



УДК 548.52

Поступила 31.10.2013

Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси,  
А. Г. БОРИСОВ, А. И. СЕМЕНЧЕНКО, ФТИМС НАН Украины,  
Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, ИТМ НАН Беларуси

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПРЯМОГО ТЕРМИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НЕДЕНДРИТНОЙ МОРФОЛОГИИ

*Влияние составляющих прямого термического метода было изучено по отдельности. Было доказано, что главной причиной для образования недендритной морфологии является присутствие потока расплава. Роль термического баланса сводится к обеспечению движения расплава ниже температуры ликвидус. Поток расплава обеспечивает дополнительное ветвление вдоль периметра кристалла.*

*Components of direct thermal method were studied separately. It was found that main cause for non dendrite pattern formation is presence of melt flow. The role of thermal balance reduced to provision of conditions to motion of the melt under liquidus temperature. Incoming flow resulted in splitting of crystal interface.*

**Введение.** В последнее десятилетие наблюдается устойчивый рост интереса производителей отливок к технологиям литья частично закристаллизованного металла, в частности к методам реолитья [1]. Одним из наиболее перспективных методов в этом направлении является прямой термический метод (ПТМ), преимущество которого состоит в отсутствии необходимости сложного и дорогого оборудования [2]. Вследствие этого такой подход особо актуален для малого и среднего производства [3].

Сущность ПТМ заключается в установлении равновесия температур сплава и формы после заливки при некоторой температуре ниже ликвидуса, которая достигается за счет теплообмена между металлом и кокилем. Предполагается, что процесс выравнивания температур происходит очень быстро, а затем из-за того, что естественный теплоотвод от формы в атмосферу незначительный, устанавливается псевдоизотермический режим, в течение которого общая температура понижается медленно. Формирование недендритной структуры в рамках такой схемы поясняется следующим образом: быстрое охлаждение расплава за счет поглощения теплоты формой приводит к множественному зарождению, а на псевдоизотермическом этапе имеет место медленный рост и глобуляризация ростовой структуры [4].

В то же время представляется очевидным, что, помимо чисто тепловой задачи, существенное влияние на происходящие процессы будет оказывать и

порожденное струей при заливке движение расплава.

Исходя из сказанного выше, целью настоящей работы было изучение роли «подликвидусного» теплового баланса (установления равновесия температур сплава и формы после заливки при температуре ниже ликвидуса) и движения расплава «по отдельности». Речь идет о двух «противоположных» ситуациях – в первом случае выравнивание температур и затухание заливочных потоков происходило существенно выше ликвидуса, т. е. «подликвидусный» баланс отсутствовал, а успокоившийся к моменту достижения ликвидуса расплав перемешивался принудительно («поток без баланса»). Во втором случае «подликвидусный» баланс имел место, но при этом форма заполнялась плавным погружением, т. е. «баланс без потока». Также для выявления роли потока было проведено компьютерное моделирование методом фазового поля.

**Методика экспериментов.** Были проведены две серии экспериментов. В первой серии на сплаве АК7ч с содержанием 6,4–6,5% кремния, 0,9–1,1% железа, 0,2% магния и меди и меньше 0,2% марганца. Температура ликвидус исследованного сплава составляла 616 °С, температура солидус – 577 °С. Расплав выдерживали в графитошамотном тигле при температуре 750 °С, после чего ковшем заливали два образца в цилиндрической стальной кокиль комнатной температуры высотой 80 мм, внутренним диаметром 45 мм и тол-

щиной стенки 2 мм. После заполнения кокиля расплавом в него опускали термопару для контроля и записи температуры. Использовали термопару марки ХА в двухканальной сололке диаметром 3 мм. В одном из образцов в процессе охлаждения этой же термопарой осуществляли перемешивание расплава в процессе охлаждения движением по окружности формы со скоростью 1–2 оборота в секунду, при этом запись температуры расплава продолжалась. Аналогично отливали два образца (без перемешивания и с перемешиванием) при температуре заливки 620 °С. Условия экспериментов этой серии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер эксперимента	Температура заливки, °С	Температура кокиля, °С	Перемешивание
11–260	750	20	Без перемешивания
12–263	620	20	Без перемешивания
13–272	750	20	Перемешивание от 625 °С
14–277	620	20	Перемешивание от 620 °С

Во второй серии экспериментов использовали сплав АК5М2 (температура ликвидус 626 °С), которым заполняли цилиндрический стальной кокиль комнатной температуры высотой 60 мм, внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм. Заполнение кокиля осуществляли двумя различными способами: в первом случае проводили обычную заливку из ковша, во втором случае кокиль помещали в специальное устройство (рис. 1) и заполнение осуществляли путем плавного погру-

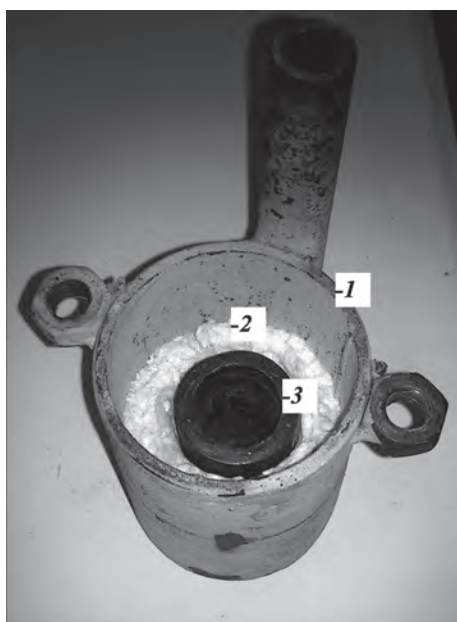


Рис. 1. Устройство для заполнения кокиля погружением: 1 – стальной кожух; 2 – термовата; 3 – стальной рабочий кокиль без дна

жения кокиля в расплав. Условия экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температура заливки, °С	Заполнение заливкой, номер эксперимента	Заполнение погружением, номер эксперимента
750	21–729	27–731
705	22–717	28–719
665	23–714	29–716
645	24–710	30–706
635	25–701	31–702
630	26–699	33–700

Полученные образцы разрезали по вертикальной оси, из средней части полуцилиндра вырезали полудиск, одну из поверхностей которого полировали, травили и исследовали металлографически.

**Результаты и обсуждение.** Для оценки возможности реализации «доликвидусного» и «подликвидусного» балансов были проведены расчеты температур [4], при которых (в зависимости от условий заливки) наступает тепловой баланс между расплавом и формой. Расчеты вначале проводили для самой высокой температуры заливки, поскольку, как очевидно, снижение температуры заливки приводит к снижению температуры баланса, т. е. если для высокой температуры баланс был «подликвидусным», то для всех более низких температур заливки он тем более был таковым.

Для первой серии экспериментов (кокиль большого объема с тонкой стенкой) при заливке 750 °С температура баланса составляла 635 °С («надликвидусные» условия), при заливке 620 °С–590 °С («подликвидусные» условия).

Для второй серии экспериментов (кокиль малого объема с толстой стенкой) уже для самой высокой температуры заливки 750 °С температура баланса была 390 °С, таким образом, все эксперименты этой серии проводили в условиях «подликвидусного» баланса.

На рис. 2 показана морфология образцов, полученных в экспериментах серии 1. Как видно из рисунка, при заливке без принудительного перемешивания снижение температуры заливки с 750 °С (рис. 2, а) до 620 °С (рис. 2, в) приводит к известному [5] переходу от дендритной к недендритной структуре. Интересно отметить, что практически такая же недендритная структура формируется в случае принудительного перемешивания образца, залитого при 750 °С (рис. 2, б). Исходя из того фундаментального факта, что одинаковость морфологий обозначает одинаковость условий роста, возникает вопрос – каким образом одинаковые условия роста могли создаваться при высокотемпе-

ратурной заливке с принудительным перемешиванием и низкотемпературной заливке без принудительного перемешивания?

Здесь важно отметить, что ключевым моментом является одинаковость условий в процессе роста, т. е. не в какой-то произвольный начальный момент времени, а к моменту достижения температуры ликвидус. Очевидно, что с «тепловой» точки зрения в этот момент условия существенно различаются. Если при заливке 750 °С теплообмен между расплавом и формой уже завершился и охлаждение системы идет за счет теплоотвода во внешнюю среду, то при заливке 620 °С при достижении  $T_L = 616$  °С поглощение тепла расплава формой еще продолжается.

С точки зрения движения расплава картина получается следующая: для случая заливки при 750 °С длительность процесса заливки (и соответственно перемешивания расплава в форме струей расплава) составляла 2–3 с. Некоторое остаточное движение расплава в форме наблюдалось еще 4–5 с, таким образом, общее время «заливочного» перемешивания составляло порядка 8 с. По температурной кривой было определено, что от момента начала эксперимента до достижения  $T_L$  прошло 14 с. Из

сказанного выше следует, что «заливочное» движение расплава затихает до того, как начинается процесс кристаллизации, и в таких условиях результирующая структура является дендритной (рис. 2, а). В то же время, если в такой эксперимент ввести принудительное перемешивание (которое начиналось при 625 °С), система подходила к ликвидусу с движением расплава, при этом структура получается недендритной (рис. 2, б).

Поскольку, как очевидно, для случая заливки при 620 °С перемешивание расплава при достижении  $T_L = 616$  °С продолжается, представляется возможным отметить, что «одинаковость условий» роста при высокотемпературной заливке с принудительным перемешиванием и низкотемпературной заливке без принудительного перемешивания заключается в движении расплава в момент роста кристаллов. Таким образом, роль «подликвидусного баланса» сводится к тому, что низкая температура заливки приводит к сохранению движения расплава к моменту достижения  $T_L$ .

В заключение рассмотрения этой группы экспериментов также отметим, что совместное действие перемешивания заливочной струей и принудительного перемешивания приводит к некоторо-

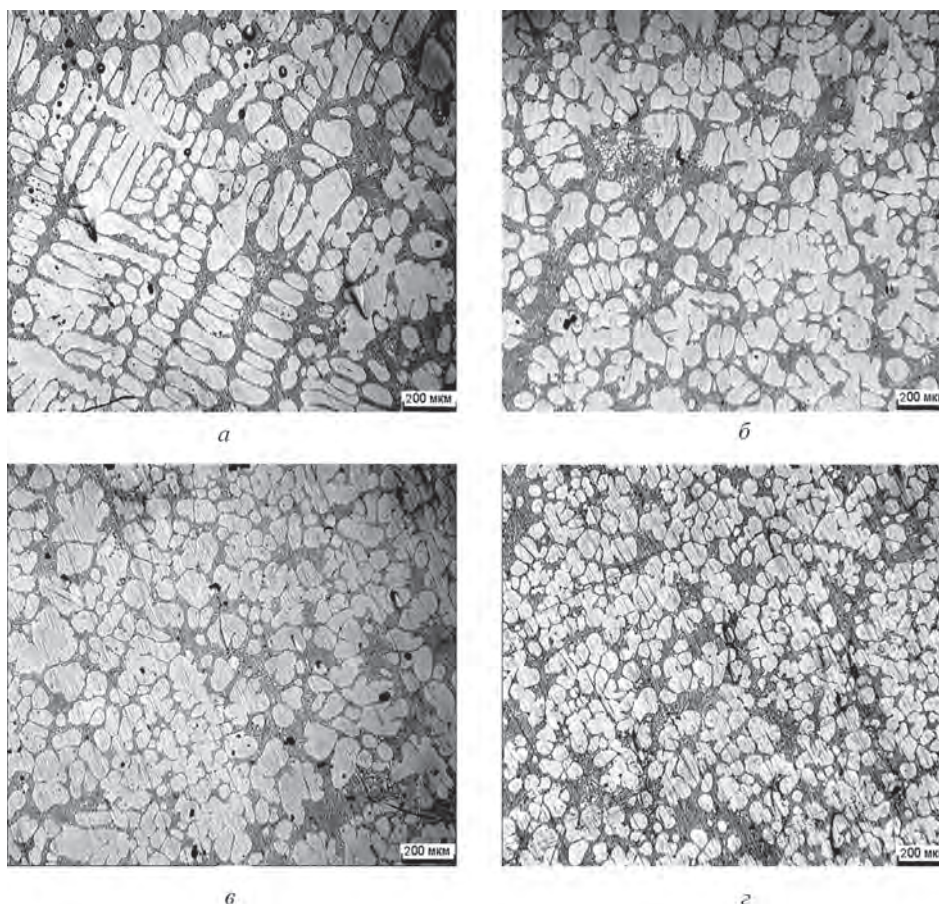


Рис. 2. Микроструктура образцов: а –  $T_{\text{зал}} = 750$  °С без перемешивания; б –  $T_{\text{зал}} = 750$  °С с перемешиванием; в –  $T_{\text{зал}} = 620$  °С без перемешивания; г –  $T_{\text{зал}} = 620$  °С с перемешиванием

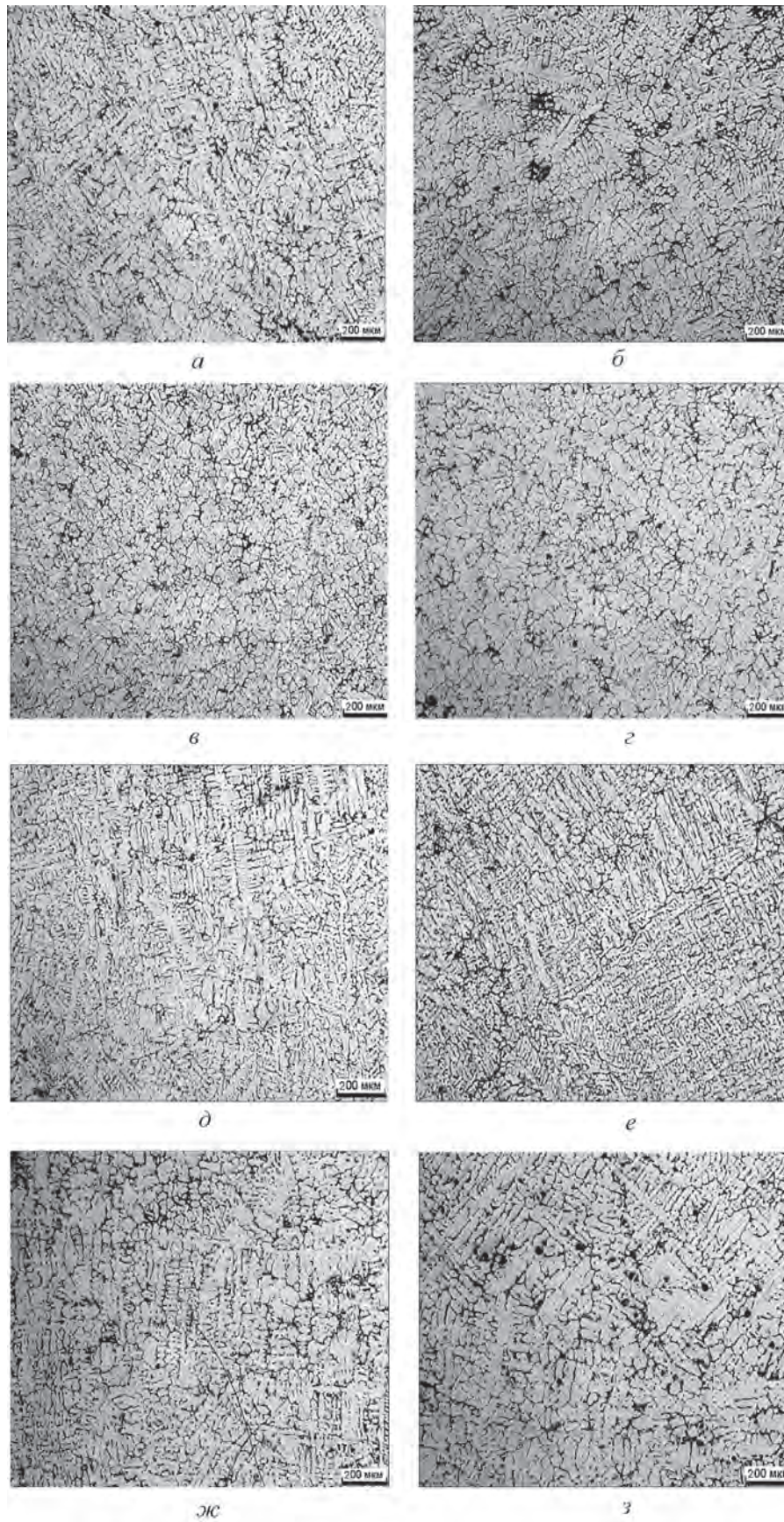


Рис. 3. *a-г* – заполнение заливкой; *д-з* – заполнение погружением. Температура расплава: *a, д* – 705 °С; *б, е* – 665; *в, ж* – 635; *г, з* – 630 °С



Рис. 4. Результаты моделирования: *a* – начальная стадия формирования дендрита без смывания примеси; *б* – ветвление кристалла при наличии смывания примеси

му измельчению структуры (рис. 2, *з*) по сравнению с их отдельным действием (рис. 2, *в, б*).

Как отмечалось ранее, во второй серии экспериментов ставилась задача создания условий «подликвидусного баланса», но без заливки (перемешивания заливочной струей). Эта задача решалась за счет заполнения кокиля путем плавного погружения в расплав. Параллельно для контроля этот же кокиль заливали традиционным образом. Как видно из рис. 3, *а–г*, в этом случае (аналогично первой серии экспериментов (см. рис. 2, *а, в*) уменьшение температуры заливки приводит к известному [5] переходу от дендритной к недендритной структуре. В то же время при заполнении того же кокиля путем его погружения в расплав для тех же температур расплава (включая «подликвидусный баланс») во всех случаях имела место четко различимая дендритная структура (рис. 3, *д–з*). Таким образом, аналогично первой серии экспериментов можно сделать вывод о ключевой роли потока и необязательности «подликвидусного баланса» в формировании розеточной морфологии.

Для оценки влияния потока на морфологию растущего кристалла также было выполнено компьютерное моделирование с использованием модели фазового поля (детально методика опи-

сана в [6]). Расчеты выполняли для сплава Al – 7 мас.% Si. Влияние потока имитировалось путем искусственного удаления (смывания) примеси, накапливающейся перед растущим кристаллом. На рис. 4 показаны результаты численного эксперимента.

Как видно из рисунка, воздействие потока приводит к дополнительному ветвлению кристалла и формированию расщепляющейся морфологии, характерной для недендритного роста.

### Выводы

1. Основной причиной формирования недендритной структуры в рамках прямого термического метода реолитья является движение расплава в момент роста кристаллов.

2. Недендритная морфология формируется независимо от причин природы потока в процессе кристаллизации.

3. Воздействие потока на межфазную поверхность приводит к переходу от регулярной дендритной морфологии к хаотически ветвящейся.

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект Ф54/145–1) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т13К-017).

### Литература

1. Sim J. G., Choi B. H., Yang Y. S., Kim J. M., Hong C. P. Development of a nucleation accelerated semisolid slurry making method and its application to rheo-diecasting of ADC10 alloy // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. N 8. P. 1165–1174.
2. Brown D. J., Hussey M. J., Carr A. J., Brabazon D. Direct thermal method: new process for development of globular alloy microstructure // *International journal of cast metals research*. 2003. Vol. 16. N 4. P. 418–426.
3. Борисов А. Г. Методы реолитья, перспективные для малого производства изделий из алюминиевых сплавов // *Процессы литья*. 2013. № 4. С. 33–46.
4. Carr A. J., Brown D. J., Hussey M. J., Lumsden N., Scalan M. Modelling and experimental development of the direct thermal method of rheocasting // *International journal of cast metals research*. 2007. Vol. 20. N 6. P. 325–332.
5. 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.
6. Марукович Е. И., Брановицкий А. М., Лебединский Ю. А. Моделирование роста дендритов при кристаллизации с малым переохлаждением силуминовых сплавов на основе метода фазового поля // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2009. № 1. С. 4–13.