

Ю. П. Скоробагатько, Н. А. Слажнев, А. Л. Березина*,
Т. А. Монастырская*, А. А. Давиденко**, В. З. Спусканюк**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев

**Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Донецк

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Si В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ: ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ

Рассмотрены особенности комплексной обработки жидких силуминов в магнитодинамической установке (МДУ) и ее влияние на структуру и свойства твердых сплавов и изделий из них. Эффективность такой обработки, обусловленная разрушением наномасштабных неоднородностей в объеме расплава благодаря многократно повторяющемуся магнито-гидродинамическому (МГД) и термосиловому воздействию на жидкий металл в МДУ, была дополнительно усилена путем повышения скорости охлаждения металла при кристаллизации и применения последующей интенсивной пластической деформации литых заготовок. В целом была устранена ликвация, достигнуто существенное измельчение структурных составляющих до- и заэвтектических силуминов, обеспечено увеличение относительного удлинения сплавов.

Ключевые слова: магнитодинамическая установка, доэвтектический и заэвтектический силумины, МГД и термосиловая обработка, интенсивная пластическая деформация, гидроксуживание.

Розглянуто особливості комплексної обробки рідких силумінів в магнітодинамічній установці (МДУ) та її вплив на структуру і властивості твердих сплавів та виробів з них. Ефективність такої обробки, обумовлена руйнуванням наномасштабних неоднорідностей в об'ємі розплаву завдяки магнітогидродинамічній (МГД) і термосилової дії, що багаторазово повторюється, на рідкий метал у МДУ, була додатково посилена шляхом підвищення швидкості охолодження металу при кристалізації і застосування подальшої інтенсивної пластичної деформації литих заготовок. В цілому була усунена ліквідація, досягнуто істотне подрібнення структурних складових до- і заевтектичних силумінів, забезпечено збільшення відносного видовження сплавів.

Ключові слова: магнітодинамічна установка, до- і заевтектичні силуміни, МГД і термосилова дія, інтенсивна пластична деформація, гідроекструзія.

There are considered the features of complex processing of liquid silumins in the magnetodynamic installation (MDI) and its influence on a structure and properties of solid alloys and wares from them. The efficiency of such processing conditioned by destruction of nano-scaled heterogeneities in the melt volume because of repeatedly oft-recurring magnetohydrodynamic (MHD) and thermal & forced influence on liquid metal in the MDI, was amplified additionally by increasing of cooling speed of metal during crystallization and application of the next severe plastic deformation of the castings. As whole result of this, liquation was eliminated, the substantial structure refinement of hypo- and hypereutectic silumins is obtained, and elongation of alloys was increased.

Keywords: magnetodynamic installation, hypo- and hypereutectic silumins, MHD and thermal forced, severe plastic deformation, hydraulic extrusion.

Разработка новых технологий, позволяющих обеспечить повышение качества алюминиевого литья, является актуальным и перспективным направлением дея-

Затвердевание сплавов

тельности ученых и производственников. Применение уникального литейного магнитодинамического оборудования, разработанного ФТИМС НАН Украины, которое обладает широким спектром функциональных возможностей по приготовлению и разливке металлов, может способствовать максимальной эффективности процесса обработки жидких алюминиевых сплавов [1].

Магнитодинамическую установку (МДУ) можно рассматривать как агрегат, состоящий из двух связанных систем – магнитогидродинамической (канал и рабочая зона (р. з.)) и гидродинамической (ванна) (рис. 1, а). В канале и р. з. жидкий металл подвергается воздействию следующих теплосиловых факторов: индукционного нагрева, электромагнитных сил и давления, скорости перемещения, электромагнитной вибрации, вихрей, пинч-эффекта с сопутствующим ему локальным перегревом и разрежением, а также ряда других электромагнитных и МГД-эффектов.

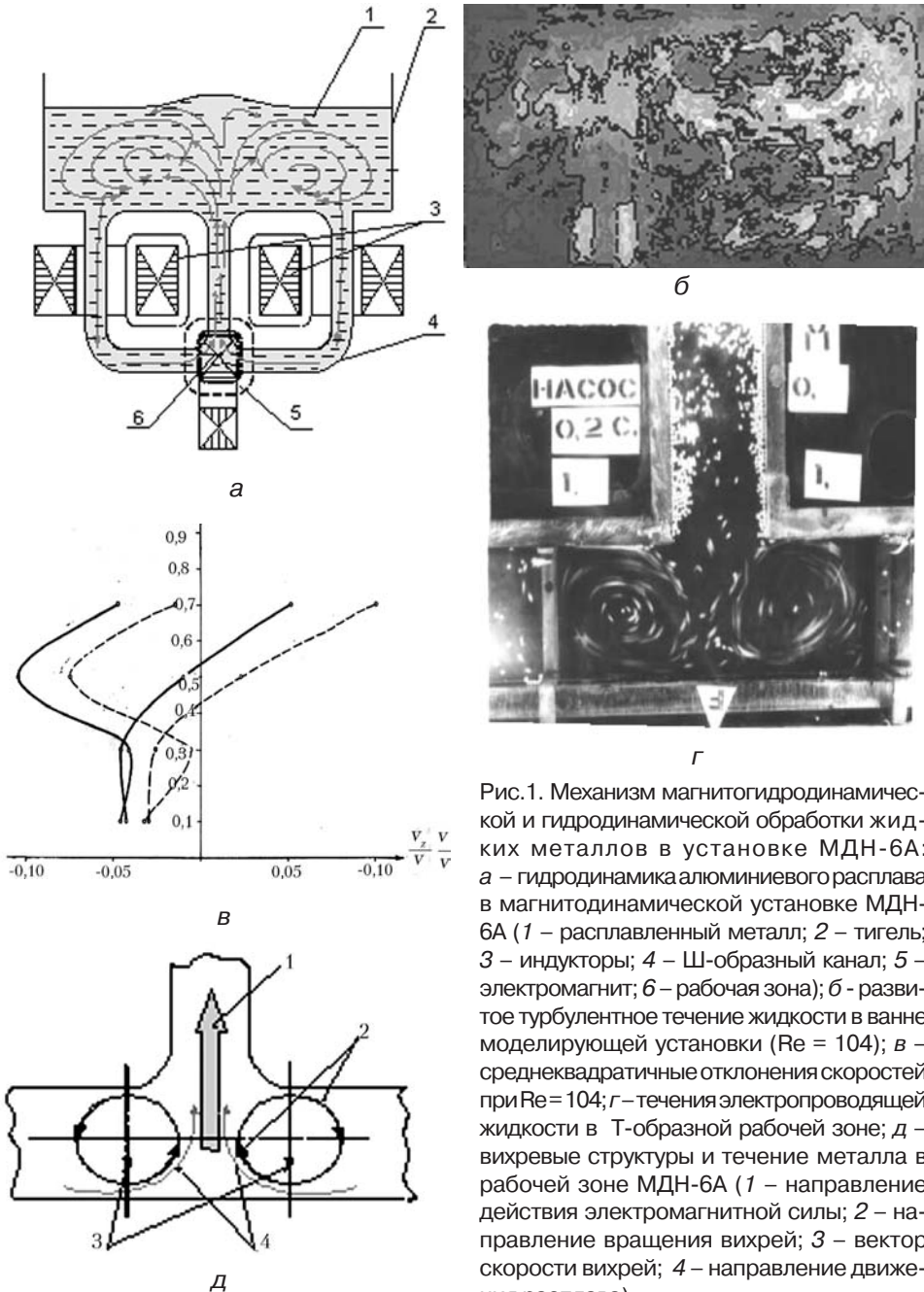


Рис.1. Механизм магнитогидродинамической и гидродинамической обработки жидких металлов в установке МДН-6А: а – гидродинамика алюминиевого расплава в магнитодинамической установке МДН-6А (1 – расплавленный металл; 2 – тигель; 3 – индукторы; 4 – Ш-образный канал; 5 – электромагнит; 6 – рабочая зона); б – развитое турбулентное течение жидкости в ванне моделирующей установки ($Re = 104$); в – среднеквадратичные отклонения скоростей при $Re = 104$; г – течения электропроводящей жидкости в Т-образной рабочей зоне; д – вихревые структуры и течение металла в рабочей зоне МДН-6А (1 – направление действия электромагнитной силы; 2 – направление вращения вихрей; 3 – вектор скорости вихрей; 4 – направление движения расплава)

В ванне МДУ преобладающее значение имеют чисто гидродинамические процессы. Основной из них связан с созданием в р. з. под действием электромагнитной силы затопленной струи жидкого металла, истекающей из канала в ванну. При этом максимальное развиваемое установкой давление (до $3 \cdot 10^5$ Па) и скорость затопленной струи, вызывающей перемешивание жидкометаллической ванны (до 5 м/с), достигаются в режиме «нагнетание» (рис. 1, а), когда жидкий металл под действием электромагнитной силы перемещается из рабочей зоны по центральному каналу в тигель МДУ. При этом, как показало физическое моделирование, она вызывает образование в жидкометаллической ванне мощных тороидальных вихрей (рис. 1, б), обуславливающих ($Re > 10^4$) турбулентный режим перемешивания, что подтверждается наличием пульсации скорости (рис. 1, в). Физическое моделирование МГД-процессов показало, что вблизи р. з. также образуются вихревые структуры (рис. 1, г, д), а скорость вихрей, возникающих в р. з. МДУ под действием МГД-эффектов, составляет порядка 1,5-1,7 м/с. При этом, по данным работы [2], уже при скорости 1,4 м/с в центре вихря возникает разрежение.

Время нахождения металла в р. з. невелико (0,1-1 с), однако указанные факторы благодаря многократному прохождению расплава через р. з. существенно влияют на происходящие в жидком металле физико-химические процессы и его качество.

Таким образом, в каждой из двух вышеуказанных зон в МДУ металлический расплав последовательно и многократно подвергается силовым воздействиям, которые в соответствии с теорией жидкого состояния металлических расплавов [1, 3] должны приводить к диспергированию имеющихся в них областей микронеоднородностей и соответственно к измельчению структурных составляющих сплавов.

Проведенные оценки показали, что МГД-установки позволяют реализовать такие режимы турбулентного движения алюминиевого расплава, которые достаточны для разрушения областей микронеоднородностей за счет возникновения напряжений в объеме жидкости. Факт разрушения микронеоднородностей и измельчения структурных составляющих сплава ранее был подтвержден рентгенографическими исследованиями – так, в сравнении со сплавом, отобранным для исследований из плавильной электропечи сопротивления, обработка (выдержка и перемешивание в МДУ) сплавов с содержанием кремния 10-13 % позволила уменьшить радиус микрообластей с 19 до 16 нм [4].

Поскольку при турбулентном течении расплава перемещение находящихся в нем микронеоднородностей происходит, прежде всего, под действием крупных по размерам вихрей, которые, в свою очередь, порождают малые вихри, передавая им свою кинетическую энергию, была предложена следующая гипотеза о разрушении микронеоднородностей [5]. Сообщенная малым вихрям кинетическая энергия расходуется на преодоление сил внутреннего трения, и динамические силы, обусловленные градиентом скорости расплава, могут вызвать разрыв микронеоднородностей, а условием для этого является достижение критического значения критерия Вебера (We), которое должно превышать 10. Однако современные представления о разрушении струй жидкости и включений другой фазы подтверждают [5], что их диспергирование происходит уже при $We \geq 1$, а в диапазоне $1 \leq We \leq 20$ изменяется только характер разрушения обрабатываемого объекта. Более того, по данным ряда авторов, приведенным в [5], реальный размер разрушаемой микронеоднородности в условиях турбулентного течения жидкости оказывается даже несколько меньше (~95 %), чем рассчитываемый теоретически [5]

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot r}{\sigma} \geq 1, \quad (1)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м³; v – скорость движения расплава, м/с; r – радиус

Затвердевание сплавов

микронеоднородности, m ; σ – избыточная свободная энергия переходного слоя «микронеоднородность-матричный расплав», Дж/м² [5].

Отсюда можно определить минимальный радиус микронеоднородностей, которые могут быть разрушены за счет турбулентного перемешивания расплава

$$r_{\min} \geq \frac{\sigma}{\rho \cdot v^2} \quad (2)$$

Исходя из основных физических свойств алюминиевых расплавов при температурах 650-850 °С (плотность $\rho = (2400-2500)$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu \approx (1,4-1,5) \cdot 10^{-7}$ м²/с, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = (850-915) \times 10^{-6}$ Дж/м² [5]) и с учетом параметров МГД и термосиловой обработки алюминиевого расплава в р. з. и ванне МДУ (плотность электрического тока – до $20 \cdot 10^6$ А/м², индукция внешнего магнитного поля – до $0,3 T_n$, объемная электромагнитная сила – $(20-40) \cdot 10^5$ Н/м³, электромагнитное давление – $(2,5-3,0) \cdot 10^5$ Па, скорость движения расплава в струях до 5 м/с, а в вихрях – до 1,7 м/с, электродинамическая вибрация расплава – 100 Гц [2]), по формуле (2) была выполнена оценка параметров разрушения микронеоднородностей в алюминиевом расплаве в МДУ. Установлено, что критический размер микронеоднородностей, которые могут быть разрушены за счет МГД и гидродинамических эффектов, составляет 13-15 нм.

Специалистами Физико-технологического института металлов и сплавов, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова и Донецкого физико-технологического института им. А. А. Галкина НАН Украины были проведены совместные исследования по применению МГД и термосиловой обработки расплавов в МДУ и интенсивной пластической деформации литого металла (гидроэкструзия (ГЭ) + кручение под высоким давлением (КВД)) для улучшения качества Al-Si сплавов.

Опытные литые образцы доэвтектического сплава марки 356 и заэвтектического сплава марки 390 после отбора из МДУ подвергались термовременной обработке по режиму Т6 и интенсивной пластической деформации (ИПД) [6], причем на каждом этапе исследований изучались их структура и свойства.

Было установлено, что такая комплексная обработка обеспечивает изменение структуры и свойств силуминов. Так, для Al-Si сплава марки 356 после плавления в печи сопротивления размеры стержнеобразных частиц кремния составили 135/3 мкм, после перемешивания расплава в течение 1 ч в МГД-установке – 10/1 мкм, а после применения ИПД с (ГЭ + КВД) их размеры уменьшились до 6/1 мкм (рис. 2, а-в). В результате уменьшения размеров структурных составляющих доэвтектического алюминиевого сплава после перемешивания расплава в МДУ и старения на максимальную прочность его относительное удлинение повысилось в 2,0-3,5 раза.

Аналогичные исследования были проведены и на заэвтектическом силумине марки 390. Так, после плавления в печи сопротивления размеры частиц первичного кремния в данном сплаве достигали 70 мкм, после перемешивания в МГД-установке в течение 1 ч произошло измельчение частиц кремния до 19 мкм (рис. 2, г, д). Поскольку в исходном состоянии сплав марки 390 имеет низкую пластичность, то ИПД при комнатной температуре можно осуществить только с помощью кручения под высоким давлением (КВД). После КВД размеры первичных частиц кремния в данном сплаве измельчаются до 6 мкм (рис. 2, е).

Применение ИПД позволило увеличить твердость доэвтектического сплава с 442 (после плавления в печи сопротивления) до 776 МПа (ГЭ+КВД), а заэвтектического – с 1028 до 1448 МПа (КВД).

Для оценки влияния температурного фактора при тех же гидродинамических режимах и создания температурного градиента не за счет высокого перегрева

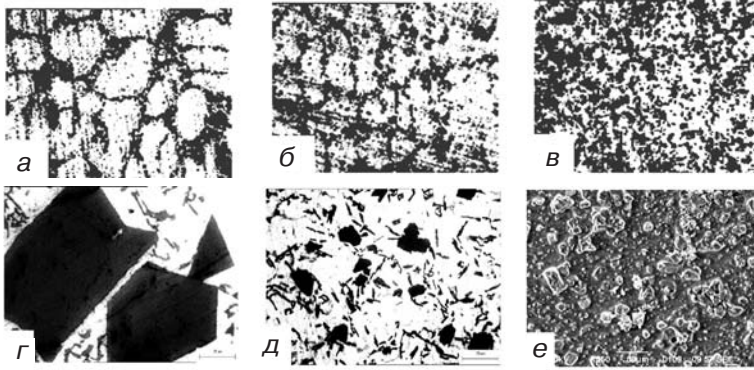


Рис. 2. Микроструктура исследуемых алюминиевых сплавов: доэвтектический сплав марки 356 (а – исходный металл, б – перемешивание расплава в течение 1 ч в МГД-установке, в – ИПД при $\varepsilon_{\Sigma} = 2,3$); заэвтектический сплав марки 390 (г – исходный металл, д – после перемешивания расплава в МГД-установке в течение 1 ч, е – после ИПД кручение при эквивалентной деформации $\varepsilon \sim 2,66$)

силумина, а путем создания повышенных скоростей охлаждения при кристаллизации, разливка металла проводилась по водоохлаждаемому желобу. При этом было показано, что такой метод позволяет осуществлять быстрое охлаждение жидкого силумина марки 356 (от 30 до 100 °С) относительно исходной температуры в динамическом состоянии без образования затвердевших конгломератов алюминиевого сплава на теплоотводящей поверхности. Эффективный параметр используемого в экспериментах водоохлаждаемого желоба варьировался от 10 до 100 °С · кг/м (где м – длина желоба). Наиболее эффективные воздействия локального переохлаждения движущегося металла отмечены при температуре, близкой к температуре ликвидуса, и в интервале кристаллизации

$$\Delta = \frac{(T_{\text{исх}} - T_{\text{конечная}}) \cdot Q \cdot t}{L}, \quad (3)$$

где $T_{\text{исх}} - T_{\text{конечная}}$ – разница между температурой металла на входе и на выходе их водоохлаждаемого желоба, °С; Q – расход жидкого металла, кг/с; L – длина желоба, м; t – время контакта удельного объема металла с водоохлаждаемым желобом, с.

Анализ микроструктуры доэвтектического силумина марки 356 показал, что для образца сплава, залитого через водоохлаждаемый желоб, наблюдалась более дисперсная структура, чем в образце, отобранном из МДУ (рис. 3).

Таким образом установлено, что комплексная МГД и термосиловая обработка жидких алюминиевых сплавов в МДУ способствуют разрушению наномасштабных неоднородностей в расплаве, улучшению структуры и повышению механических свойств сплавов и изделий из них в литом состоянии. Дополнительное измельчение

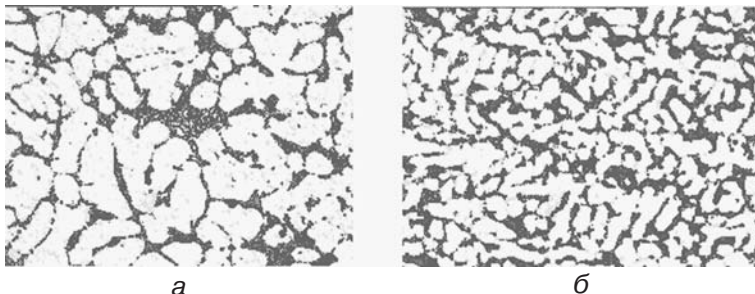


Рис. 3. Микроструктура силумина марки 356: а – заливка в кокиль из МГД-установки; б – заливка в кокиль через водоохлаждаемый желоб, $\times 200$

Затвердевание сплавов

структуры и рост свойств могут быть обеспечены при последующей термообработке твердых сплавов и их интенсивной пластической деформации.

Выводы

- Подтверждена эффективность комплексной обработки расплавленных до- и заэвтектических силуминов, заключающейся в многократном последовательном магнитогидродинамическом в канале и гидродинамическом силовом воздействии, на алюминиевый сплав в ванне магнитодинамической установки при температурах металла ниже температур его гомогенизации. Показано, что при этом достигается измельчение структурных составляющих сплавов. Последующая термообработка литых заготовок этих сплавов позволяет дополнительно диспергировать структурные составляющие Al-Si сплавов и обеспечить суммарное увеличение относительного удлинения сплавов марок 356 и 390 в 2,0-3,5 раза.

- Показано, что интенсивная пластическая деформация (гидроэкструзия и кручение при высоком давлении) обеспечивает существенное дополнительное измельчение структурных составляющих силуминов, а в заэвтектическом сплаве способствует многократному измельчению первичных выделений кремния (с 70 до 6 мкм) и существенному увеличению твердости.

- Установлено, что применение повышенных скоростей охлаждения при кристаллизации доэвтектических силуминов за счет применения водоохлаждаемого желоба при разливке обработанного в МДУ сплава позволяет существенно измельчить зерно и эвтектические составляющие сплава.



Список литературы

1. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
2. Полищук В. П. Исследование процессов обработки и заливки сплавов магнитодинамическими насосами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1979. – 40 с.
3. Попель П. С. Метастабильное микрорасслоение жидких сплавов и его влияние на структуру отливки // Литейн. пр-во. – 1992. – № 7. – С. 3-6.
4. Полищук В. П., Мельник Б. А. Рентгенографическое исследование структуры жидких сплавов Al-Si, выплавленных в магнитодинамической печи // Там же. – 1989. – № 7. – С. 6-7.
5. Эмульсии / Под ред. Ф. Шермана. – Л.: Химия, 1972. – 448 с.
6. Влияние обработки расплава в МГД-установке и интенсивной пластической деформации на структуру и свойства силуминов / А. Л. Березина, Т. А. Монастырская, В. И. Давиденко и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – Т. 31, № 10. – С. 1417-1426.

Поступила 10.09.2010