



## Список литературы

1. Сплавы редкоземельных металлов / Е. М. Савицкий, В. Ф. Терехова, И. В. Буров и др. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 267 с.
2. Ключарев В. Е., Скок Ю. Я. Перспективные материалы и технологические процессы в энергостроении: Реферативный сборник. – М.: НИИИнформэнергомаш, 1981. – С. 3-8.
3. Критерии для равномерного распределения сульфидов РЗЭ при кристаллизации больших слитков высокопрочной листовой стал / А. Еджима, Т. Эмми, К. Сузуки и др. //Процессы раскисления и образования неметаллических включений в стали. – М.: Наука, 1977. – С. 108-127.

Поступила 24.10.2012

УДК 669.017.16: 537.528

**В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, Н. А. Федченко,  
Kyung-Hyun Kim\***

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

\*Корейский институт материаловедения, Чангвон

## **СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ФОСФОРА И ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА А390**

*Исследованы включения первичного кремния и механические свойства заэвтектического силумина А390 после модифицирования фосфором в количестве 0,03-0,07 %, а также после дополнительной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава. За счет такого комплексирования предел прочности сплава увеличивается до 209 МПа, а относительное удлинение – до 1,2 %. Методом «стоп-закалки» в температурном интервале 800-574 °С показано, что механизмы ограничения роста структурных составляющих сплава закладываются ЭГИО на стадии жидкого состояния.*

**Ключевые слова:** заэвтектический силумин, первичный кремний, модифицирование, электрогидроимпульсная обработка, метод «стоп-закалка».

*Досліджено включення первинного кремнію та механічні властивості заэвтектичного силуміну А390 після модифікування фосфором в кількості 0,03-0,07 %, а також після додаткової електрогідроімпульсної обробки (ЕГІО) розплаву. Шляхом такого комплексування между міцності*

## **Кристаллизация и структурообразование сплавов**

сплаву збільшено до 209 МПа, а відносно подовження – до 1,2 %. Методом «стоп-гартування» в температурному інтервалі 800-574 °С показано, що механізми обмеження росту структурних складових сплаву закладаються ЕГІО на стадії рідкого стану.

**Ключові слова:** заэвтектичний силумін, первинний кремній, модифікування; електрогідроімпульсна обробка, метод «стоп-гартування».

*Inclusions of primary silicon and mechanical characteristics of hypereutectic silumin A390 modified by phosphorus in amount 0,03-0,07 %, as well as after additional electrical hydro pulse treatment (EHPT) of melt were investigated. With such combination the ultimate strength of the alloy is increased up to 209 MPa, but elongation up to 1,2 %. The method «stop-quenching» in temperature interval 800-574 °C shows that mechanisms of the restriction of the growing structure component in alloy are pawned with EHPT during liquid stage.*

**Keywords:** hypereutectic silumin; primary silicon; modifying; electrical hydro pulse treatment; the method «stop-quenching».

### **Введение**

Как известно, кремний в немодифицированных заэвтектических силуминах выделяется в виде крупных, унаследованных от шихты, первичных кристаллов различной морфологии и грубых игольчатых частиц в эвтектике. Эти частицы являются концентраторами напряжений, поэтому механические свойства заэвтектических силуминов не столь сильно зависят от химического состава, как от формы, количества и размера частиц кремния в структуре.

До сих пор основным модификатором для заэвтектических силуминов считают фосфор. Одни исследователи [1] склонны объяснять его модифицирующее действие на кристаллы первичного кремния образованием в расплаве алюминия тугоплавких частиц фосфида алюминия AlP со сходными с кремнием параметрами кубической кристаллической решетки – 5,42 Å для Si; 5,45 Å – для AlP. Другие считают, что причиной измельчения кристаллов первичного кремния после обработки расплава фосфором является комплексное влияние зародышеобразующих частиц AlP и сдерживающих рост кристалла, осажденных на его гранях атомов фосфора [2]. Единого мнения нет и по вопросу технологических параметров модифицирования. Так, рекомендуемая температура модифицирования фосфористой медью составляет 780-920 °С, рекомендуемое время выдержки колеблется в пределах от 15 мин до 2 ч, рекомендуемое для введения в расплав количество фосфора составляет 0,004-0,4 % [3]. Причины существующих разногласий очевидны, так как эффективность модифицирования обеспечивается комплексом факторов, среди которых используемый метод литья, скорость охлаждения, исходное состояние лигатуры, число переплавов и т. д.

Повысить эффективность модифицирования можно за счет интенсификации растворения модификатора, улучшения абсорбционных свойств, ускорения химических реакций и других процессов, дополнительно обрабатывая расплав физическими полями. Например, электрогидроимпульсной обработкой, при которой в расплаве концентрируется и высвобождается большой поток энергии, расплав перемешивается, разрушаются унаследованные от шихты структурные признаки, ускоряются массообменные и диффузионные процессы, необходимые для эффективного модифицирования и доведения механических свойств заэвтектических силуминов до уровня, продиктованного современным производством.

Цель данной работы – исследовать закономерности совместного влияния фосфорсодержащего модификатора и ЭГИО на сплав А390, который является одним из наиболее распространенных за рубежом поршневых силуминов.

*Особенности плавки и обработки расплава.* Слитки чушкового сплава А390, % (19,0 Si; 0,1 Mg; 0,18 Mn; 5,0 Cu; 0,3 Zn; 0,35 Ni; 0,8 Fe) массой 1,2 кг помещали в графитовые контейнеры и расплавляли при температуре 825 °С. Контейнеры по очереди извлекали из печи, в каждый из них при 800 °С с помощью колокольчика вводили гранулы лигатуры Al-2,5Cu-3P диаметром 5-7 мм из такого расчета, чтобы в расплав попадало 0,03-0,07 % (мас.) фосфора. После того как дымовыделение прекращалось, расплав в течение 1 мин перемешивали механически и в течение 1 мин подвергали ЭГИО с частотой 2 Гц и энергией единичного импульса 1,25 кДж, затем при температуре 730 °С разливали в металлические формы. Соответственно, те контейнеры, в которых расплав ЭГИО не подвергался, остывали до температуры разлива естественным образом. Использовали холодные (комнатной температуры) кокили, предназначенные для получения цилиндрических образцов диаметром 20 мм и длиной 200 мм, на поперечных срезах которых исследовали структуру сплава.

*Результаты металлургических исследований.* Тенденции изменения структуры сплава, начиная от шихтовой заготовки и заканчивая образцами, полученными после совместной обработки «модифицирование + ЭГИО», можно проследить на рис. 1. В чушковом сплаве первичный кремний сосредотачивается преимущественно в верхней части чушки в виде крупных включений размером 300-500 мкм, видимых невооруженным глазом. После переплава в структуре немодифицированного сплава размеры первичных включений несколько меньше, но присутствует широкое разнообразие морфологических разновидностей: разветвленные, плитообразные, ромбические и тетрагональные кристаллы. Введение в расплав фосфора способствует дальнейшему измельчению и вырождению сложных форм кристаллов первичного кремния. В модифицированном сплаве отсутствуют конгломераты включений, кристаллы отделены друг от друга матричной эвтектикой и в большинстве имеют компактную геометрию. Но изменение количества введенного фосфора в пределах 0,03-0,07 % практически не влияет на средний размер включений, который остается на уровне 90 мкм. Дополнительное измельчение кристаллов первичного кремния до 50-60 мкм в модифицированном сплаве наблюдается лишь после применения ЭГИО, что, возможно, связано с более полным усвоением расплавом вводимой лигатуры. Однако измельчить кристаллы первичного кремния ниже 50-60 мкм путем такого комплексного воздействия на расплав не удалось. Для этого, по мнению авторов работы [4], необходимо применять специально подготовленную мелкокристаллическую фосфорсодержащую лигатуру.

Главный недостаток поршневых силуминов – низкие механические свойства, в частности, почти нулевой показатель относительного удлинения (стандартом ASTM он регламентирован на уровне < 1 %). Данные табл. 1 показывают, что механические свойства сплава А390 по мере увеличения количества использованной лигатуры повышаются и что уровень пластичности рекордно характеризует сплав, модифицированный 0,07 % Р с дополнительной ЭГИО.

*Результаты метода «стоп-заковки» расплава.* Закономерности образования и роста кристаллов первичного кремния в температурном интервале выделения этой фазы изучали методом «стоп-заковки». Контейнеры с расплавом, каждый обработанный своим образом, для замедления скорости охлаждения и равномерного теплоотвода устанавливали в теплоизолирующие гнезда и покрывали сверху асбестовыми крышками. Скорость остывания такого теплоизолированного расплава составляла примерно 0,2-0,3 °С/с. Через отверстие в крышке в расплав вводили ХА-термопару и с помощью высокочастотного измерительного комплекса с фиксацией данных на компьютер проводили запись кривой охлаждения. Параллельно через другое отверстие при определенных температурах (800; 700; 650; 600; 574 °С) методом всасывания в тонкие кварцевые трубки из расплава отбирали пробы и закаляли в воде. Расчетная скорость охлаждения закаленных образцов составляла 200 °С/с.

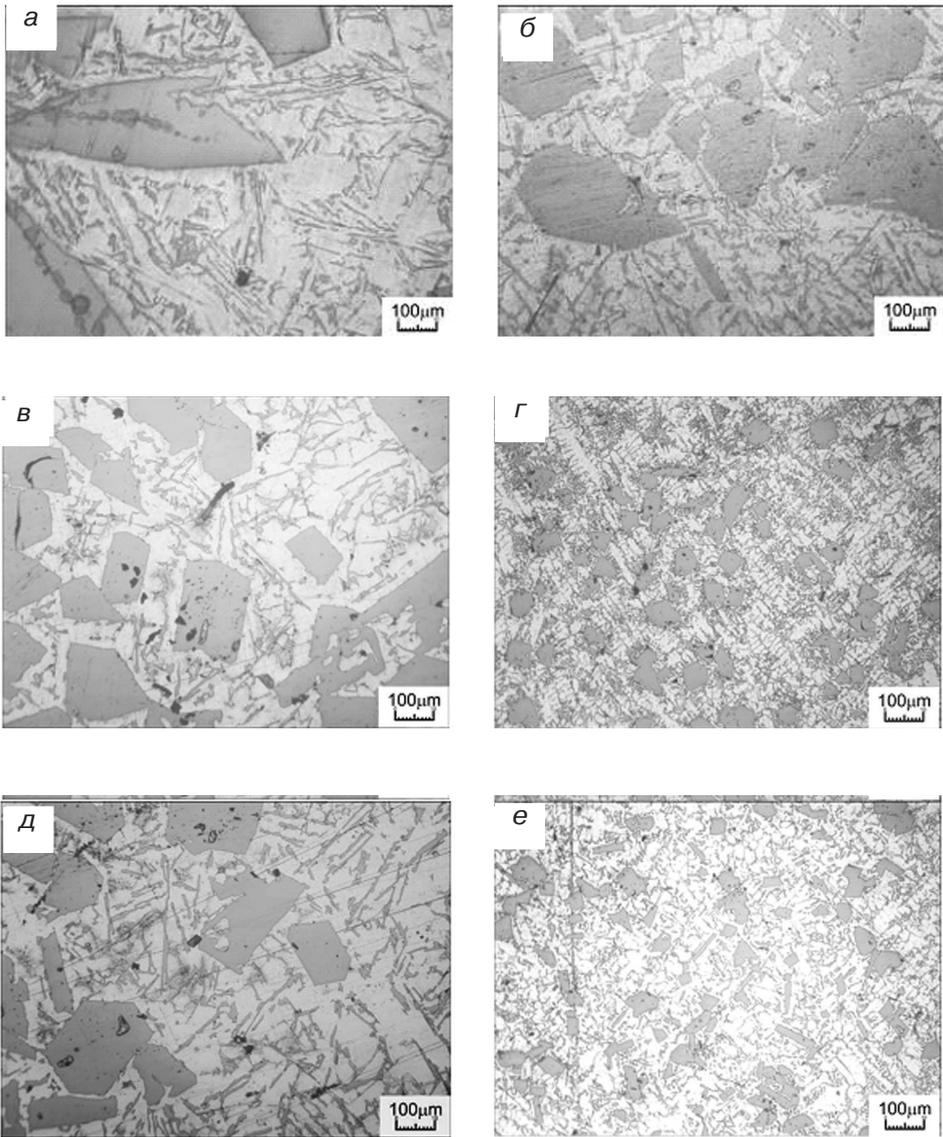


Рис. 1. Микроструктура сплава А390: а – чушковый сплав; б – после переплава; в – модифицирование 0,03 % Р; г – модифицирование 0,03 % Р + ЭГИО; д – модифицирование 0,07 % Р; е – модифицирование 0,07 % Р + ЭГИО

Кривые охлаждения сплава приведены на рис. 2. Температура ликвидуса немодифицированного сплава составляет  $T = 715\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура солидуса –  $T = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$  (после ЭГИО  $T = 572\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Сплав, модифицированный фосфором в количестве 0,03 %, по сравнению с немодифицированным имеет повышенную (до  $T = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температуру ликвидуса, что говорит в пользу такого механизма, как облегченное образование кристаллов первичного кремния на готовых центрах, внесенных лигатурой. Влияние ЭГИО на характер кристаллизации обнаруживается едва заметным понижением эвтектической температуры и незначительным уменьшением временного интервала формирования эвтектики.

Как следует из кривой охлаждения, при  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  сплав из контейнера попадал в трубку в полностью жидком состоянии, а его кристаллизация, следовательно, образование твердых фаз, проходила непосредственно во время закалки. При

**Таблица 1. Механические свойства обработанного сплава**

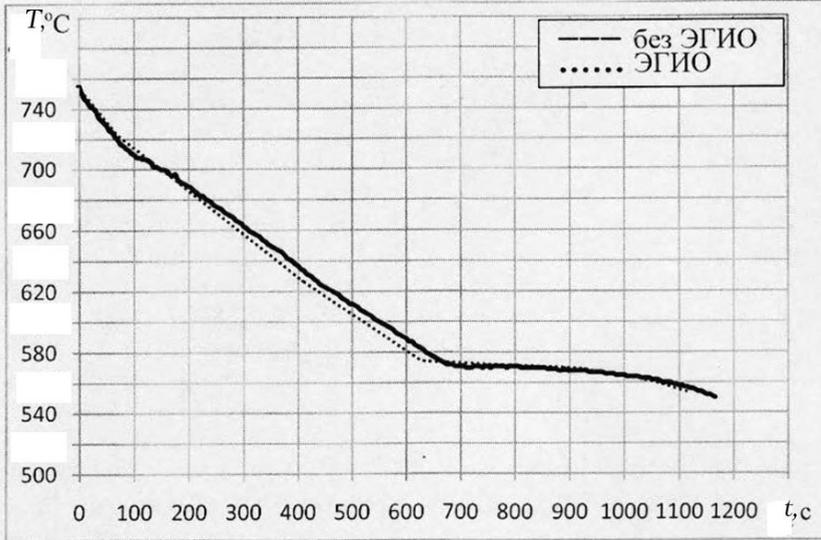
Вид обработки	$\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, %	Модуль Юнга, ГПа
без Р			
Без ЭГИО	153	0,4	60,1
ЭГИО	183	0,8	83,0
0,03 Р			
Без ЭГИО	156	0,4	65,0
ЭГИО	185	0,7	84,3
0,05 Р			
Без ЭГИО	161	0,5	59,1
ЭГИО	199	1,0	87,8
0,07 Р			
Без ЭГИО	185	0,9	80,0
ЭГИО	209	1,2	81,3

температурах всасывания 700; 650; 600 °С расплав в контейнере находился уже в твердожидком состоянии. Следовательно, образованные кристаллы первичного кремния вместе с остаточной жидкостью могли попадать внутрь трубки и фиксироваться закалкой. На момент достижения солидуса, очевидно, происходило схватывание кристаллов первичного кремния друг с другом в цельный остов, которые уже не могли всасываться в трубку, то есть при  $T = 574$  °С в трубку из контейнера попадала исключительно остаточная жидкость эвтектического состава, которая в результате закалки образовывала эвтектическую смесь.

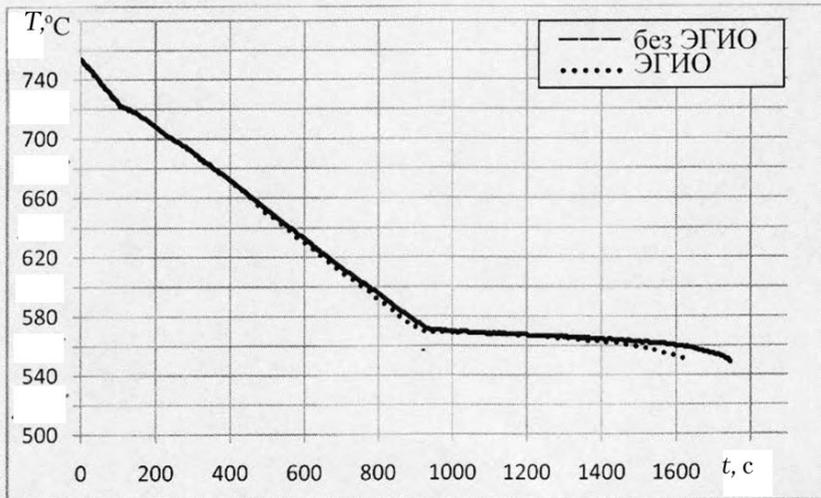
Данные табл. 2 показывают, до каких размеров в зависимости от вида предварительной обработки успевают дорасти включения первичного кремния на момент закалки. Видно, что во всем исследованном температурном интервале самые мелкие включения соответствуют сплаву, подвергнутому модифицированию совместно с ЭГИО. Кроме того, ЭГИО способствует образованию более тонко дифференцированной эвтектики, на которую, как известно, фосфор влияния не оказывает. Поэтому, обсуждая возможные механизмы усиления за счет ЭГИО мо-

**Таблица 2. Средний размер кристаллов первичного кремния в закаленных образцах, мкм**

Температура закалки, °С	Без Р		0,03 % Р	
	без ЭГИО	ЭГИО	без ЭГИО	ЭГИО
800	25-35	15-25	10-20	10-12
700	50-60	35-40	30-40	20-25
650	120-140	80-100	80-100	50-60
600	180-200	120-140	120-150	70-100
570	эвтектика с частицами Si размером 20-23 мкм	эвтектика с частицами Si размером 10-15 мкм	эвтектика с частицами Si размером 7-10 мкм	эвтектика с частицами Si размером 5-7 мкм



а



б

Рис. 2. Кривые охлаждения: а – без фосфора; б – модифицирование 0,03 % Р

диффузионного эффекта, следует учитывать не только опосредованное влияние через частицы модификатора, но и прямое воздействие ЭГИО на металлический расплав, который не является идеальным раствором атомов друг в друге, а имеет кластерное упорядочение. В таком расплаве для роста зародыша твердой фазы требуется диффузионный перенос атомов. В результате ЭГИО, как и в результате других силовых воздействий на расплав, присутствующие в нем устойчивые при температурах выплавки микрогруппировки кремния могут разрушаться, не успевая дорасти до исходных размеров при охлаждении. Таким образом, структурное разупорядочение жидкости будет определять другой ход кристаллизационного процесса и более высокую дисперсность структурных составляющих в сплаве.

**Выводы**

Экспериментальные исследования показывают, что комплексная обработка, сочетающая ввод в расплав 0,07 % Р в виде фосфористой меди и его электрогидро-

импульсную обработку, в отличие от отдельно взятого модифицирования фосфором позволяет измельчить хрупкие структурные составляющие в заэвтектическом сплаве А390 и преодолеть 1 %-ный барьер относительного удлинения. Приходится констатировать, что образование кристаллов первичного кремния размером менее 20 мкм, которое могло бы обеспечить сплаву А390 пластичность на уровне доэвтектических силуминов, даже после такой комплексной обработки расплава возможно лишь при высоких, недостижимых в реальных условиях литья, скоростей охлаждения. Таким образом, поиск альтернативных фосфору модифицирующих добавок и новых подходов к модифицированию структуры высококремнистых силуминов остается актуальным.



### Список литературы

1. Transformation of microstructure after modification of A390 alloy Zhang Ying, Yi Dan-qing / Li Wang-xin, Ren Zhi-sen, Zhao Qun, Zhang Jun-hong //Transaction of Nonferrous Metals Society of China. – 2007. – № 17. – P. 413-417.
2. Боом Е. А. Природа модифицирования сплавов типа силумин. – М.: Металлургия, 1972. – 72 с.
3. Поршневые силумины / Н. А. Белов, В. Д. Белов, С. В. Савченко и др. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2011. – 248 с.
4. Гаврилюк В. П., Бондаревський В. М., Гаврилюк К. В. Формування структури алюмінійкремнієвих лігатур для отримання заэвтектичних силумінів //Металознавство та обробка металів. – 2012. – № 1. – С. 22-26.

Поступила 03.08.2012

УДК 621.74

**М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко\*, В. А. Косячков,  
В. Г. Могилатенко**

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев,

\*Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск

## СПОСОБЫ ВНУТРИФОРМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА

*Разработаны и исследованы способы внутриформенной обработки исходного жидкого чугуна в промежуточных реакционных камерах, расположенных в литниковой системе между стояком и питателем, представляющие собой пенополистироловую оболочку, внутрь которой помещается расчетное количество порошкообразной (зернистой) добавки или специальный патрон (контейнер), изготовленный из вспененного полистирола с замешанной порошкообразной (зернистой) добавкой. Предложенные способы внутриформенной обработки обеспечивают максимальное усвоение добавок, равномерное их распределение в объеме*