

Ю. В. Моисеев, А. И. Личак

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ( $B \leq 0,2$ Тл) НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ И МИКРОСТРУКТУРУ СИЛУМИНОВ АК7 И А390

*Приведен краткий обзор сведений о влиянии слабых электромагнитных полей на процессы затвердевания металлов и сплавов. Показана определяющая роль перемешивания при формировании в этих условиях литой заготовки из сплавов АК7 и А390.*

**Ключевые слова:** затвердевание, электромагнитное поле, перемешивание, силумины, структура, отливка.

*Приведено короткий огляд впливу слабких електромагнітних полів на процеси тверднення металів та сплавів. Визначена роль перемішування в формуванні структури виливків зі сплавів АК7 та А390.*

**Ключові слова:** твердіння, електромагнітне поле, перемішування, силуміни, структура, вилівок.

*Brief overview of the influence of weak electromagnetic fields on solidification of metals and alloys is provided. The decisive role of mixing in the formation of casting structure for alloys АК7 and А290 is shown.*

**Keywords:** solidification, electromagnetic fields, mixing, silumin, structure, casting.

#### Общие физические предпосылки

Сложность процессов, протекающих в металлах и сплавах при их затвердевании в слабых электромагнитных полях, обусловлена вихревой физической природой электромагнитного поля в электропроводных материалах.

#### Стационарное магнитное поле

Феноменологические термодинамические оценки показывают, что вклад внешнего постоянного магнитного поля в химический потенциал «*i*-й» массовой фазы системы «кристалл – расплав» определяется величиной  $H^2$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля. Только при достаточно больших значениях  $H$ , превышающих  $10^6$  А/м, можно ожидать едва заметного повышения температуры плавления такого металла, как железо, что составит приблизительно  $0,1$  °С [1], а такие параметры кристаллизации, как скорости образования центров кристаллизации и роста, несколько возрастут при равноценном переохлаждении. Следует отметить, что слабые ( $0,2$  Тл) магнитные поля эффективно влияют на процесс затвердевания полимеров, это проявляется в смещении температурных интервалов кристаллизации, разрушении магнитным полем сетки физических узлов в расплаве полимера и выделением из расплава в процессе затвердевания низкомолекулярной фракции, что существенно изменяет кинетику затвердевания [2]. Ожидаемое влияние постоянного магнитного поля на кристаллографическую ориентацию растущих из расплава металлических кристаллов обнаруживается только при использовании сильных магнитных полей ( $\approx 9,4$  Тл), создаваемых сверхпроводящими магнитами [3].

Более существенную роль может играть постоянное магнитное поле в процессах гидравлического движения электропроводящих жидкостей. Возникающие в жидкости при движении во внешнем магнитном поле пондеромоторные силы изменяют профиль относительной скорости ( $v_m/V_{cp}$ ) ламинарного течения жидкости по сече-

## Затвердевание сплавов

нию канала (рис. 1) [4]. Действие пондеромоторных сил приводит к выравниванию скорости по сечению потока и к увеличению градиента скорости у стенки канала, что равносильно возрастанию сопротивления трения. Характер профиля скорости зависит, в данном случае, от числа Гартмана, определяющего соотношение между электромагнитными силами и силами вязкости:

$$M = R_0 \cdot B_0 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (1)$$

где  $R_0$  – линейный размер потока,  $B_0$  – магнитная индукция,  $\sigma$  – электрическая проводимость жидкости и  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Приведенные выше результаты получены для ламинарного режима движения электропроводящей жидкости, но можно предположить, что для турбулентного и вихревого режимов движения влияние постоянного магнитного поля скажется, по крайней мере, в ориентационном выравнивании пульсаций и вихрей вдоль его силового поля. Косвенно это подтверждают выводы автора [5], что постоянное магнитное поле препятствует развитию термоконвективных локальных движений жидкого металла в

слитке, ухудшает теплообмен и способствует развитию направленной столбчатой структуры. В некоторых случаях, например, при направленной кристаллизации магнитов, это способствует улучшению качества литой структуры, хотя еще более выигрышный результат получают при последующем дисперсионном твердении в магнитном поле [6].

### Переменное магнитное поле

Поведение электропроводящей жидкости в переменном магнитном поле связано с появлением в ней обменных электромагнитных сил вследствие электромагнитной индукции и силового взаимодействия возникающих при этом индукционных токов « $\gamma$ » с магнитной индукцией « $\vec{B}$ ». При любой неоднородности плотности тока  $\gamma$  по направлению магнитной индукции « $\vec{B}$ » или магнитной индукции по направлению тока, в жидкости возникают силовые вихри и наблюдается циркуляция жидкого металла, приводящая к перемешиванию расплава. Наиболее яркой иллюстрацией этого процесса является поведение жидкого металла в тигле индукционной печи [7]. Наводимый в жидком металле вторичный индукционный ток противоположен по направлению первичному току в индукторе, поэтому индукция этого вторичного тока препятствует проникновению внешнего электромагнитного поля в жидкий металл, что приводит к неравномерному распределению плотности тока и индукции по глубине металла. При однофазном питании индуктора возникают две зоны вихревого движения металла (рис. 2) – верхняя и нижняя, а его интенсивность влияет на: скорость оплавления шихты; эффективность растворения и распределения в объеме расплава модифицирующих добавок; условия окисления и испарения хи-

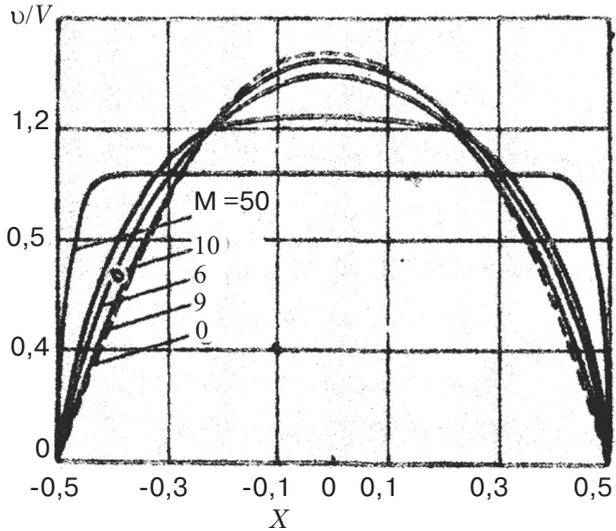


Рис. 1. Профиль относительной скорости течения электропроводящей жидкости по сечению канала при различных числах Гартмана [4]

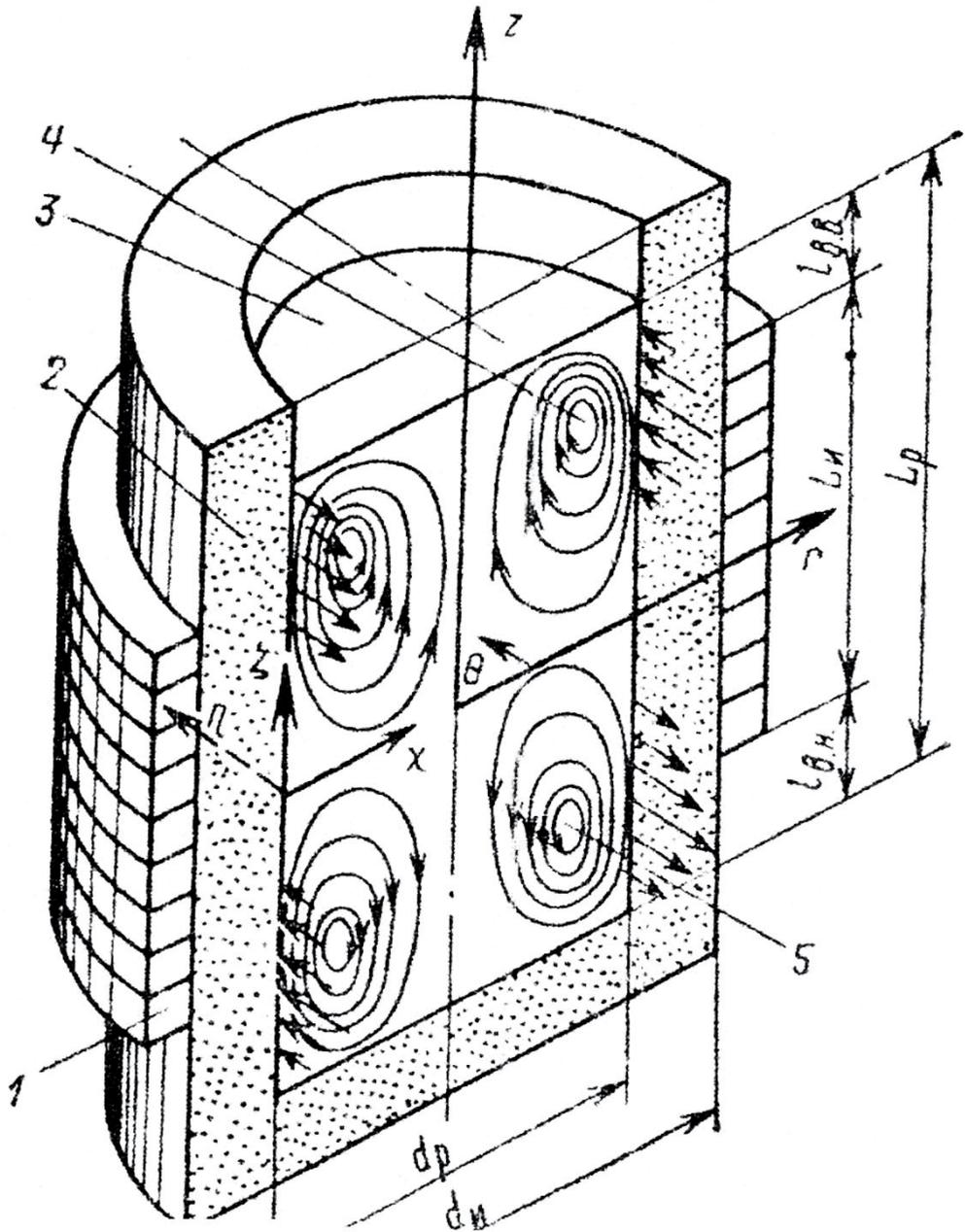


Рис. 2. Схема индукционной тигельной печи: 1 – индуктор; 2 – футеровка; 3 – садка; 4, 5 – верхняя и нижняя вихревые зоны, [7]

мически активных компонентов сплава; условия рафинирования и удаления в шлак неметаллических включений. Промежутки между основными вихрями могут быть заполнены вторичными вихрями, динамически связанными с основными и являющимися очагами турбулизации жидкого металла. Питание индуктора многофазными источниками и использование бегущего магнитного поля позволяют получать одноконтурную циркуляцию жидкого металла по высоте расплава в тигле, но в силу различных причин этот прием используют редко. В большинстве индукционных печей

скорость циркуляции жидкого металла пропорциональна силе тока в индукторе, а движение металла носит турбулентный характер.

Перемешивание жидкого металла ускоряет плавку и скорость протекания различных физико-химических металлургических процессов, но оно может изменять также условия кристаллизации затвердевающего металла. Это касается, прежде всего, распределения примесей у фронта затвердевания, а также выравнивания химического состава остающейся жидкой фазы (рис. 3) [8]. Конечно, в формировании структуры отливки более важное значение имеет концентрационное переохлаждение и температурный градиент в жидкости у фронта затвердевания, но перемешивание будет сужать или расширять зону переохлаждения у этого фронта и, тем самым, изменять условия гетерогенной кристаллизации. С протяженностью зоны переохлаждения может быть, в частности, связана устойчивость ориентированной столбчатой структуры и каталитическая активность гетерогенных центров кристаллизации.

Интенсификация теплообмена в системе «жидкий металл – литейная форма» при перемешивании ведет к повышению скорости затвердевания, что неоднократно пытались использовать в процессе непрерывной разливки металла [9]. Трудности, связанные с высокой температурой и экранированием электромагнитного поля кристаллизатором и затвердевающей

корочкой металла, удалось частично преодолеть в конструкции электромагнитного кристаллизатора для непрерывной разливки алюминиевых сплавов (рис. 4) [10]. Повышение дисперсности структурных составляющих и однородности структуры по сечению слитка (при электромагнитной разливке) связывают с повышением переохлаждения жидкого металла и с увеличением количества центров кристаллизации за счет обламывания ветвей дендритов [11].

Электромагнитное перемешивание начинает занимать свое место и в практике получения литых заготовок из жидких матричных сплавов с добавками путем перемешивания различных порошкообразных материалов (рис. 5) [12]. Привлекает

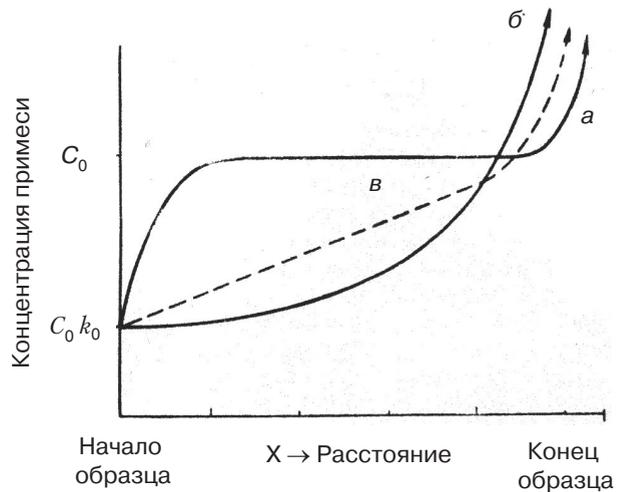


Рис. 3. Распределение концентрации примеси вдоль образца, затвердевающего в различных режимах перемешивания: а – без перемешивания; б – с принудительным перемешиванием; в – с конвекционным перемешиванием, [8]

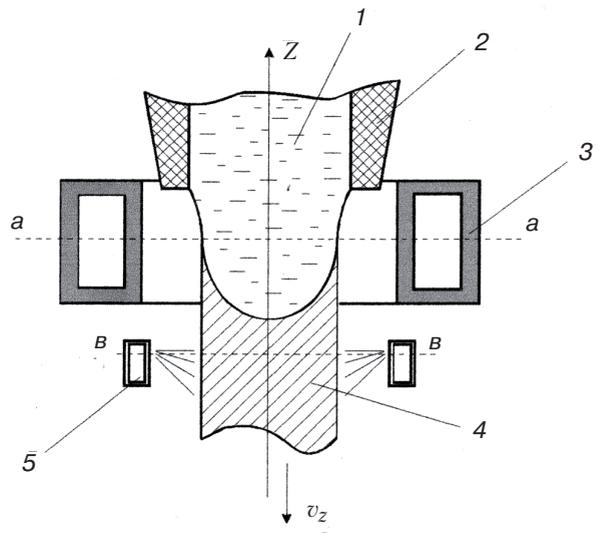


Рис. 4. Электромагнитный кристаллизатор: 1 – жидкий металл; 2 – сливной стакан; 3 – индуктор; 4 – слиток; 5 – охлаждающее устройство, [11]

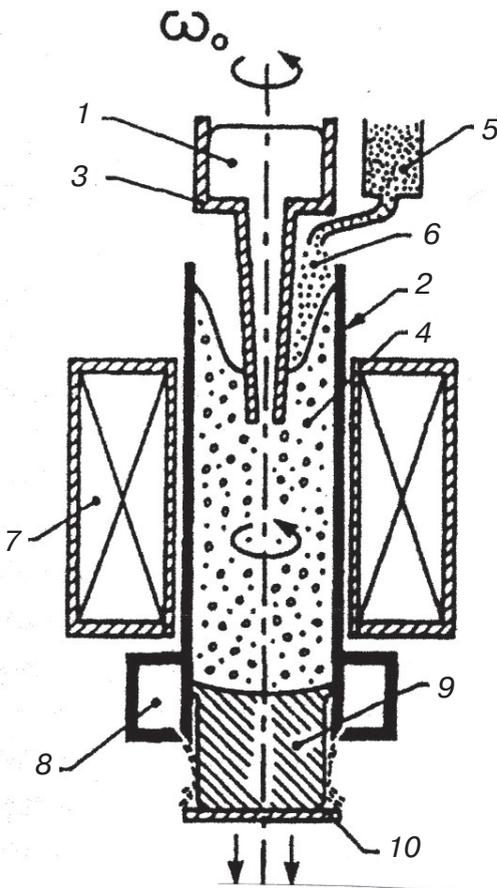


Рис. 5. Схема устройства для получения заготовок из жидкотвердых сплавов, перемешиваемых магнитным полем: 1 – жидкий металл; 2 – форма; 3 – чаша; 4 – смесь; 5 – емкость для твердофазных частиц; 6 – частицы; 7 – ротор с постоянными магнитами; 8 – охладитель; 9 – слиток; 10 – поддон, [12]

граммной бумаге самописца Н-373 (для визуального контроля процесса затвердевания по кривой затвердевания).

Индукция в зазоре магнитопровода, измеренная с помощью датчика Холла, при токе в первичной катушке трансформатора 30 А по центру сечения магнитопровода составила 0,10 Тл, а у края – 0,18 Тл.

Песчаная форма (на пульвербакелитовом связующем) имеет толщину боковых стенок 6,0 мм и позволяет получать слиток размерами 38х38х42 мм массой 145-150 г (по алюминию). Базовый сплав плавляли в печи электросопротивления, перегревали на 100 °С выше температуры ликвидус и заливали в установленную в зазор магнитопровода литейную форму с помощью подогретого мерного ковшика. Сплав АК7 при необходимости модифицировали лигатурой AlTi<sub>5</sub>B, а сплав А390 – фосфористой медью МФ-1.

Сравнительный анализ термических кривых затвердевания сплавов АК7 и А390 без приложения внешнего электромагнитного поля (рис. 7, 8, а) и с полем (рис. 7, 8, б) показывает, что изменения касаются в основном снятия рекалесценции температуры у фронта затвердевания, как в начальной стадии кристаллизации расплава, так

простота и оригинальность конструкции перемешивателя, набранного из постоянных магнитов, которые расположены коаксиально оси вращения ротора (на рис. 5 не показано), что способствует объемному перемешиванию. Изменяя направление вращения ротора, можно изменять направление перемешивания. Обращает внимание также доступность постоянных магнитов и стабильность их свойств: при точке Кюри около 850 °С нагрев магнитов типа ЮНДК35Т5 до 600 °С приводит к снижению магнитного потока не более, чем на 1,0 % [6].

Приведенный краткий обзор свидетельствует, что электромагнитное поле может быть активным средством изменения условий затвердевания, при этом имеют значение как интенсивность поля (индукция), так и его частота (глубина проникновения) и векторная направленность.

Авторы изучали влияние слабого (до 0,2 Тл) электромагнитного поля на кинетику затвердевания и микроструктуру доэвтектического АК7 и заэвтектического А390 сплавов системы Al-Si (таблица) при заливке в песчаную форму.

В качестве генератора электромагнитного поля использовали трансформатор ОСМ-2,5, в магнитопроводе которого выполнили зазор по сечению длиной 50 мм (рис. 6). В зазоре располагали песчаную форму с термопарой ХА, показания которой регистрировали в компьютере и параллельно – на диа-

### Характеристика сплавов АК7 и А390

Марка сплава	Химический состав, %мас						Фазовый состав	Температура фазовых превращений, °С	Электропроводность, $\sigma$ , МСм/м
	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe			
АК7	7,08	0,39	0,59	0,76	0,16	0,83	$\alpha$ -твердый раствор (Si, Cu, Zn) в Al, эвтектика: Al-Si-FeSiAl <sub>5</sub> , включения: FeMg <sub>3</sub> Si <sub>5</sub> Al <sub>8</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	615 577	19,69
А390	16,19	0,56	0,01	4,48	0,02	0,31	- кристаллы Si, -эвтектика: Al-Si-FeSiAl <sub>5</sub> Al-CuAl <sub>2</sub> -Si	640 577 525	16,26

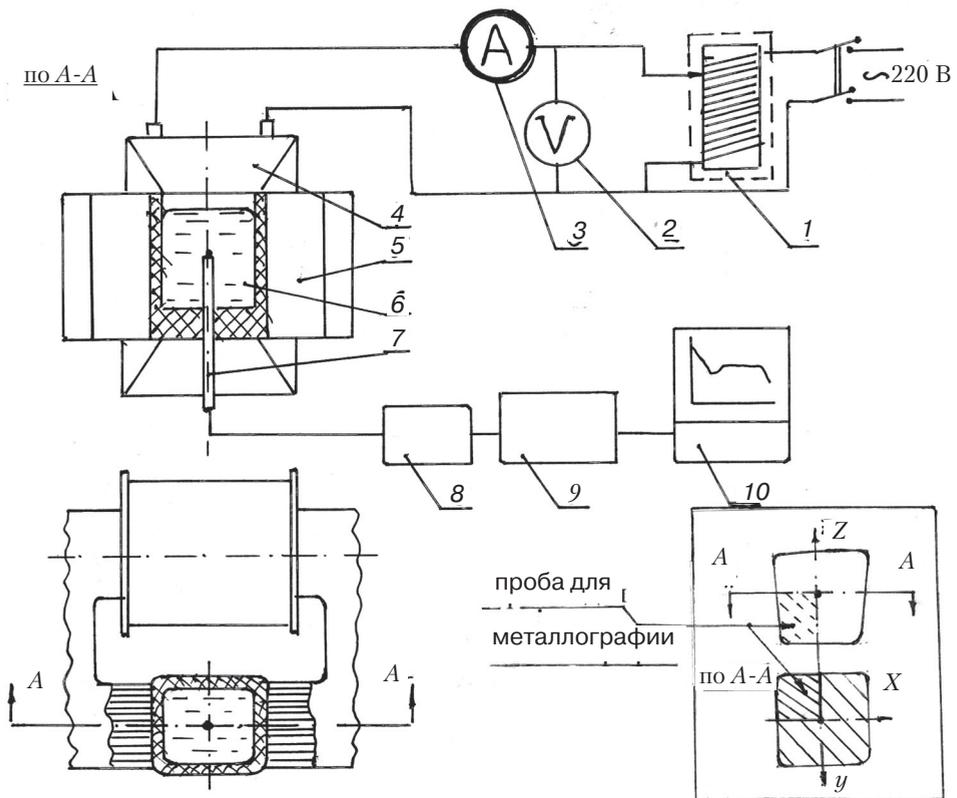


Рис. 6. Схема установки для физического моделирования затвердевания силуминов в переменном магнитном поле: 1 – регулятор напряжения; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – генератор магнитного поля; 5 – магнитопровод; 6 – жидкий металл; 7 – термопара; 8 – усилитель сигнала термопары; 9 – компьютер; 10 – самописец

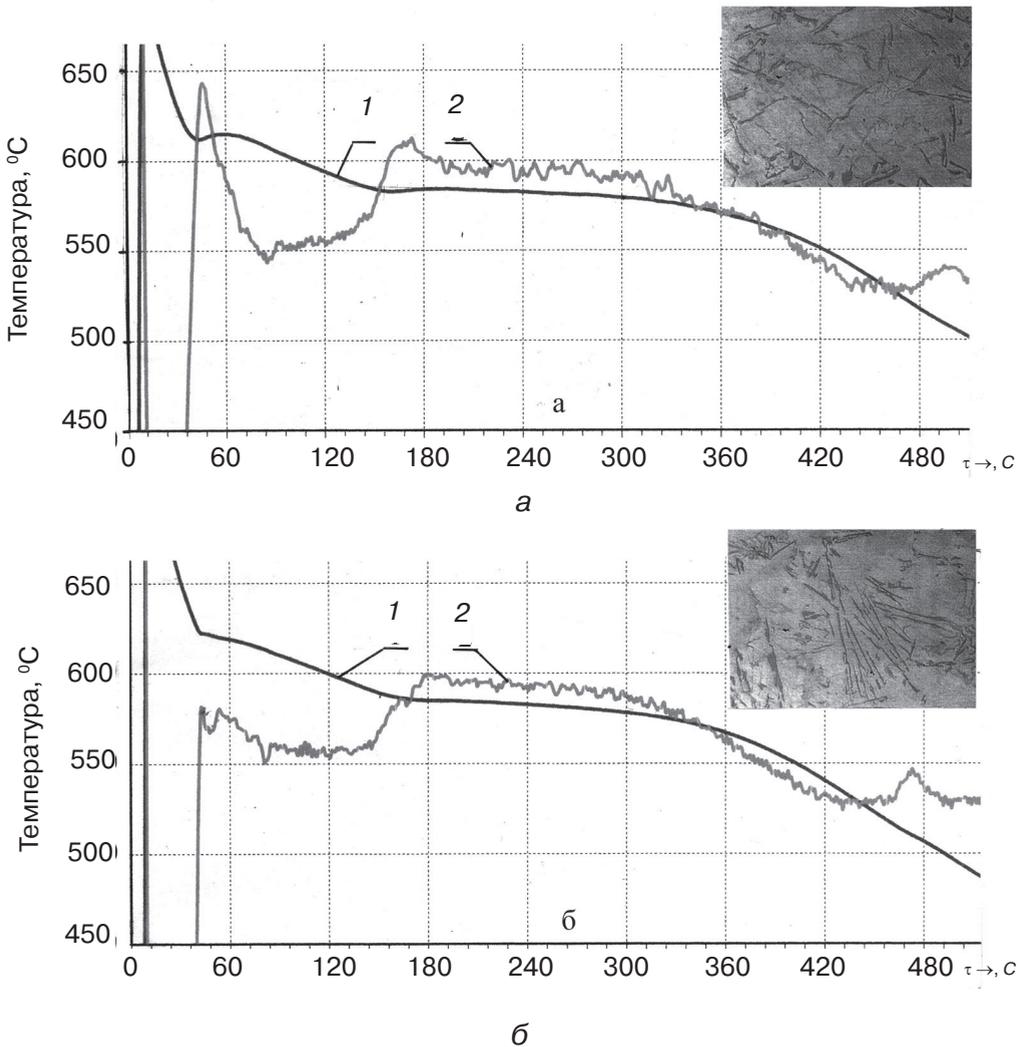


Рис. 7. Кривая охлаждения (1), ее производная (2) и микроструктура сплава АК7 при его затвердевании: а – без внешнего электромагнитного поля ( $I_T = 0$  А); б – с электромагнитным полем ( $I_T = 30$  А)

и в начале эвтектической кристаллизации. Можно также отметить незначительное увеличение (на 2-3 %) длительности затвердевания, по-видимому, за счет тепловыделения вихревыми токами. Наряду с этим микроструктуры сплавов приобретают существенные изменения, наиболее очевидные для направленности и формы роста эвтектических кристаллов кремния (рис. 9). Для заэвтектического сплава АЗ90 количество эвтектики (по сравнению с ожидаемым по диаграмме состояния) возрастает, что может быть связано с диспергированием первичных выделений кремния вихревыми потоками расплава у фронта затвердевания и вынесением диспергированных частиц в жидкую фазу. На рис. 9, д показан момент начала диспергирования: после заливки литейной формы жидким металлом до момента включения поля начинается затвердевание сплава у поверхности формы. При включении поля возникающие в расплаве вихри омывают фронт затвердевания, уносят обогащенный кремнием переохлажденный слой в жидкую фазу и доставляют к фронту затвердевания порции перегретого металла, диспергирующие малопрочные кристаллы кремния.

Вихревое движение жидкого металла в затвердевающей отливке и хаотическое

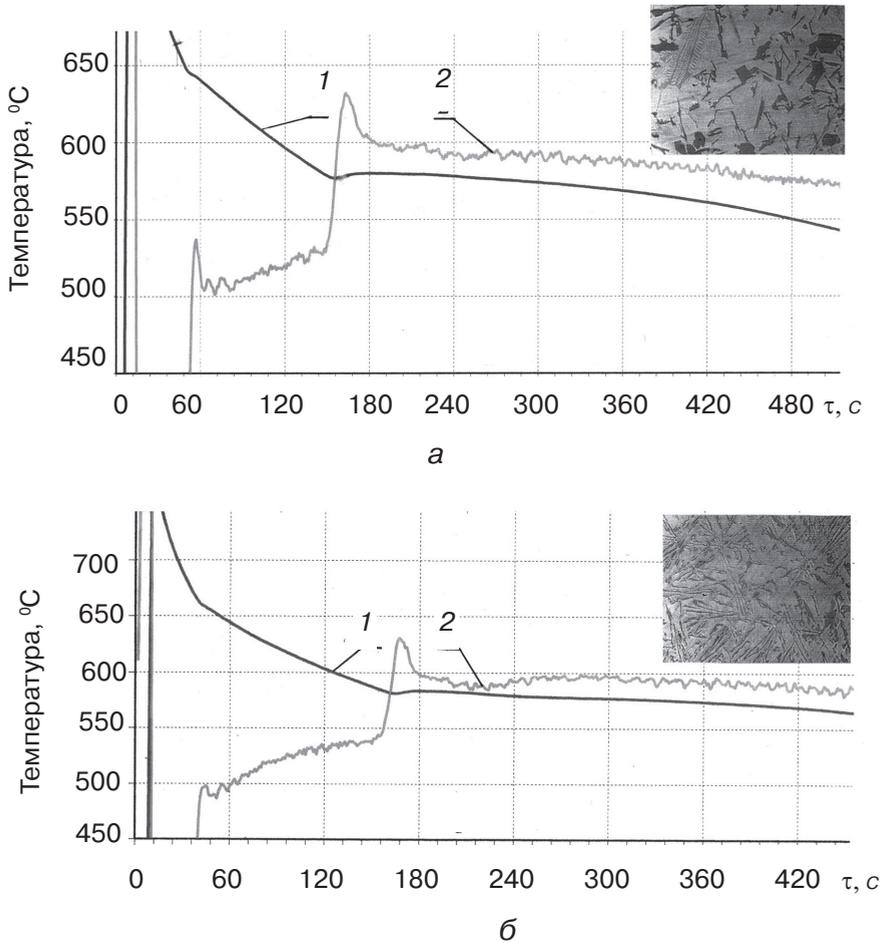


Рис. 8. Кривая охлаждения (1), ее производная (2) и микроструктура сплава A390 при его затвердевании: а – без внешнего электромагнитного поля ( $I_T = 0$  A); б – с электромагнитным полем ( $I_T = 30$  A)

(в данном случае) его перемешивание могут различными путями оказывать влияние на формирование структуры отливки: очищать фронт затвердевания от избыточного количества примесных элементов (сокращение зоны концентрационного переохлаждения); усреднять температуру незатвердевшей части расплава (увеличивать градиент температуры у фронта затвердевания и тем самым сокращать зону переохлаждения); выносить пересыщенную примесным элементом и переохлажденную приграничную жидкую фазу в расплав (расширение зоны переохлаждения); диспергировать малопрочную двухфазную зону кристаллизации, способствовать затвердеванию расплава в потоке и выстраиванию вдоль силового поля анизаметричных частиц твердой фазы; усилить теплообмен (в металлической литейной форме), ускорять затвердевание отливки и способствовать дендритному росту кристаллов.

Электромагнитное поле представляет широкие возможности управления затвердеванием и получением требуемой структуры литого изделия путем: регулирования интенсивности электромагнитного поля на различных этапах затвердевания; регулирования векторной направленности и объемных зон вихревых силовых полей при использовании импульсных источников электропитания; дискретизации подаваемой через магнитопровод электроэнергии; конструктивных изменений магнитопровода.

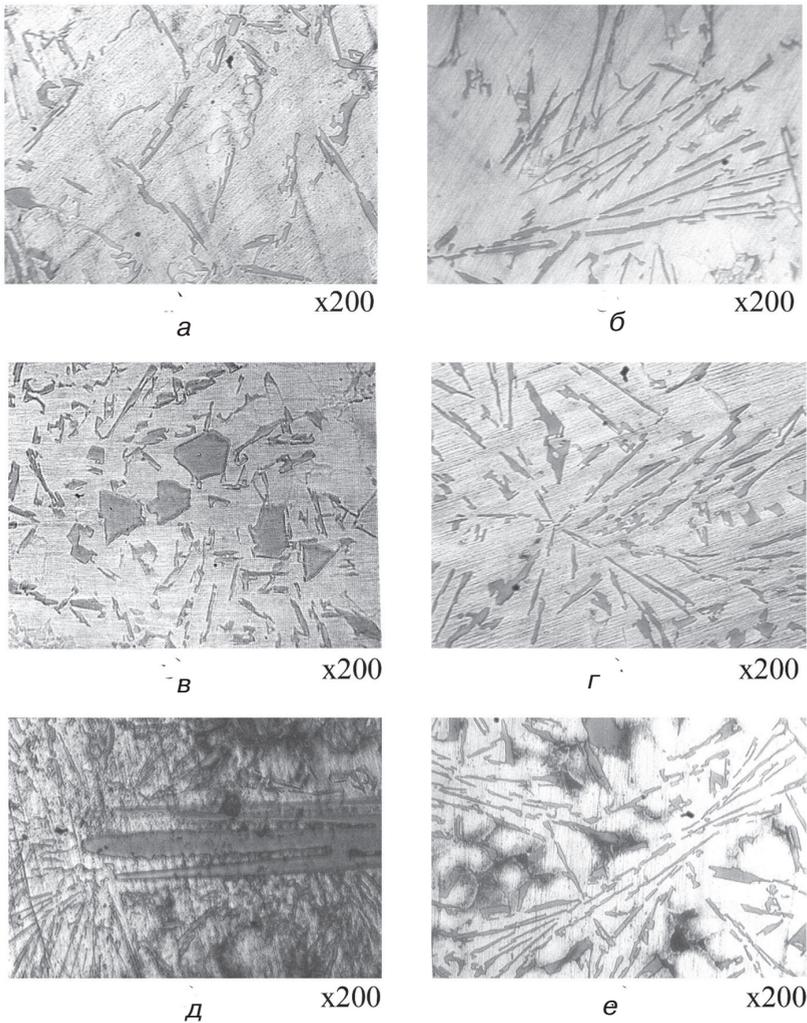


Рис. 9. Микроструктуры сплавов АК7 (а, б) и А390 (в, г, д, е): а, б – при затвердевании без поля; в, г, д, е – в поле ( $I = 30 \text{ А}$ ;  $B \cong 0,2 \text{ Тл}$ )



### Список литературы

1. Лычев А. П., Черемысин А. И. Кристаллизация металлов во внешнем магнитном поле // Известия ВУЗов, ЧМ. – 1978. – №11. – С. 158-161.
2. Колесникова Е. Д. Воздействие слабых магнитных полей на процессы кристаллизации и плавления линейных полимеров: Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. – Воронеж, 2009.
3. Черная Е. В., Ченг Тиен, Мин Кай Ли. Влияние магнитного поля на ориентацию кристаллографических осей в поверхностных слоях олова // Физика твердого тела. – 2010. – т. 52. – вып. 7. – С. 1435-1437.
4. Патрашев А. Н., Кивако Л. А., Гожий С. И. Прикладная гидромеханика. – М.: Воениздат, 1970. – С. 650-659.
5. Самойлович Ю. А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. – М.: Metallurgia, 1986. – 169 с.

6. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1972. – 287 с.
7. Тир Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Metallurgia, 1975. – 224 с.
8. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – С. 93-97.
9. Применение вращающегося магнитного поля при непрерывной разливке металла. Режим доступа: <http://steellab.com.ua> (дата обращения: 15.05.2016).
10. Гецелев З. Н., Балахонцев В. А. и др. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М.: Metallurgia, 1983. – 152 с.
11. Фигуровский Д. К., Первухин М. В., Романова Е. В. Влияние воздействия электромагнитного поля в процессе кристаллизации на структуру сплава системы Al – РЗМ (сплав 1417М). Материалы VII Международной научно-технической конференции 07-11.12.2009. – М.: Intermatic, 2009. – 189-193 с.
12. Vives Ch., Bas J., Beltran G., Fontaine G. Fabrication of metal matrix composites using a helical induction stirrer // Materials Science and Engineering A173 (1993), pp. 239-242.



## References

1. Lychev A. P., Cheremysin A. I. (1978) Kristallizatsiya metallov vo vneshnem magnitnom pole [Crystallization of metals in an external magnetic field]. Izvestiya VUZov, ChM, no. 11, pp. 158-161. [in Russian].
2. Kolesnikova Ye. D. (2009) Vozdeystvie slabyykh magnitnykh poley na protsessy kristallizatsii i plavleniya lineynykh polimerov [The impact of weak magnetic fields on processes of crystallization and melting of linear polymers]. (PhD Thesis), Voronezh. [in Russian].
3. Chernaya Ye. V., Cheng Tien, Min Kay Li (2010) Vliyaniye magnitnogo polya na orientatsiyu kristallograficheskikh osey v poverkhnostnykh sloyakh olova [The influence of magnetic field on the orientation of the crystallographic axes in the surface layers of tin]. Fizika tverdogo tela, t. 52, vol. 7, pp. 1435-1437. [in Russian].
4. Patrashev A. N., Kivako L. A., Gozhiy S. I. (1970) Prikladnaya gidromekhanika [Applied hydromechanics]. Moscow: Voenizdat, pp. 650-659. [in Russian].
5. Samoylovich Yu. A. (1986) Kristallizatsiya slitka v elektromagnitnom pole [Crystallization of the ingot in an electromagnetic field]. Moscow: Metallurgiya, 169 p. [in Russian].
6. Preobrazhenskiy A. A. (1972) Teoriya magnetizma, magnitnye materialy i element [The theory of magnetism, magnetic materials and elements]. Moscow: Vysshaya shkola, 287 p. [in Russian].
7. Tir L. L., Stolov M. Ya. (1975) Elektromagnitnye ustroystva dlya upravleniya tsirkulyatsiyey raspлава v elektropechakh [Electromagnetic control device for circulation of the melt in electric furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 224 p. [in Russian].
8. Vayngard U. (1967) Vvedenie v fiziku kristallizatsii metallov [Introduction to the physics of crystallization of metals]. Moscow: Mir, pp. 93-97. [in Russian].
9. Primenenie vrashchayushchegosya magnitnogo polya pri nepreryvnoy razlivke metalla [The use of a rotating magnetic field in the continuous casting of metal]. URL: <http://steellab.com.ua> (accessed 15.05.2016).
10. Getsel'ev Z. N., Balakhontsev V. A. et al. (1983) Nepreryvnoe lite v elektromagnitnyy kristallizator [In the electromagnetic continuous casting mold]. Moscow: Metallurgiya, 152 p. [in Russian].
11. Figurovskiy D. K., Pervukhin M. V., Romanova Ye. V. (2009) Vliyaniye vozdeystviya elektromagnitnogo polya v protsesse kristallizatsii na strukturu splava sistemy Al – RZM (сплав 1417М) [Effect of exposure to electromagnetic fields during the crystallization process of the system structure of the alloy Al – RZM (alloy 1417M)]. Материалы VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoй konferentsii 07-11.12.2009. Moscow: Intermatic, pp. 189-193. [in Russian].
12. Vives Ch., Bas J., Beltran G., Fontaine G. (1993) Fabrication of metal matrix composites using a helical induction stirrer. Materials Science and Engineering A173, pp. 239-242. [in English].

Поступила 08.02.2017