

05

## Упрочнение поверхности композиционного материала методом центробежного литья

© Е.Д. Эйдельман<sup>1,2</sup>, М.А. Дурнев<sup>1,¶</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: mad5245mail@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 июня 2017 г.

На примере получения градиентного композитного материала алюминиевого сплава АК12 в смеси с базальтовыми волокнами изучено влияние течения — вращения, возникающего при центробежном литье, на фазовый переход первого рода — кристаллизацию. Показана возможность получения материала с упрочненной поверхностью. Найдено распределение примесей в основном материале при наличии макроскопического движения.

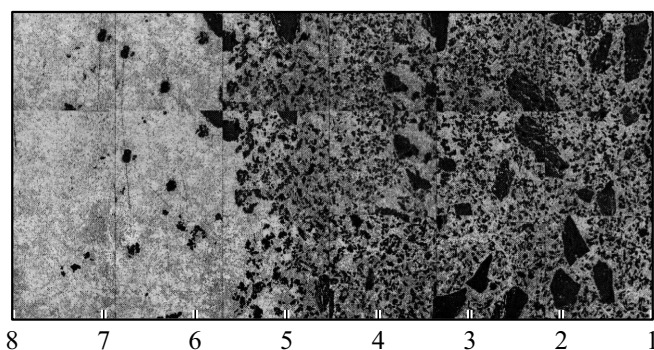
DOI: 10.21883/PJTF.2018.07.45881.16902

Современное состояние исследований в области кристаллизации расплавов отражено в обзорах (см., например, [1]). В этой работе рассматривается заключительная стадия — развитие закритических зародышей [2, §99–102].

Реальная структура твердого состояния формируется именно на закритическом этапе кристаллизации. Этот этап (возможность получения заданного распределения основного и дополнительного материалов при центробежном литье) остается неизученным.

Без учета влияния течения спектр распределения закритических зародышей при фазовом переходе первого рода пар–жидкость вычислен в [3], а с учетом течения, создаваемого центробежными силами и силой вязкого трения, действующими на частицы карбида бора, — в [4].

В настоящей работе рассмотрено влияние течения при фазовом переходе первого рода жидкость–твердое тело, в частности созда-



**Рис. 1.** Типичная микроструктура образца композита АК12 + 5 wt.% базальта (темные области соответствуют базальту). Расстояния даны от наружной стенки образца (в мм).

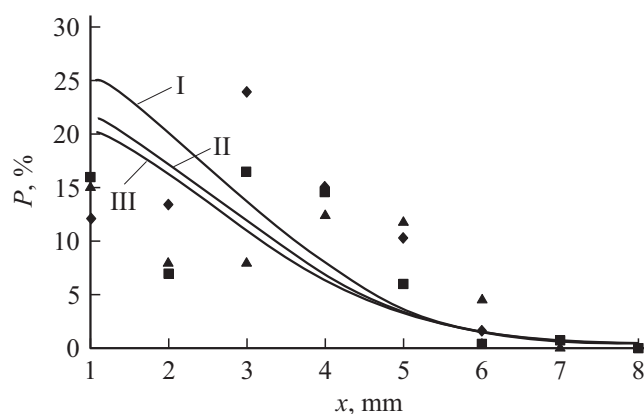
ваемого центробежными силами, силой Архимеда и силой вязкого трения базальтовых частиц, именно на заключительной стадии кристаллизации, стадии коалесценции, когда рост крупных зародышей определяется поглощением мелких.

В качестве основного материала использовался алюминиевый сплав АК12, имеющий в жидком состоянии плотность  $\rho_a = 2.67 \text{ g/cm}^3$ , а в качестве дополнительного — армирующие частицы базальта ( $\rho_b = 2.75 \text{ g/cm}^3$ ). Состав образцов был следующим: АК12 + 5 wt.% базальта (короткие волокна со средним диаметром  $12 \mu\text{m}$ , длина  $\leq 3 \text{ mm}$ ).

Образцы изготавливались с применением технологии центробежного литья. Они имели форму цилиндров с наружным диаметром  $2r_{\text{max}} \approx 92\text{--}94 \text{ mm}$ , внутренним диаметром  $2r_{\text{min}} \sim 60 \text{ mm}$ , высотой  $60\text{--}90 \text{ mm}$ . Цилиндры разрезались на сектора по образующей, и анализировалась их боковая поверхность с наружной и внутренней сторон.

Режим центробежного литья был одинаков для всех образцов: температура нагрева оснастки  $T = 210 \pm 10^\circ\text{C}$ , температура расплава  $T = 750 \pm 10^\circ\text{C}$ , скорость вращения печи  $n = 1200 \text{ rpm}$ , длительность обработки  $3 \text{ min}$ .

Исследованы структура и распределение частиц в градиентных слоях на трех уровнях по высоте отливок. Исследования проводились на микроскопе Leica с использованием программного обеспечения.



**Рис. 2.** Типичное распределение армирующих частиц в образцах композитного материала АК12 + 5 wt.% базальта. I (ромбы), II (квадраты) и III (треугольники) — верх, середина и нижняя часть втулки соответственно. Сплошные линии — функции распределения.

Структура градиентных композиционных материалов показана на рис. 1, пересчет в распределение частиц базальта в градиентных слоях на трех уровнях по высоте отливок — на рис. 2.

Измерена твердость исследованных образцов. Измерения производились при помощи ультразвукового твердомера МЕТ-У1 (ТУ 4271-001-18606393-00). Установлено, что введение базальтовых волокон повышает твердость АК12 в поверхностном слое в 1.2 раза.

Базальтовая частица объемом  $V \approx 108\pi \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$ , погруженная в жидкий металл и вращающаяся вместе с ним с угловой скоростью  $\omega = 40\pi \text{ rad/s}$ , находится под действием силы гидростатического давления, направленной к оси вращения и равной центробежной силе, развиваемой вытесненным объемом расплава. Подъемная сила, действующая на частицу, является равнодействующей элементарных подъемных сил и приложена в центре сил инерции вытесненного объема расплава. Поскольку плотности АК12 и базальтовых частиц практически одинаковы, можно считать, что  $60 < r \leq 92-94 \text{ mm}$  — расстояние от центра инерции частицы до оси вращения — совпадает с расстоянием от центра инерции вытесненного жидкого АК12 до той же

оси. Тогда сила гидростатического давления запишется как

$$F = \omega^2 V r (\rho_b - \rho_a). \quad (1)$$

В соответствии с зависимостью (1) основная часть базальтовых частиц, находящихся во вращающемся расплаве, будет стремиться к перемещению в сторону внешних стенок образца — стенок изложницы. Превышение содержания базальтовых частиц у дна ( $\rho_b \geq \rho_a$ ) заметно только в области, на которую влияние стенки формы не распространяется. Можно предсказать, что при использовании армирующих частиц, имеющих плотность меньше, чем плотность основного металла, картина будет противоположной, и армирующие частицы будут собираться сверху.

Самой большой силой, действующей на базальтовую частицу и образующуюся вокруг нее область твердой фазы размером  $R$ , является сила вязкого трения  $3\pi\eta Rv$ , если базальтовая частица движется в расплаве со скоростью  $v$ . Если базальтовая частица свернута так, что твердую фазу вокруг нее можно считать шаром, имеющим плотность  $\rho \approx \rho_a \approx \rho_b$ , то сила будет в 2 раза больше. Коэффициент вязкости в жидком металле АК12  $\eta \approx 0.32 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

Легко найти, что начальная скорость  $\omega r$  затухает со временем  $t$  по закону

$$v = \omega r \exp\left(-\frac{9\eta}{4\rho R^2} t\right). \quad (2)$$

Именно скорость (2) заменяет среднеквадратичную скорость движения малых зародышей, которые поглощаются — соединяются с большими — при отсутствии течения. За время, меньшее, чем характерное время затухания  $\sim 30 \text{ ms}$ , именно эта скорость определяет вероятность поглощения большим ( $R \approx 3 \text{ mm}$ ) зародышем малых.

В [3] приведена функция распределения зародышей по размерам в условиях отсутствия движения, не учитывающая распределение по пространству [5]:

$$G \approx \frac{1}{\sqrt{Dt}} \exp\left[-\frac{(d - d_0)^2}{4Dt}\right]. \quad (3)$$

Степень заkritичности определяет отклонение размера зародыша  $d$  от критического размера  $d_0$ . При наличии движения [4] вместо коэффици-

ента диффузии нужно подставлять в (3) величину

$$D = C\omega rR \exp\left(-\frac{9\eta}{4\rho_a R^2} t\right), \quad (4)$$

где  $C$  — постоянная порядка единицы.

В условиях коалесценции, которые имеют место перед кристаллизацией, размер  $d \gg d_0$  и определяется диаметром базальтового волокна. Именно сечения базальтовых волокон и видны на рис. 1 (темные области). Можно считать, что базальтовые волокна являются зародышами. При сильном вращении центробежные силы способствуют росту преимущественно в направлении от оси вращения к изложнице. Отсюда следует, что размер зародыша  $d$  становится равным расстоянию от первоначального положения зародыша до внешней границы расплава.

Для получения из выражения (3) распределения  $P$  базальтовых волокон — армирующей примеси в образце — в него нужно подставить время фазового перехода  $t_f$ , которое гораздо меньше характерного времени затухания  $4\rho_a R^2/(9\eta)$ , и величину  $D$ , которая определяется течением в соответствии с формулой (4).

Запишем распределение (содержание) закритических зародышей — базальтовых волокон — перед фазовым переходом в зависимости от расстояния  $x$ , отсчитанного от внешней стенки образца или, что то же самое, от изложницы. Имеем

$$P(x) = A \exp\left(-\frac{x^2}{4\sigma^2}\right). \quad (5)$$

Здесь  $A$  — амплитуда, которая имеет вид

$$A = \frac{B}{\sqrt{\omega r R t_f}} \exp\left(-\frac{9\eta}{8\rho R^2} t_f\right). \quad (6)$$

Эта величина включает параметр  $B$ , зависящий от сил плавучести.

Среднеквадратичное отклонение в распределении

$$\sigma = \sqrt{\omega r R t_f} \exp\left(-\frac{9\eta}{8\rho R^2} t_f\right)$$

можно считать не зависящим от архимедовой силы. Величина  $C$  из (4) включена в величину  $t_f$ , определенную наиболее грубо.

Расчетные кривые распределений зародышей — базальтовых волокон — по  $x$ , отсчитанные от наружной стенки при отвердевании расплава, представлены на рис. 2 сплошными линиями.

Для определения параметров кристаллизации — фазового перехода первого рода — были обработаны экспериментальные данные. Сплошные линии на рис. 2 построены по формулам, имеющим вид (5), при условии минимума среднеквадратичного отклонения от экспериментальных значений. Основная часть погрешности обусловлена тем, что армирующие базальтовые частицы имеют форму нитей-цилиндров, причем размер нитей того же порядка, что и размер области кристаллизации.

Кривые имеют следующие параметры: линия I, соответствующая верхней части образца, характеризуется амплитудой 27.6% и величиной  $4\sigma^2$ , входящей в знаменатель показателя экспоненты,  $13.0 \text{ mm}^2$ ; линия II, отвечающая средней части, имеет параметры 23.5% и  $13.2 \text{ mm}^2$ ; линия III (для нижней части) — параметры 22.5% и  $13.1 \text{ mm}^2$ . Как видно из рис. 1, армирующие частицы распределены между частями II (середина) и III (низ) образца равномерно, поэтому соответствующие линии на рис. 2 слабо различаются между собой. Для упрощения эти две линии будут рассматриваться как одна с параметрами  $A = 24\%$  и  $\sigma = 1.8 \text{ mm}$ .

Распределения, представленные на рис. 2, наилучшим образом совпадают с экспериментальными результатами, полученными в результате обработки непосредственных наблюдений по рис. 1, если размер зародыша достигает размера области кристаллизации, равного примерно  $R \approx 6 \text{ mm}$  (рис. 1), за время в 1–2 ms. Это и есть оценка времени фазового перехода первого рода — кристаллизации в расплаве композита АК12 с армирующими базальтовыми частицами-нитеями. Теперь из (6) можно легко определить параметр  $B$ , зависящий от сил плавучести:  $B = 2.7 \text{ mm}$ .

Измерения твердости образцов показали, что методом центробежного литья можно изготавливать градиентные композиционные материалы с твердым поверхностным слоем, обладающим повышенной износостойкостью.

Впервые найдено конкретное распределение закритических зародышей при учете наличия макроскопического движения — вращения. Это позволяет надеяться на то, что движение расплава будет инструментом конструирования материалов с новыми свойствами.

Авторы признательны М.Л. Хейфецу, который привлек их внимание к исследованию центробежного литья, а также благодарят Ю.С. Алексееву за помощь.

## Список литературы

- [1] Кукушкин С.А., Осипов А.В. // Кинетика и катализ. 2008. Т. 49. № 1. С. 85–98.
- [2] Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Физматлит, 2004. 536 с.
- [3] Курасов В.Г. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 7. С. 89–95.
- [4] Durnev M.A., Eidelman E.D. // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2017. V. 8. N 3. P. 360–364.
- [5] Кукушкин С.А., Григорьев Д.А., Индейцев Д.А., Потапов О.В., Фокин В.М. // Физика и химия стекла. 2001. Т. 27. № 3. С. 377–389.