

УДК 621.74

DOI 10.17073/0021-3438-2015-3-56-59

## ФИЗИЧЕСКИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

© 2015 г. **И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, Н.А. Белов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

*Статья поступила в редакцию 22.09.14 г., доработана 05.12.14 г., подписана в печать 30.12.14 г.*

Обобщены основные теоретические положения о влиянии модифицирующих физических воздействий (вибрация, ультразвук, электромагнитное перемешивание, термовременная обработка) на кристаллизационные процессы литейных сплавов. С помощью математических расчетов и экспериментальных исследований выявлено, что процессы кристаллизации и структурообразования литейных сплавов в значительной степени могут определяться технологией обработки физическими воздействиями при плавке и литье. При этом физические воздействия на кристаллизующийся расплав приводят к его сильной турбулизации и перемешиванию, что уменьшает температурные и концентрационные градиенты в расплаве, устраняет перегрев жидкой фазы по отношению к температуре солидус, обламывает дендриты, которые являются хорошими затравками кристаллизации для всего объема расплава. Оценка роста дендритов при кристаллизации показала, что при физических воздействиях на расплав процессу укрупнения противостоит процесс дробления дендритных зерен. Физические воздействия приводят к объемной кристаллизации с равноосными зернами без образования столбчатой структуры. Физические модифицирующие воздействия при условии их рационального применения способствуют повышению качества получаемых сплавов и отливок из них.

**Ключевые слова:** расплав, плавка, физические модифицирующие воздействия, кристаллизация, температура ликвидус, температура солидус, дендриты, разделительная диффузия, переохлаждение, перемешивание, радиус критического размера.

Main notions on the influence of modifying physical effects (vibration, ultrasound, electromagnetic stirring, thermal-temporal treatment) on the crystallization of cast alloys are generalized. It is revealed with the help of mathematic calculations and experimental investigations that the crystallization and structure formation of cast alloys can be largely determined by the technology of treatment by physical effects during smelting and casting. Physical effects on the crystallizing melt lead to its strong turbulization and mixing, which decreases the temperature and concentration gradients in the melt, eliminates overheating of the liquid phase relative to the solidus temperature, and breaks off the dendrites, which are good crystallization seeds for the entire melt bulk. The evaluation of the dendritic growth during the crystallization showed that dividing the dendrite grains under the physical effects to the melt withstands to their coarsening. Physical effects lead to the bulk crystallization with equiaxial grains without the formation of the columnar structure. Physical modifying effects promote an increase in the quality of fabricated alloys and casts made of them with the proviso of their rational use.

**Keywords:** melt, smelting, physical modifying effects, cast aluminum alloys, crystallization, liquidus temperature, solidus temperature, dendrites, separation diffusion, supercooling, stirring, clusters, nucleus, critical radius.

**Селянин И.Ф.** — докт. техн. наук, профессор кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). Тел.: (3843) 78-43-99. E-mail: [kafedra\\_lp@mail.ru](mailto:kafedra_lp@mail.ru).

**Деев В.Б.** — докт. техн. наук, гл. науч. сотр. Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы», профессор кафедры технологии литейных процессов «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: [deev.vb@mail.ru](mailto:deev.vb@mail.ru).

**Белов Н.А.** — докт. техн. наук, заместитель директора Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы», профессор той же кафедры «МИСиС». Тел.: (495) 951-19-28. E-mail: [nikolay-belov@yandex.ru](mailto:nikolay-belov@yandex.ru).

**Приходько О.Г.** — канд. техн. наук, доцент, начальник учеб.-метод. управления СибГИУ. Тел.: (3843) 78-43-99. E-mail: [kafedra\\_lp@mail.ru](mailto:kafedra_lp@mail.ru).

**Пonomарева К.В.** — ст. препод. кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства СибГИУ. Тел. (3843) 78-43-99. E-mail: [kafedra\\_lp@mail.ru](mailto:kafedra_lp@mail.ru).

## Введение

В соответствии с классической теорией модифицирования металлических сплавов все модификаторы делятся на зародышеобразующие и поверхностно-активные. Первые должны отвечать принципу структурного и размерного соответствия [1]. Механизмы действия поверхностно-активных модификаторов связаны с адсорбцией поверхностно-активных элементов на кристаллических зародышах и блокировкой их роста. Однако имеются и исключения. Согласно теории поверхностных явлений, модификаторы должны снижать межфазовое поверхностное натяжение между частицей и расплавом. К примеру, для силуминов основными поверхностно-активными веществами являются Na и S, но кристаллические решетки этих элементов значительно отличаются по кристаллографическим параметрам от решеток модифицируемых сплавов.

Огромную перспективу в современных металлургии и литейном производстве также представляют физические способы модифицирования литой структуры сплавов — такие, как ультразвук, электромагнитные поля, вибрация, термовременная обработка и др. Технологии физического модифицирования имеют существенное преимущество по сравнению с другими методами обработки расплавов — не изменяется химический состав расплава во время плавки, что, в отличие от технологий с применением элементов-модификаторов, не приводит к накоплению в сплавах при дальнейших переделах излишнего количества примесей.

Физические воздействия на расплавы можно использовать в процессе плавки, заливки в литейную форму, кристаллизации. Но теоретическое описание модифицирующего влияния этих технологий на процессы формирования структуры, несмотря на многочисленные теоретические и практические исследования в данном направлении, представленные в научной литературе, продолжает вызывать вопросы у специалистов, что сдерживает создание единой общепринятой теории модифицирования сплавов физическими воздействиями и более широкое применение последних в реальном производстве.

## Оценка роста дендритов при кристаллизации

Все виды физических воздействий на кристаллизующийся расплав приводят к его сильной турбули-

зации. При низких числах Рейнольдса наблюдаются пульсации крупных масштабов с низкими частотами. Крупномасштабные пульсации определяют процессы турбулентного смешения, т.е. коэффициенты внутреннего трения ( $\nu_T$ ), диффузии ( $D$ ) и температуропроводности ( $a_T$ ).

Для математического описания турбулентного смешения вводят коэффициент турбулентного переноса [2]:

$$A_T = l \overline{w}' \quad (1)$$

Здесь  $l$  — масштаб турбулентности, или средняя длина свободного пробега турбулентной молекулы;  $\overline{w}' = \sqrt{\overline{w'^2}}$  — среднеквадратичная пульсирующая скорость, определяемая как

$$\overline{w}' = l(d\overline{w}/dy), \quad (2)$$

где  $d\overline{w}/dy$  — производная скорости потока  $\overline{w}$  по поперечной координате.

Подставляя (2) в (1), получаем формулу Прандтля:

$$A_T \equiv D_T \equiv a_T \equiv \nu_T = l^2(d\overline{w}/dy). \quad (3)$$

Любое перемешивание приводит к увеличению турбулизации расплава, уменьшает как продольные, так и поперечные градиенты скорости, концентрации, температуры. Мелкомасштабные пульсации (при больших числах Рейнольдса) осуществляют вязкую диссипацию энергии, жидкость разогревается за счет внешних физических полей, время кристаллизации растет по отношению к базовому варианту. Энергия от крупномасштабных пульсаций передается мелкомасштабным и диссипируется ими.

Рассмотрим влияние кривизны поверхности растущих дендритов ( $\alpha$  и  $\beta$  — радиусы кривизны для сферических поверхностей дендритов, причем  $\alpha < \beta$ ) на понижение температуры ликвидуса  $\Delta T_\alpha$  и  $\Delta T_\beta$ . Эти величины можно определить, используя известное выражение [1, 3]:

$$\Delta T = \frac{2\sigma T_0}{\rho L r_k},$$

т.е.

$$\Delta T_\alpha = \frac{2\sigma T_0}{\rho L \alpha}, \quad \Delta T_\beta = \frac{2\sigma T_0}{\rho L \beta}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность расплава при температуре переохлаждения;  $\sigma$  — межфазовая поверхностная энергия;  $L$  — теплота кристаллизации;  $T_0$  — равновесная температура кристаллизации;  $r_k$  — радиус критического размера.

Из (4) следует, что чем меньше радиус кривизны конца дендрита, тем больше понижение температуры его плавления.

Вместе с изменением температур плавления  $T_L^\alpha$  и  $T_L^\beta$  изменяется состав жидкой фазы в околдендритном пространстве:  $c_L^\alpha > c_L^\beta$ , по растворенному компоненту.

Предполагаем наличие равновесия на двух поверхностях раздела между жидкой и твердой фазами. Две дендритные ветви, окруженные жидкой фазой, можно рассматривать как диффузионную пару, которая описывается уравнением [3, с. 183, ф. 5.9]

$$J = -\rho_L D_L \frac{(c_L^\beta - c_L^\alpha)}{d}, \quad (5)$$

где  $J$  — плотность потока диффундирующего вещества;  $D_L$  — коэффициент диффузии в жидкости;  $c_L^\alpha$ ,  $c_L^\beta$  — концентрации растворенного вещества в жидкой фазе;  $d$  — расстояние между ветвями дендрита;  $\rho_L$  — плотность расплава вблизи температуры ликвидус.

Между ветвями инициируется разделительная диффузия: растворенное вещество диффундирует по направлению к меньшей ветви, растворитель — в обратном направлении. Поэтому меньшая ветвь расплавляется или растворяется в соответствии с выражением [3, с. 184, ф. 5.10]

$$J \cong -\rho_L c_L^\alpha (1-k) \frac{dr}{dt}, \quad (6)$$

где  $k = c_S/c_L$  — равновесный коэффициент распределения;  $dr/dt$  — линейная скорость растворения;  $c_S$ ,  $c_L$  — концентрация расплава вблизи температур солидус и ликвидус.

С такой же скоростью наплавляется более крупная ветвь:

$$J \cong +\rho_S c_L^\beta (1-k) \frac{dr}{dt}. \quad (7)$$

Таким образом укрупняются дендритные структуры без модифицирующего воздействия. Уравнение (5) показывает, что чем меньше градиент концентрации и  $D_L$ , тем меньше  $J$  и скорость разделительной диффузии.

При модифицирующем воздействии процессу укрупнения противостоит процесс размножения (дробления) дендритных зерен. Физические воздействия (вибрация, ультразвук, электромагнитное перемешивание, термовременная обработка) приводят к объемной кристаллизации с равноосными

зернами без образования столбчатой структуры. Перемешивание уменьшает температурные и концентрационные градиенты ( $\partial T/\partial x$ ,  $\partial c/\partial x$ ), устраняет перегрев жидкой фазы по отношению к температуре солидус, обламывает дендриты, которые являются хорошими затравками кристаллизации для всего объема расплава. Кроме того, турбулентное перемешивание доставляет порции тепла к межфазовой поверхности, оплавляя дендриты [4]. В настоящее время большим количеством исследований установлено [3–10], что именно перемешивание играет доминирующую роль в уменьшении размера структурных составляющих сплавов при кристаллизации.

Результаты исследований [10–15] влияния электромагнитных воздействий, вибрации, высокотемпературных перегревов на процессы кристаллизации и структурообразование, а также на механические свойства литейных алюминиевых сплавов подтверждают вышеприведенные теоретические положения.

## Заключение

Показано, что процессы кристаллизации и структурообразования литейных сплавов в значительной степени могут определяться технологией обработки физическими воздействиями при плавке и литье. Данные технологии при условии их рационального применения позволяют существенно повысить качество получаемых литых изделий.

*Работа выполнена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014–2016 гг. (задание № 2014/113).*

## Литература

1. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987.
3. Флемингс М. Процессы затвердевания / Пер. с англ. М.: Мир, 1977.
4. Оно А. Затвердевание металлов / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1980.
5. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. М.: Машиностроение, 1965.
6. Ершов Г.С., Бычков Ю.Б. Высокопрочные алюминие-

- вые сплавы на основе вторичного сырья. М.: Металлургия, 1979.
7. *Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н.* и др. Специальные способы литья: Справочник / Под общ. ред. В.А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991.
  8. *Ри Э.Х., Ри Хосен, Химухин С.Н., Калугин М.Е.* Влияние температуры перегрева на распределение компонентов в структуре силумина // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 5. С. 43–45.
  9. *Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В.* О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 5. С. 33–40.
  10. *Морин С.В.* Комплексное исследование вибрационного воздействия на кристаллизацию и свойства отливок из алюминиевых сплавов: Автореф. дис... канд. техн. наук. Новокузнецк: СибГИУ, 2005.
  11. *Deev V.B., Degtyar V.A., Kutsenko A.I.* et al. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37, № 12. С. 991–994.
  12. *Деев В.Б.* Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2012.
  13. *Ри Хосен, Ри Э.Х., Химухин С.Н., Калугин М.Е.* Влияние температурных режимов плавки и легирования сплавов алюминия на свойства отливок // *Литейн. пр-во*. 2010. № 8. С. 7–8.
  14. *Деев В.Б., Селянин И.Ф., Ри Хосен* и др. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов // *Литейщик России*. 2012. № 10. С. 14–17.
  15. *Шабурова Н.А.* Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на расплавы цветных металлов // *Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Математика. Механика. Физика*. 2006. № 7. С. 152–156.

### Уважаемые коллеги!

В рамках реализации проекта К2-2014-012 программы 5-100 вышла тематическая научно-историческая статья «**History of cemented carbides in the Soviet Union**» (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.011>) в высокорейтинговом журнале «*Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*» (импакт-фактор 2,21) об истории создания в СССР производства твердых сплавов. При ее подготовке авторами были использованы многочисленные архивные документы, а также воспоминания Льва Иосифовича Клячко – выдающегося ученого и организатора твердосплавного производства, к сожалению, ушедшего от нас в прошлом году.

В статье отмечена выдающаяся роль научной школы проф. Григория Абрамовича Меерсона – основоположника кафедры редких металлов и твердых сплавов МИСиС (Москва), который еще в 1930 г. запатентовал способ получения субмикрометрового (по сути – наноструктурного, так как с помощью данного метода сегодня получают нанопорошки карбида вольфрама) порошка на основе WC–Co.

Авторы статьи показали всему миру, что авторское свидетельство Г.А. Меерсона более раннее, чем известные патенты Германии и Швеции, считавшиеся доселе пионерскими. Нет, первыми были ученые МИСиС!!!

Особенно важно, что такая патриотическая статья вышла именно сейчас, во время несправедливых санкций против России. Мы уверены, что ее ожидает большая цитируемость.

Спасибо авторам.