

6. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин и др. – Киев: Наук. думка, 2006 – 246 с.
7. Bellot J-P., Floris E., Jardy A., Ablitzer D. Numerical Simulation of the E.B.C.H.R. Process // Electron Beam Melting and Refining State of Art. – Englewood, 1993. – P. 139-153.

Поступила 07.09.2012

УДК 669.715:621.74.043:620.178.15

**А. Г. Борисов, Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец,
А. И. Семенченко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРА СТРУКТУРЫ СЛИТКОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧАЕМОГО В ТОНКОСТЕННОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОКИЛЕ

Исследована взаимосвязь между начальными условиями заливки алюминиевого сплава и типом его структурной морфологии с помощью прямого термического метода, математического моделирования и вычислительного эксперимента. Получен «график морфологий», позволяющий прогнозировать результирующую структуру отливки.

Ключевые слова: прямой термический метод, морфология, математическое моделирование, отливка, скорость охлаждения.

Досліджено зв'язок між початковими умовами заливання алюмінієвого сплаву та типом його структурної морфології за допомогою прямого термічного методу, математичного моделювання та обчислювального експерименту. Одержано «графік морфологій», що дозволяє прогнозувати результуючу структуру виливка.

Ключові слова: прямиий термічний метод, морфологія, математичне моделювання, виливка, швидкість охолодження.

Relationship between conditions of production of aluminum casting and structure of its morphology was studied using direct thermal method, mathematic modeling and calculation experiment. "Plot of morphologies" was constructed to predict resulting structure of casting.

Keywords: direct thermal method, morphology, mathematical modeling, casting, the cooling rate.

Отливки с недендритной розеточной структурой можно получить при использовании процесса реольтя [1], который предусматривает заливку металла в жидкотвердом состоянии и основан на контролируемом зарождении и росте кристаллов во время частичной кристаллизации.

На практике наиболее эффективно, с экономической точки зрения, проявил себя прямой термический метод реольтя [2]. Среди его преимуществ можно выделить: отсутствие дополнительного оборудования, а также необходимости в применении модификаторов и др.

В работе [3] было проведено исследование структуры отливок в широком интервале значений температуры заливки, температуры кокиля и толщины стенки кокиля, однако, несмотря на большое количество экспериментального материала, установить четкую количественную связь между морфологией и параметрами экспериментов из-за многофакторности процесса так и не удалось.

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбрали цилиндрическую отливку сплава АК7 диаметром 20 мм, получаемую в стальном кокиле толщиной от 2 до 10 мм. Процесс теплопереноса исследовали с использованием метода математического моделирования.

Перенос тепла описывали уравнением Фурье [4-6]. При постановке задачи были сделаны следующие предположения:

- на границе между кокилем и отливкой имеет место идеальный контакт;
- по всей поверхности формы учитывались идентичные условия теплообмена, что обеспечивало направленный характер охлаждения цилиндрической отливки;
- в начальный момент времени заданы температуры кокиля и жидкого металла;
- при проведении вычислительного эксперимента считали, что выравнивание температур расплава и кокиля происходит при отсутствии выделения скрытого тепла кристаллизации.

Для решения сформулированной задачи использовали численный метод конечных разностей.

После заливки слабо перегретого расплава в тонкостенный металлический кокиль происходят охлаждение расплава и нагрев кокиля. Через определенный момент времени их температуры выравниваются и начинается постепенное охлаждение всей системы на воздухе при малой скорости охлаждения. Данный баланс температур (между расплавом и стальным кокилем) может быть охарактеризован температурой T^* (температура, при которой достигается «равновесие») и временем τ^* (время от момента заливки до достижения T^*). Таким образом, для каждого эксперимента нашли взаимоднозначное соответствие между температурой заливки расплава ($T_{\text{зал}}$), начальной температурой кокиля ($T_{\text{кок}}$) и толщиной его стенки h с величинами T^* и τ^* . Затем благодаря полученным значениям T^* и τ^* , исходя из экспериментальных данных, определили тип структурной морфологии для получения «графика морфологий» в плоскости (T^*, τ^*).

Принимая во внимание наличие теплоотвода со стороны внешней поверхности кокиля, в качестве «баланса» принимали ситуацию, при которой между расплавом и кокилем достигалась некоторая малая (отличная от нуля) разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$ (T_1 определялась в точке половины радиуса полости кокиля, а T_2 – в точке половины толщины стенки кокиля). При этом T^* определяли как среднеарифметическое значение между T_1 и T_2 в момент времени достижения заданного значения ΔT (τ^*). На основании проведенных оценок значение ΔT было принято равным 5 °С.

В работе [3] был получен объемный материал по зависимости характера структуры от условий заливки, анализ которого показал существование трех областей параметров, в которых реализуются дендритная, недендритная, а также некая переходная области, где наблюдаются как дендритные, так и недендритные структуры. В настоящей работе из общего массива данных были отобраны 5 экспериментов, которые представляют все три области (табл. 1). Характеристики материалов, использованные при проведении вычислительных экспериментов, приведены в табл. 2.

На рис. 1 показаны температурные кривые при охлаждении образца с начальной температурой расплава 620 (рис. 1, а) и 920 °С (рис. 1, б) и температурой кокиля 20 °С (при изменении толщины кокиля). Сплошная кривая соответствует изменению температур на расстоянии $1/2$ радиуса отливки; пунктирная – на расстоянии $1/2$ толщины кокиля.

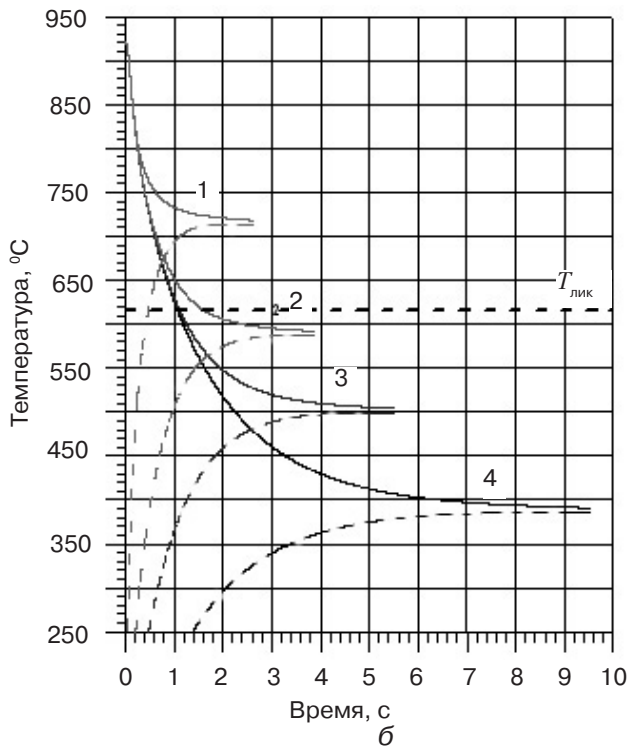
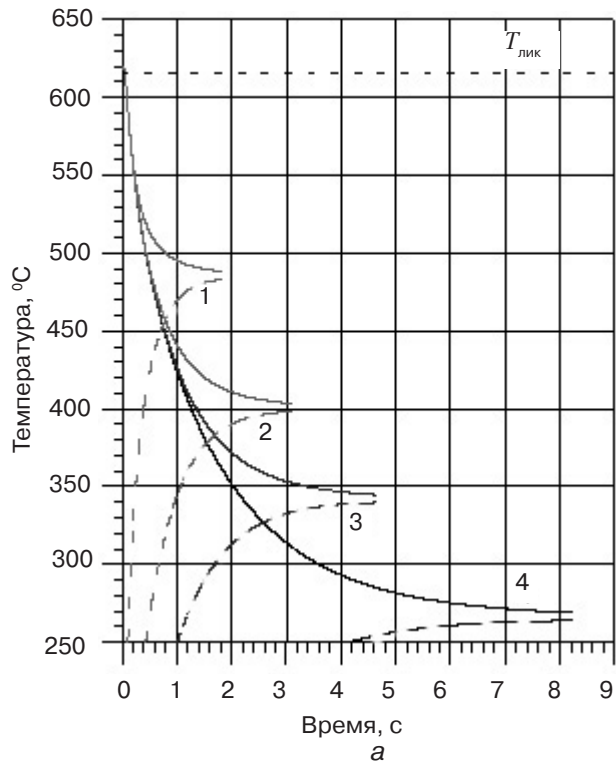


Рис. 1. Изменение температур на расстоянии $\frac{1}{2}$ толщины отливки (-) и на расстоянии $\frac{1}{2}$ толщины кокиля (- -) при начальной температуре жидкого металла 620 (а) и 920 °С (б); толщина стенки кокиля, мм: 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 10; начальная температура кокиля – 20 °С

Таблица 1. Морфология структуры отливок в зависимости от условий заливки

| Номер эксперимента | Температура заливки, °С | Температура кокиля, °С | Толщина стенки кокиля, мм | | | |
|--------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|---|---|----|
| | | | 2 | 4 | 6 | 10 |
| 1 | 620 | 20 | н | н | н | н |
| 2 | 620 | 220 | н | н | н | н |
| 3 | 630 | 580 | н | Д | Д | Д |
| 4 | 660 | 580 | Д | Д | Д | Д |
| 5 | 920 | 20 | Д | Д | Д | Д |

Примечание: Д – дендритная структура; н – недендритная структура

Таблица 2. Теплофизические характеристики материалов [7]

| Параметр | Расплав (Al-7 %мас. Si) | Кокиль (сталь 45) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Плотность, кг /м ³ | 2400 | 7770 |
| Теплоемкость, Дж/(кг · °С) | 1150 | 500 |
| Теплопроводность, Вт/(м · °С) | 90 | 47 |

При небольшом перегреве жидкого металла над температурой ликвидуса (рис. 1, а) наблюдается снятие температуры перегрева за 0,05 с, дальнейшее охлаждение образца происходит в твердом состоянии с образованием недендритной структуры.

Увеличение температуры перегрева жидкого металла (до 630-660 °С) приводит к снижению локальных скоростей охлаждения в начальные моменты времени. При этом наблюдается образование недендритной структуры при выравнивании температур в области жидкого состояния. При увеличении толщины стенки кокиля до 4 мм и более происходит выравнивание исследуемых температур в твердой области, что обуславливает, исходя из металлографических исследований (табл. 1), дендритное строение.

Дальнейший рост температуры перегрева до 920 °С (рис. 1, б) приводит к росту времени снятия перегрева, что обуславливает увеличение времени пребывания образца в жидком состоянии (в отличии от предыдущего варианта) и образованию дендритной структуры.

Обобщая результаты вычислительных экспериментов в зависимости от условий заливки (табл. 1), получили так называемый «график морфологий» соответствующих значений T^* и τ^* (рис. 2).

Как видно из рисунка, вся плоскость (T^* , τ^*) может быть разбита на две полуплоскости, в одной из которых лежат все точки, которым соответствуют дендритные структуры, а в другой – все недендритные. Разделяющую их линию можно описать выражением

$$T^* = -32,517 \cdot \tau^* + 665,1. \quad (5)$$

Из вышеизложенного следует, что в том случае, когда порождаемое условиями заливки значение T^* лежит выше линии (5), следует ожидать дендритную структуру формирующейся отливки, в противном случае, когда T^* будет находиться ниже линии (5), сформируется недендритная структура.

Итак:

– при небольшом перегреве жидкого металла (до 5-10 °С) недендритная структура образуется при снятии перегрева за доли секунды и сопровождается большими

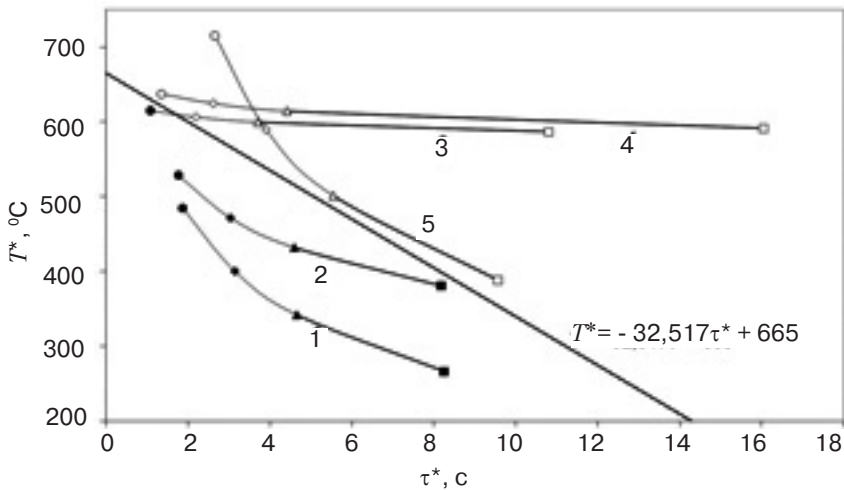


Рис. 2. Связь экспериментально полученных морфологий с рассчитанными значениями T^* и τ^* ; номера кривых 1-5 соответствуют условиям экспериментов из табл. 1; толщина стенки кокиля, мм: \circ – 2; \diamond – 4; Δ – 6; \square – 10; полые символы соответствуют дендритной структуре, зачерненные – недендритной

скоростями охлаждения. Выравнивание температур до T^* происходит в области температур, соответствующих твердому состоянию;

– увеличение перегрева жидкого металла выше $15\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к росту времени снятия перегрева, увеличению времени пребывания образца в жидком состоянии и в дальнейшем – к образованию дендритной структуры.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования характера структуры отливки, формирующейся при заливке прямым термическим методом реолия.



Список литературы

1. Мельников Н. А. Новые процессы литья под давлением востребованы производством // Литейн. пр-во. – 2003. – № 12. – С. 20-21.
2. Direct Thermal Method: New Process for Development of Globular Alloy Microstructure / D. J. Brown, M. J. Hussey, A. J. Carr, D. Brabazon // International Journal of Cast Metals Research. – 2003. – Vol. 16. – P. 418-426.
3. Борисов А. Г. Розеткова та дендритна морфологія первинної фази при литті алюмінієвого сплаву в металевий кокиль // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 4. – С. 13-18.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: ГИИТЛ, 1952. – 587 с.
5. Кошляков Н. С., Гликер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высш. шк., 1970. – 712 с.
6. Оценка оптимальных параметров управления слитков различной геометрии / Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, В. Н. Городчиков, И. Н. Тарасевич // Процессы литья. – 2009. – № 6. – С. 71-74.
7. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. – М.: Машиностроение, 1976. – Ч. 1. – 328 с.

Поступила 28.09.2012