

*ФТІМС НАН України провів традиційний конкурс молодих учених України в галузі металургії, ливарного виробництва, металознавства та термічної обробки металів.*

*Редакція журналу друкує матеріали досліджень переможців конкурсу за номінацією "Ливарне виробництво" лауреатів премії імені А. А. Горшкова за 2011 р.*

УДК 621.7.044.7:669.715

## *Фізичне модифікування заевтектичних алюмінієвих сплавів з використанням електромагнітної дії*

Ю.П. Скоробагатько\*, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ



*Досліджено вплив електромагнітної дії на структуру та властивості заевтектичного алюмінієвого сплаву марки А390. Встановлено, що така обробка сприяє подрібненню структури, зокрема, первинних кристалів кремнію, та підвищенню механічних властивостей.*

Сплави системи Al – Si завдяки поєднанню високих ливарних, механічних і спеціальних властивостей широко використовуються в різних галузях промисловості. Однак розвиток високотехнологічної техніки обумовлює необхідність постійного підвищення рівня їх властивостей. З цією метою удосконалюються процеси обробки сплавів і кристалізації виливків. Ведеться активний пошук нових технологій, у тому числі таких, що ґрунтуються на використанні різних методів зовнішнього впливу на рідкий метал. При цьому до найперспективніших з них відносяться ті, в яких застосовуються фізичні способи обробки металевих розплавів.

В ідеалі, систему, що забезпечує фізичну дію на рідкий метал намагаються сконструювати так, щоб, по-перше, мінімізувати витрати енергії в електротехнологічній

\*Перша премія ім. А. А. Горшкова.

Науковий керівник роботи д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України Дубодєлов В.І.

установці (ЕТУ) (рис. 1, 2), по-друге, збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі енергії в розплав і, по-третє, максимально зменшити втрати енергії в самому розплаві [1]. На практиці, через велику різноманітність вжитих для обробки видів енергії, конструкція конкретних пристроїв і перерозподіл енергії в них можуть сильно відрізнятися. Так, конструктивно легше всього ввести в розплав механічну енергію (обертання, вібрація). Проте найбільш концентроване і потужне виділення енергії в об'ємі рідкого металу досягається при створенні в ньому акустичних ударних хвиль, аж до кавітації (ультразвукова і електрогідроімпульсна обробка). В той же час, максимальна повнота передачі енергії в розплав має місце при використанні електричних і електромагнітних полів.

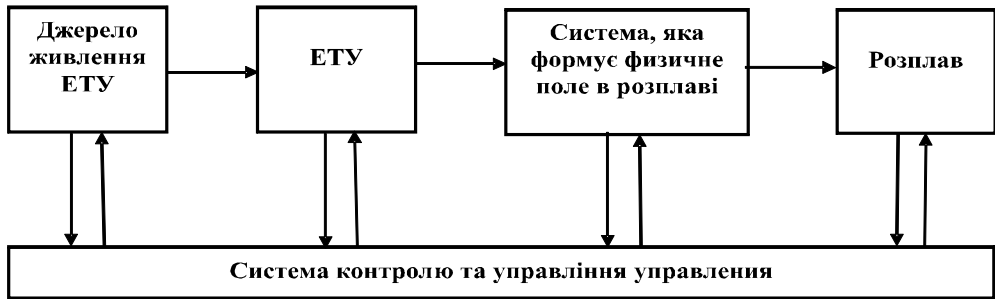


Рис. 1. Загальна схема обробки розплаву фізичними полями [1].

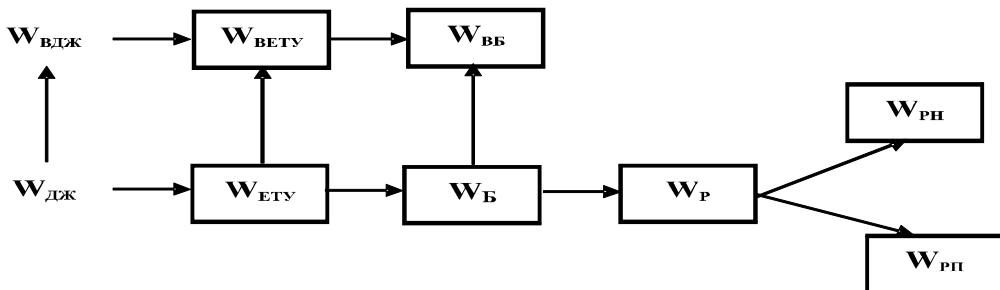


Рис. 2. Перерозподіл енергії при обробці розплаву фізичними полями по схемі 1 [1]:  $W_{дж}$  – енергія, яка споживається джерелом живлення ЕТУ;  $W_{вдж}$  – втрати енергії в джерелі живлення ЕТУ;  $W_{ЕТУ}$  – енергія, яку споживає власне ЕТУ;  $W_{БЕТУ}$  – втрати енергії в ЕТУ;  $W_{Б}$  – енергія, яку споживає система безпосереднього впливаючи на розплав;  $W_{ББ}$  – втрати енергії в системі впливу на розплав;  $W_{П}$  – енергія, яка споживається розплавом;  $W_{РП}$  – продуктивно витратна енергія в розплаві;  $W_{РН}$  – непродуктивно витратна енергія в розплаві.

Найперспективніший напрямок – поєднання теплосилових чинників і проведення обробки в одному агрегаті. Це дає змогу спростити процес приготування сплаву і, за рахунок комплексності дії, зменшити абсолютну величину діючих чинників – наприклад, поєднання термочасової обробки (ТЧО) із інтенсивним перемішуванням розплаву приводить до руйнування мікронеоднорідностей при температурах, нижчих за температуру гомогенізації металевого розплаву, яку необхідно забезпечити при ТЧО за умови відсутності перемішування металу. Таке поєднання діючих чинників дозволяє подрібнити структуру литих виробів і підвищити їх механічні властивості. Однак для реалізації такої фізичної обробки необхідно використовувати спеціалізоване устаткування, що забезпечує можливість активного широкодіапазонного управління тепловим і гідродинамічним станом початкового рідкого сплаву.

В якості такого обладнання запропонована магнітодинамічна установка МДН-6А, яка розроблена у ФТІМС НАН України. Особливістю такого устаткування є об'єднання в одному агрегаті двох взаємопов'язаних між собою конструктивних і функціональних вузлів магнітодинамічної одиниці (МДО) і тигля (рис. 3 а) [2]. При цьому в рідкому металі в Ш-подібному каналі 4 МДО при включенні індукторів 3 генерується змінний електричний струм (щільність до  $20 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ); в робочій зоні 6 за допомогою електромагніту 5 створюються змінне магнітне поле (до 0,3 Тл) і об'ємна електромагнітна сила (до  $60 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$ ), що переміщує металевий розплаву у вигляді затопленого струменя по каналу в тигель 2 із рідким металом. За відсутності транзитної течії рідкого металу в робочій зоні створюється електромагнітний тиск.

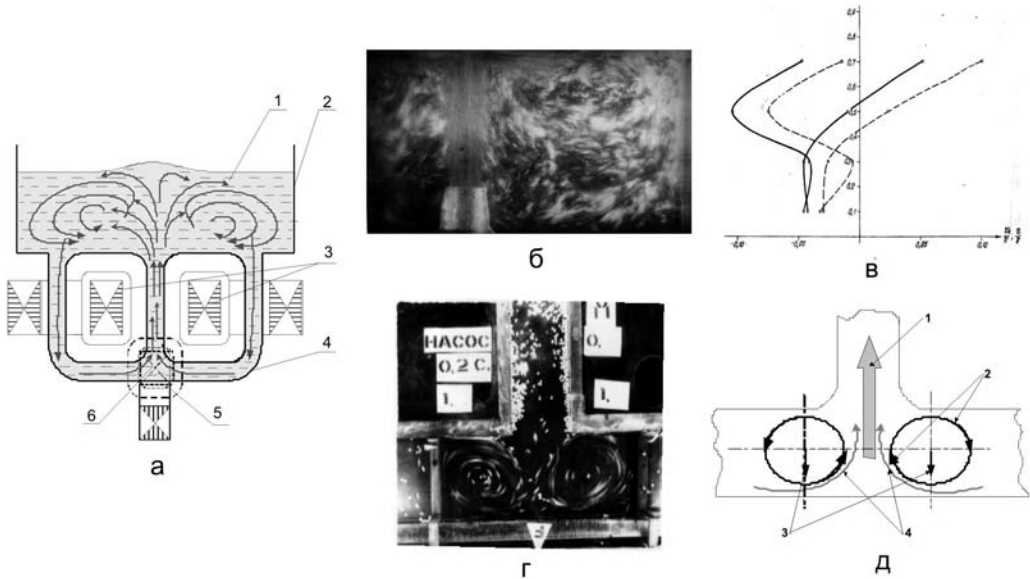


Рис. 3. Механізм магнітодинамічної та гідродинамічної обробки рідких металів в магнітодинамічній установці МДН-6А. а – принципова схема течії алюмінієвого розплаву в магнітодинамічній установці МДН-6А: 1 – розплавлений метал, 2 – тигель, 3 – індуктори, 4 – Ш-подібний канал, 5 – електромагніт, 6 – робоча зона; б – розвинутий турбулентний рух рідини у ванні моделюючої установки ( $Re = 10^4$ ); в – середньоквадратичні відхилення швидкостей при  $Re = 10^4$ ; г – перебіг електропровідної рідини в Т-подібній робочій зоні; д – вихорові структури і перебіг металу в робочій зоні МДН-6А: 1 – напрям дії електромагнітної сили, 2 – напрям обертання вихорів, 3 – вектор швидкості вихорів, 4 – напрям руху розплаву.

Відомо, що в каналах і їх устях при роботі МДУ спостерігається вихоровий рух металевого розплаву, обумовлений МГД ефектами. Вихори, що виникають в робочій зоні під дією МГД ефектів, мають швидкості  $\sim 1,7 - 2,5 \text{ м/с}$  (рис. 3 г, д).

Час перебування металу в робочій зоні незначний (0,1 – 1,0 с), проте завдяки багаторазовому проходженню розплаву через неї, вказані чинники істотно впливають на фізико-хімічні процеси, які відбуваються в рідкому металі, а також на його структуру та властивості. Рух розплаву у ванні МДУ (рис. 3 а, б) обумовлюється переважно дією чисто гідродинамічних ефектів. Основний з них пов'язаний із створенням в робочій зоні під дією електромагнітної сили затопленого струменя рідкого металу, що витікає з каналу до ванни.

При цьому максимальний тиск, що розвивається установкою (до  $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), і швидкість затопленого струменя, що викликає перемішування рідкометалевої ванни (до 5 м/с), досягаються в режимі «нагнітання», коли рідкий метал під дією електромагнітної сили переміщується з робочої зони по центральному каналу в тигель

МДУ. При цьому затоплений струмінь викликає утворення в рідкометалевій ванні потужних тороподібних вихорів (рис. 3 б). Основні гідравлічні параметри цього режиму (лінійна швидкість потоків, швидкість вихорів і, відповідно, значення критерію Рейнольдса –  $Re > 10^4$ ) повністю відповідають умовам турбулізації рідкометалевої ванни. Це підтверджується результатами фізичного моделювання структури потоків (рис. 3 д) і наявністю турбулентних пульсацій швидкості в розплаві, що переміщується (рис. 3 в).

Таким чином, в кожній з двох вищезгаданих зон металевий розплав поряд з індукційним нагрівом послідовно і багато разів за час перебування в МДУ піддається силовим діям, які відповідно до теорії рідкого стану металевих розплавів, повинні приводити до диспергування в них областей мікронеоднорідностей і як наслідок – до подрібнення структурних складових сплавів [3].

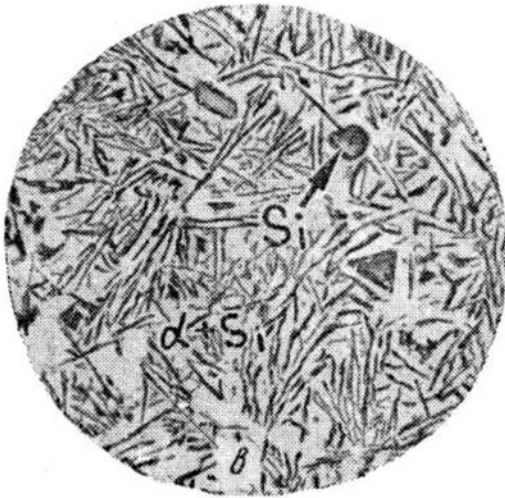


Рис. 4. Мікроструктура заевтектичного силуміна немодифікованого.  $\times 100$ .

В останні роки заевтектичні силуміни, яким притаманний ряд унікальних властивостей (низький коефіцієнт лінійного розширення, достатньо високий модуль пружності, підвищена зносостійкість), викликають великий інтерес у розробників та потенційних споживачів. Зокрема, заевтектичні силуміни використовують для деталей двигунів внутрішнього згоряння автомобілів, які виготовляють за допомогою ливарних технологій або штамповки. Найбільшою проблемою таких сплавів є виділення кристалів первинного кремнію при кристалізації у вигляді поліедричних кристалів та голчастих частинок кремнію в евтектиці (рис. 4) [4, 5]. Ці частинки є концентраторами напружень, тому пластичність таких матеріалів перебуває на низькому рівні, особливо відносно видовження, яке є меншим за 1 %.

Механічні властивості заевтектичних алюмінієвих сплавів можна підвищити завдяки зміні їх структури: шляхом модифікування розплаву різними реагентами або застосуванням інших способів фізичного впливу на сплав. При такій обробці відбувається зсув евтектичної точки в сторону кремнію на 1,5 – 2,0 %, а сам кремній кристалізується у вигляді дрібних частинок кулястої форми [6].

В даній роботі в якості експериментального був використаний заевтектичний алюмінієвий сплав А390 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад заевтектичного алюмінієвого сплаву А390( %, мас. частка)

Сплав	Al	Si	Cu	Mg	Ti	Fe
А 390	основа	16,5	3,77	0,46	0,7	0,316

Після розплавлення в печі електроопору, рідкий сплав переливали до МДУ, де проводили його МГД обробку при температурі 650 – 800 °С і масовій швидкості

руху розплаву в каналі 0,3 – 3,0 кг/с. Через фіксовані проміжки часу (вихідний сплав – після виплавки) – кожні 15 хв протягом 5 год, далі через кожні 3 год протягом доби – здійснювали відбір проб шляхом заливання алюмінієвого розплаву до коків і одержували литі зразки. Температура заливання сплаву становила 750 °С, а температура кокілю – 230 °С. Алюмінієвий сплав А390 в одному з варіантів обробки додатково модифікували фосфористою міддю (93 % Cu, 7 % P).

Мікроструктура даного сплаву наведена на рис. 5 а, б. Основні характеристики структури наведені в табл. 2 ( $k$  – фактор форми,  $N_v$  – щільність розподілу частинок кремнію). Після виплавки в печі електроопору – сплав двофазний і складається з  $\alpha$ -твердого розчину і частинок кремнію. Частинки кремнію присутні в двох модифікаціях: у вигляді компактних великих кристалів первинного кремнію і стрижнеподібних частинок евтектичного кремнію (рис. 5 а). МГД обробка розплаву в МДУ ефективно подрібнює ці частинки. Суттєве диспергування первинних і евтектичних частинок кремнію спостерігається після МГД обробки розплаву в МДУ протягом 1 години (рис. 5 б, табл. 2). Додаткове модифікування сплаву фосфористою міддю сприяло подрібненню евтектичного і первинного кремнію (табл. 2).

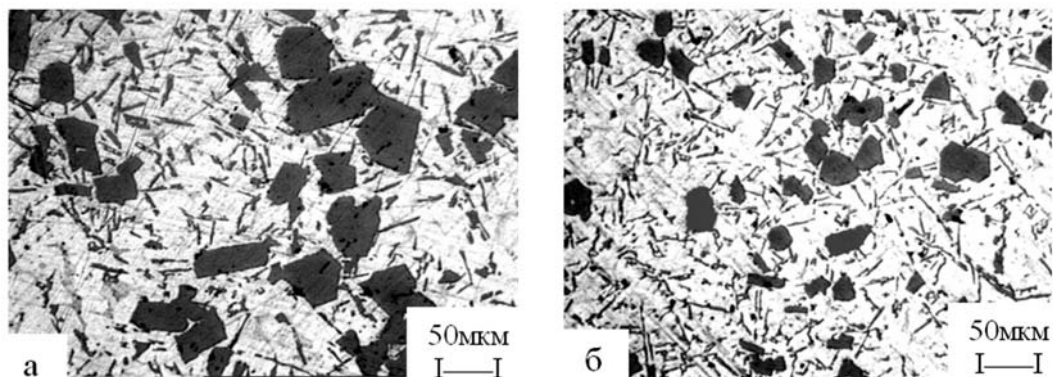


Рис. 5. Вплив МГД обробки розплаву заевтектичного силуміну в МДУ на структуру сплаву. а – вихідний стан, б – МГД обробка розплаву в МДУ протягом 1 год.

Таблиця 2

Вплив МГД обробки в МДУ заевтектичного сплаву А390

Обробка	Первинний кремній		Евтектичний кремній		
	d, мкм	$N_v$ , см <sup>-3</sup>	$d_{max}$ , мкм	k	$N_v$ , см <sup>-3</sup>
Плавлення в печі опору	70	$3 \cdot 10^5$	17	5	$4,5 \cdot 10^8$
МГД обробка в МДУ протягом 1 год	19	$5 \cdot 10^6$	14	7	$3 \cdot 10^8$
МГД обробка в МДУ протягом 1 год + модифікування фосфористою міддю	11	$7 \cdot 10^8$	7	3,5	$2 \cdot 10^9$

Внаслідок зменшення зерна після МГД обробки розплавленого силуміну марки А390 в МДУ підвищилася пластичність сплаву, зокрема, показники відносного видовження (табл. 3), а також збільшилась твердість з 1028 МПа до 1448 МПа.

Таблиця 3

Механічні властивості зразків алюмінієвого сплаву А390 після МГД обробки в МДУ, наступної заливки в кокіль і термообробки (Т6)

№ зразка	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	Вимоги за міжнародними стандартами (після Т6)		
				$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
Після плавлення в печі електроопору		280	0,78	310	310	<1
МГД обробка в МДУ протягом 1 год	336	320	1,12			
МГД обробка в МДУ протягом 5 год	317	280	0,95			
МГД обробка в МДУ протягом 1 год, модифікування фосфористою міддю	353	317	1,55			

Таким чином, експериментально показано, що індукційний нагрів алюмінієвого розплаву в магнітодинамічній установці (МДУ) до температур, менших температур переходу рідкометалевої системи з нерівноважного в рівноважний стан, та багаторазової МГД силової дії на рідкий метал у каналах, робочій зоні і ванні МДУ в процесі його циркуляції та турбулентного вихорового перемішування ( $Re \geq 10^4$ ), зумовлює стабілізацію рідкометалевої системи, сприяє суттєвому подрібненню структурних складових алюмінієвих сплавів.

Встановлено, що використання такої фізичної обробки заевтектичних рідких алюмінієвих сплавів (системи Al – Si) в магнітодинамічній установці, сприяє формуванню дисперсної та однорідної структури, зокрема зменшенню з 70 мкм до 19 мкм первинних кристалів кремнію, в порівнянні з традиційними технологіями їх обробки модифікаторами, в результаті цього відносно видовження сплаву А390 зростає в 2 – 3 рази, а твердість – від 1028 МПа до 1448 МПа.

Показано, що впродовж кількох годин зберігається ефект фізичного модифікування заевтектичних Al – Si сплавів.

## Література

1. В.И. Якимов, Б.Н. Марьин, В.В. Зелинский и др. Воздействие электрического тока на жидкий алюминиевый сплав // *Металлургия машиностроения*. – 2003. – № 3. – С. 36 – 39.
2. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. - Киев: Наукова думка, 1989. - 256 с.
3. В.И. Дубоделов. Применение электромагнитных воздействий на металлические расплавы при получении сплавов и формировании заготовок и изделий. // *Прогресивні матеріали і технології*. – К.: Академперіодика, 2003. – Т. 1. – С. 195 – 235.
4. Бочвар А.А. *Металловедение*. – М.: Машиностроение, 1956. – 495 с.
5. Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. – М.: *Металлургия*, 1979. – 640 с.
6. Боом Е.А. *Природа модифицирования сплавов типа силумин*. – М.: *Металлургия*, 1972. – 69 с.

Одержано 19.05.11

Ю. П. Скоробагатько

**Физическое модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с использованием электромагнитного воздействия**

**Резюме**

Исследовано влияние электромагнитного воздействия на структуру и свойства заэвтектического алюминиевого сплава марки А390. Установлено, что данная обработка способствует измельчению структуры, в частности первичных кристаллов кремния, и повышению механических свойств.

Iu. P. Skorobatko

**Physical modification of hypereutectic aluminium alloys with using of electromagnetic action**

**Summary**

The influence of electromagnetic action on the structure and properties of hypereutectic aluminium alloy А390 is investigated. It is established, that such processing allows to refine the structure, in particular grains of primary silicon, and to rise the mechanical properties.

УДК 669.162.275:539.52

*Технологічні аспекти підвищення пластичності високоміцного чавуну*

Д. М. Берчук\*, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ



*Вивчено вплив швидкості охолодження на структуру і механічні властивості високоміцного чавуну при внутрішньоформовому та ковшовому модифікуванні лігатурою ФСМг-7. Показано, що в порівнянні з ковшовим, внутрішньоформове модифікування більш, ніж у три рази збільшує кількість включень кулястого графіту, і більш ніж у два рази кількість фериту, в результаті чого міцність при розтягуванні знижується на 15 – 20 %, а відносне подовження збільшується в 1,5 – 2,0 рази. Це дозволяє одержувати вилівки з феритного високоміцного чавуну без проведення енергоємної термічної обробки – графітузуючого відпалу.*

**В**исокоміцний чавун, завдяки оптимальному поєднанню ливарних, фізико-механічних та службових властивостей, а також економічності його виробництва, широко застосовується в конструкціях сучасних машин і обладнання. Цей унікальний

\*Друга премія ім. А. А. Горшкова.

Науковий керівник роботи д.т.н. В. Б. Бубліков.