью [11].

В МДН-6А это явление не успевает развиваться, так как зарастание футеровки в рабочей зоне происходит быстрее, чем в канале, а плотность электромагнитных сил в р. з. в канале в несколько раз превышает плотность сил [10]. При индукции 0,1-0,15 Тл скорость движения неэлектропроводных частиц под действием электромагнитных сил выше скорости перемещения жидкого металла, поэтому частицы не могут преодолеть границы р. з. и

**Таблица 2. Особенности силового электромагнитного воздействия на жидкий металл в индукционных канальных агрегатах [7]**

Электромагнитное воздействие	Тип индукционного оборудования для металлургии и литейного производства	
	индукционная канальная печь	магнитодинамическая установка
Объемная электромагнитная сила:  $F_E = \int_V \text{Re} [\vec{j} \vec{B}] dV$	отсутствует	присутствует, контролируется и полностью используется (для перемешивания и разливки металла)
Электромагнитное давление:  $p = [\vec{j} \vec{B}] L \cos \alpha_1$	отсутствует	присутствует, контролируется и полностью используется (для разливки металла и силового воздействия на затвердевающую отливку)

накапливаются вблизи нее. Это и является основной причиной зарастания оксидными включениями каналов в МДН-6А.

Высокотемпературные рентгенографические исследования структуры жидкого и твердого алюминиевого сплава (10-13 % Si), подвергающегося комплексным МГД воздействиям в процессе выдержки в магнитодинамических установках (перемешивание, в том числе вихревое, электромагнитная вибрация, ток большой плотности, сжатие и другие) (см. табл. 1, 2) [13], позволили выявить уменьшение размеров упорядоченных микрообластей в расплаве с 0,19 до 0,16 нм (рис. 4). Установлено наличие микрообластей твердого раствора кремния в алюминии (ближний порядок по типу гранцентрированной решетки) и твердого раствора кремния в алюминии (кубическая решетка). Показано, что после обработки в МДН сплавы становятся более однородными, вследствие чего в закристаллизовавшихся отливках наблюдается более мелкая структура [14].

Целью настоящей работы было использование функциональных возможностей магнитодинамических установок типа МДН-6А для обеспечения рафинирующей и модифицирующей обработки алюминиевых расплавов за счет комплексного МГД воздействия, а также определение влияния длительности выдержки жидкого силумина в данном агрегате на структуру и свойства сплава.

В качестве исследуемого металла в экспериментах использовали алюминиевый сплав, химический состав которого представлен в табл. 3.

Для оценки эффективности применения электротехнологических установок магнитодинамического типа в качестве устройств, обеспечивающих, наряду со своими основными функциями (нагрев, перемешивание и регулируемая электромагнитная заливка алюминиевого сплава в литейную форму), и электрофизическую обработку расплавов силуминов, в настоящей работе были проведены специальные экспериментальные исследования.

В настоящей работе экспериментально проверялась гипотеза о том, что выдержка алюминиевого расплава с циркуляцией в системе “тигель-канал-тигель” магнитодина-

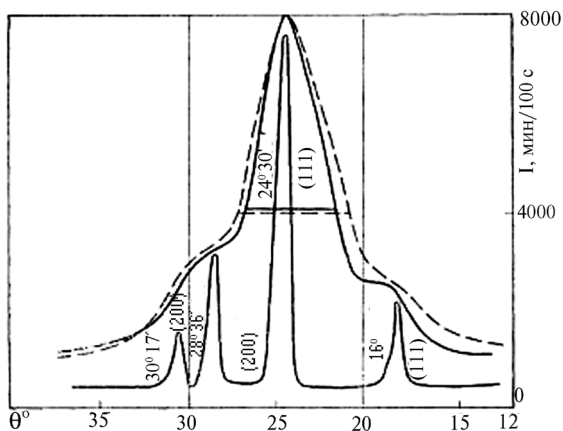


Рис. 4. Кривые интенсивности рассеянного рентгеновского излучения



Таблица 3. Химический состав алюминиевого сплава

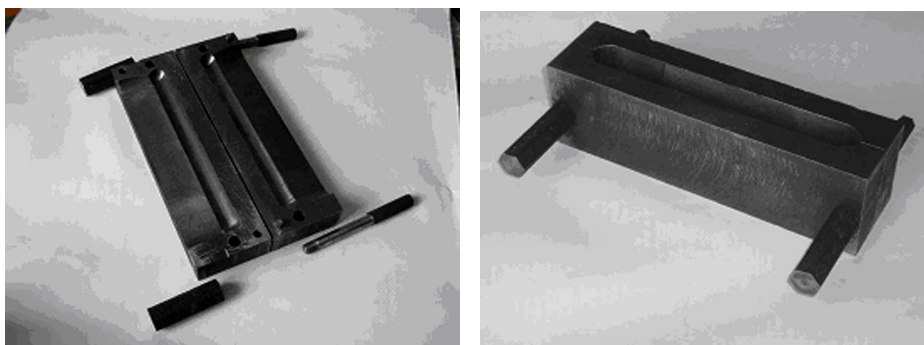
Алюминиевый сплав системы Al-Si	Химические элементы, %							
	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ni	Ti
Сплав № 1	7,15	0,38	0,03	0,18	0,10	0,10	-	0,029
Сплав № 1 после 17 ч выдержки в МДН	6,67	0,41	0,03	0,22	0,10	0,10	-	0,024

мического устройства воздействует на процессы его рафинирования, модифицирования и на изменение структуры и свойств силуминов.

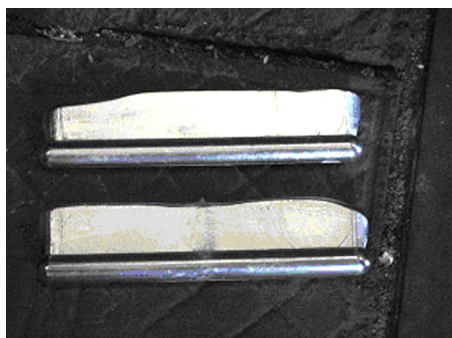
Ранее было установлено, что электродинамическая вибрация, возникающая в рабочей зоне магнитодинамической установки, и вихревые структуры в ее каналах способствуют дегазации металла от водорода, а эффект «электромагнитного сита» – от неметаллических включений [11].

В настоящей работе экспериментально проверялась гипотеза о том, что постоянное влияние на алюминиевый расплав при его выдержке с циркуляцией в системе «тигель-канал-тигель» факторов, реализуемых в магнитодинамическом устройстве (переменный электрический ток плотностью до  $10^6$  А/м<sup>2</sup>, переменное магнитное поле (до 0,3 Тл) и осциллирующие электромагнитные силы), приведет к разрушению имеющихся в жидком металле областей микронеоднородностей. Это, в свою очередь, может привести к диспергированию структурных составляющих сплава и изменению его свойств [15, 16].

В экспериментах использовали доэвтектический алюминиевый сплав, химический состав которого приведен в табл. 3. Его расплавляли в отражательной печи сопротивления без контакта с железосодержащими материалами. Расплав в количестве 70 кг заливали ковшом в предварительно просушенную и прогретую магнитодинамическую установку, где производили выдержку и электрофизическую обработку металла. На каждом этапе отбирали пробы сплава для последующих исследований в виде литых образцов, отлитых в чугунный кокиль (рис. 5, а-б).



а



б

Рис. 5. Чугунный кокиль для отбора проб (а) и литые образцы (б)

Перед заливкой измеряли температуру расплава и кокиля. При этом температуру кокиля поддерживали в интервале 210–235 °С, поскольку при таких ее значениях получают отливки из алюминиевых сплавов в промышленных условиях.

Пробы металла отбирали до и после обработки алюминиевых сплавов при реализации непрерывного цикла: “плавление металла в отражательной печи сопротивления – заливка жидкого сплава в магнитодинамическую установку – выдержка и перемешивание в ней расплава”. Итого было получено три партии образцов металла: после расплавления в отражательной печи сопротивления (№ 1); после заливки металла из отражательной печи сопротивления в магнитодинамическую установку, выдержки и перемешивания в ней в течение 60 мин (№ 2); после выдержки и перемешивания жидкого сплава в магнитодинамической установке в течение 17 ч (№ 3), табл. 3. Столь длительная выдержка расплава силумина была выбрана с учетом реально наблюдающейся специфики производственного процесса.

Анализ образцов алюминиевого сплава (исходного), отобранных из печи сопротивления, и контрольных – из тигля магнитодинамической установки, показал, что структура силумина после выдержки в магнитодинамической установке (МДУ) существенно изменяется. При этом она для всех образцов была дендритной (рис. 6) с близкими дендритными параметрами (порядка 20 мкм). Эвтектика – высокодисперсная и расположена в междендритном пространстве. Для доэвтектического алюминиевого сплава, подвергшегося электрофизической обработке при выдержке в магнитодинамическом устройстве (рис. 6, б), наблюдалась более дисперсная и однородная структура, чем в образце силумина, отобранном из печи сопротивления (рис. 6, а).

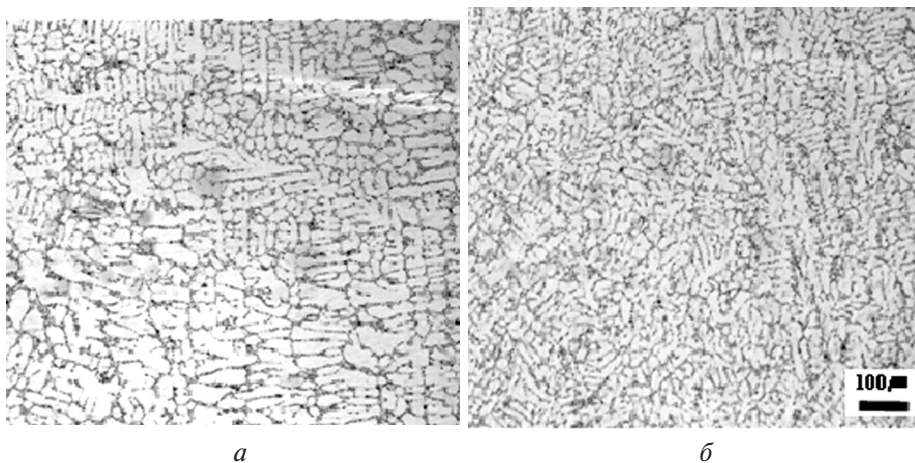


Рис. 6. Микроструктура образцов исходного силумина и после 17 ч выдержки в условиях перемешивания расплава в магнитодинамической установке

Что касается механических свойств исследуемого сплава (рис. 7, табл. 4), то для образцов металла, подвергшихся МГД воздействию, относительное удлинение более чем в 2 раза превышало значение этого показателя для исходного металла (из печи сопротивления). Важным обстоятельством является то, что пластические свойства алюминиевого сплава, выдерживавшегося в магнитодинамической установке в режиме постоянной циркуляции

**Таблица 4. Механические свойства силумина до и после электрофизической обработки в магнитодинамической установке**

Номер образца	Время обработки, ч	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
1	после расплавления	242,87	8,49
3	1	272,21	21,28
6	17	258,86	19,25

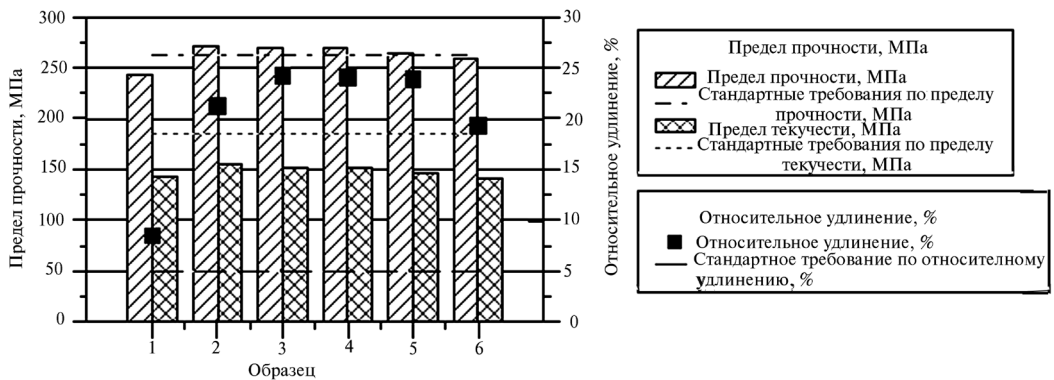


Рис. 7. Изменение механических свойств алюминиевого сплава при выдержке и перемешивании в магнитодинамической установке в течение 17 ч (образец № 1 – исходный расплав, № 3 – выдержка в течение 1 ч, № 6 – выдержка в течение 17 ч)

расплава (без нарушения защитной оксидной пленки на зеркале металла) до 17 ч, незначительно снизились только после 10 ч.

Сравнение уровня механических свойств доэвтектического силумина, полученного при электрофизической обработке в процессе выдержки в магнитодинамической установке с аналогичными показателями исходного сплава, показывает, что новая технология приготовления и выдержки такого сплава позволяет измельчить его структуру и увеличить относительное удлинение в 2,5 раза при том же уровне предела прочности.

Показано, что такие показатели достигаются за счет комплексного электрофизического воздействия на постоянно циркулирующий в магнитодинамической установке расплав доэвтектического силумина.



### Список литературы

1. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, Г. В. Черепок, С. В. Махов, Ю. М. Черновол. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 2005. – 512 с.
2. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
3. Гарнье М. Возможности и перспективы электромагнитной обработки материалов // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32, №2. – С. 131-140.
4. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
5. Колесниченко А. Ф. Технологические МГД установки и процессы. – Киев: Наук. думка, 1980. – 192 с.
6. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
7. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
8. Дубоделов В. И. Исследование влияния перемешивания жидкого металла в магнитодинамических установках на процесс приготовления литейных сплавов с труднорастворимыми и склонными к ликвации компонентами: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1971. – 227 с.
9. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 496 с.
10. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
11. Полищук В. П. Электромагнитное сито в магнитодинамических дозаторах алюминиевых сплавов // Технология обработки легких и специальных сплавов. – М.: Металлургия, 1994. – С. 412-421.
12. Блум Э. Я., Михайлов Ю. А., Озол Р. Я. Тепло- и массообмен в магнитном поле. – Рига: Зинатне, 1980. – 355 с.
13. Полищук В. П., Мельник Б. А. Рентгенографическое исследование структуры жидких сплавов Al-Si, выплавленных в магнитодинамической печи // Литейн. пр.-во. – 1989. - № 7. – С. 6-7.
14. Мельник Б. А., Руденко Н. Г., Краля В. Д. Рентгенографическое исследование структуры жидких



Al-Si сплавов // Интенсификация литейных технологий. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1989. – С. 39-42.

15. Ершов Г. С., Позняк Л. А. Микронеоднородность металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1985. – 216 с.
16. Ершов Г. С., Позняк Л. А. Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 382 с.

Поступила 05.05.2009

УДК 621.744.362

**П. В. Русаков**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ЛИТЕЙНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ОТОБРАЖЕНИЕМ ОБРАЗОВ ЭНЕРГОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Обоснована теория построения литейно-технологических систем (ЛТС) с модулями отображения образов внешнего энергосилового воздействия на отливку. Рассмотрено два класса ЛТС, построенных по принципам термического и механического преобразований вводимой энергии. Раскрыты отдельные системные решения структур адаптивных ЛТС.*

*Обґрунтована теорія побудови ливарно-технологічних систем (ЛТС) з модулями відображення образів зовнішнього енергосилового втручання в процес лиття. Розглянуто два класи систем, які побудовані на принципах термічного та механічного перетворення енергії, що вводиться. Розкриті окремі системні рішення структур адаптивних ЛТС.*

*The theory of construction of casting equipment which includes the modules of images of power disturbance is considered. Two classes of the systems are grounded on principles of thermal and mechanical transformation of the entered energy.*

**Ключевые слова:** литейно-технологические системы, энергосиловое воздействие, отливка, энергетический образ.

#### **Введение**

Качество и оперативность контроля протекающих изменений в формировании структуры отливки зависят от точности выбранных измерительных средств и достигнутого уровня обработки снимаемой информации. Можно отметить, что современное состояние мониторинга изменяющихся свойств металлов в процессе обработки вошло в фазу конструирования литейно-технологических систем (ЛТС) с подсистемами формирования образов - отображений энергосилового воздействия. Реально это стало возможным за счет кибернетического переоснащения литейного производства и развития новых методов внешнего воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл [1-3]. Тенденции современного развития литейных технологий связаны также с развитием новых методов управления отдельными процессами: формовки, литья, формирования НДС\* и т. д. [4-6], обеспечивающих экономию энергетических и материальных затрат в производстве литейной продукции. Внедрение компьютерных технологий в литейные процессы приблизилось к состоянию, когда применение методов классической теории управления, системного анализа, принятия решений, исследования операций и других оказывается менее эффективно и уже не составляет конкуренции развивающимся кибернетическим методам управления литейно-технологическими системами (ЛТС). Становятся также очевидными

---

\*НДС – напряженно-деформированное состояние отливки