

**СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ**

УДК 538.911

**МЕХАНИЗМ ОТБОРА ОДНОГО ЗЕРНА В КАНАЛЕ КРИСТАЛЛООТБОРНИКА
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК
ИЗ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

© 2019 г. Е. С. Иванина^а, В. П. Монастырский^{а, *}, М. Ю. Ершов^б

^аАО НПП газотурбостроения “Салют”, пр. Буденного, 16, Москва, 105118 Россия

^б“Московский политехнический университет”, ул. Б. Семеновская, 38, Москва, 107023 Россия

*e-mail: saprlp@salut.ru

Поступила в редакцию 14.02.2019 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 10.06.2019 г.

С помощью численного моделирования в модуле SAFE коммерческой программы ProCast было проведено исследование конкурентного роста зерен в затравочном узле для получения монокристаллической отливки из никелевого жаропрочного сплава в процессе направленной кристаллизации по методу Бриджмена. На примере плоского кристаллоотборника рассмотрен механизм отбора одного зерна из нескольких зерен, имеющих близкую аксиальную и произвольную азимутальную ориентацию. Было установлено, что существенную роль в отборе зерен играет исходное положение зерна во входном сечении кристаллоотборника. Начальное ростовое преимущество получают зерна, оказавшиеся в той зоне фронта кристаллизации, из которой открывается путь для беспрепятственного роста вдоль канала кристаллоотборника. Положение этой зоны меняется по мере продвижения фронта в криволинейном канале кристаллоотборника. Основным инструментом отбора одного зерна из множества зерен с близкой ориентацией является изменение положения зоны, благоприятной для беспрепятственного роста. Непрерывная циклическая смена зоны благоприятного роста, происходящая при росте зерен в кристаллоотборнике-геликоиде, приводит к быстрому отбору одного зерна. В плоском зигзагообразном кристаллоотборнике смена зоны благоприятного роста происходит ограниченное число раз, поэтому он менее эффективен. Описанный механизм отбора зерен применим к кристаллоотборникам с углом между осью канала и вертикальной осью Z не более 45° , т.е. в том случае, когда первичные оси дендритов формируются по кристаллографическому направлению [001].

Ключевые слова: направленная кристаллизация, монокристаллы жаропрочных сплавов, кристаллоотборник, конкурентный рост, моделирование

DOI: 10.1134/S0015323019110068

ВВЕДЕНИЕ

Существует два способа получения монокристаллических лопаток газовых турбин – направленная кристаллизация с охлаждением формы в жидкометаллическом холодильнике (метод ЛМС) и направленная кристаллизация на водоохлаждаемом кристаллизаторе (метод Бриджмена).

Начальным этапом формирования монокристаллической отливки является зарождение и отбор зерна с требуемой кристаллографической ориентацией.

При получении монокристаллической отливки по методу ЛМС обычно используют затравочный узел, состоящий из затравки и спирального кристаллоотборника (геликоида) [1]. Предварительно изготовленная затравка устанавливается в затравочной узел таким образом, чтобы обеспечить

получение монокристалла с заданной аксиальной и азимутальной ориентацией. Затравки, являющиеся монокристаллами технического качества, могут состоять из нескольких зерен с близкой ориентацией, отличающейся на несколько градусов, т.е. иметь малоугловые границы. Принято считать, что геликоид позволяет отобрать одно из зерен, присутствующих в затравке и сформировать на его основе монокристаллическую отливку с более качественной структурой.

При получении монокристаллической отливки по методу Бриджмена затравочный узел состоит из стартовой зоны и геликоида. В стартовой зоне расплав никелевого жаропрочного сплава непосредственно контактирует с холодным кристаллизатором, что приводит к образованию у поверхности кристаллизатора большого количества мелких зерен произвольной ориентации. Направленная

кристаллизация в стартовой зоне происходит в условиях интенсивного теплоотвода к кристаллизатору. Возникающий при этом высокий градиент температуры в двухфазной зоне отливки приводит к интенсивному росту образовавшихся зерен вдоль оси отливки, т.е. к образованию столбчатых зерен. Направленный теплоотвод создает условия для конкурентного роста зерен, в ходе которого на переходе из стартовой зоны в кристаллоотборник остаются зерна с преимущественной кристаллографической ориентацией, характеризующейся наименьшим углом между направлением [001] и вектором градиента температуры. Из стартовой зоны в кристаллоотборник – геликоид попадает лишь несколько зерен с аксиальной ориентацией, близкой к [001], и произвольной азимутальной ориентацией, из числа которых происходит отбор одного зерна для образования монокристаллической отливки. Такая технология позволяет получать монокристаллические отливки с аксиальной ориентацией близкой к [001], однако азимутальная ориентация монокристалла является произвольной.

Поскольку отбор зерна в геликоиде является ключевым моментом технологии получения монокристаллической отливки, изучение роста зерен в зависимости от геометрических параметров канала геликоида являлось предметом ряда исследований.

В 2011 г. при помощи компьютерного моделирования в модуле CAFÉ системы PROCAST Dai и др. [2] провели систематическое исследование влияния геометрических параметров спирального кристаллоотборника. Исследовали угол подъема и диаметр спирального канала, влияние диаметра закрутки спирали на эффективность отбора зерен. В своих экспериментальных исследованиях авторы пришли к выводу, что в кристаллоотборнике отбор зерен происходит по геометрическим причинам, а эффективность отбора возрастает с уменьшением угла подъема спирали [3].

Gao и др. [4] в 2012г. провели эксперименты и пришли к выводу, что в кристаллоотборнике обычно побеждает зерно, расположенное у внутренней стенки канала.

В исследовании [5] аналогичный вывод сделан на основании результатов численного моделирования в модуле CAFÉ. Конкурентный рост в кристаллоотборнике происходит под влиянием нескольких факторов: направление вектора теплового потока в кристаллоотборнике, преимущественное направление роста и геометрические факторы. В работе отмечается, что вектор теплового потока в кристаллоотборнике ориентирован вдоль оси спирали, однако, значение этого факта для отбора зерен до конца не раскрыто.

В работах [6, 7] проведено систематическое исследование взаимосвязи между условиями кри-

сталлизации, геометрией кристаллоотборника, направлением вектора градиента температуры и конкурентным ростом зерен. На основании этого исследования был сделан вывод о циклической смене преимущественного направления роста в спиральном канале и предложен механизм отбора одного зерна, объясняющий способность геликоида улучшать качество монокристалла путем устранения малоугловых границ.

Во всех перечисленных выше исследованиях, объектом исследования выступали кристаллоотборники-геликоиды, обычно применяемые в промышленности.

В литературе прошлых лет можно найти кристаллоотборники самой разнообразной геометрической формы, разработанные в предположении, что зерна неблагоприятной кристаллографической ориентации отсеиваются из-за встречи со стенками канала кристаллоотборника. Поиск новых типов кристаллоотборников, более эффективных и более простых в изготовлении по сравнению с геликоидом, актуален и сейчас. В промышленности вызывает интерес плоский кристаллоотборник, конструкция которого является более простой и более удобной для серийного производства.

Настоящая работа посвящена исследованию механизма отбора одного зерна в криволинейном канале кристаллоотборника. В качестве объекта исследования выбран плоский зигзагообразный кристаллоотборник, который сравнивается со спиральным кристаллоотборником, используемым в конструкции литейной формы лопаток газотурбинных двигателей для улучшения качества монокристаллической отливки.

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для моделирования процесса направленной кристаллизации была использована коммерческая система компьютерного моделирования литейных процессов ProCAST [8].

Исследовали условия отбора одного зерна в кристаллоотборнике при направленной кристаллизации на медном кристаллизаторе по методу Бриджмена.

В качестве объектов исследования были выбраны стартовая система с плоским зигзагообразным кристаллоотборником, имеющим параметры, указанные на рис. 1а, и система со спиралевидным геликоидом – рис. 1б, габаритные размеры которого соответствовали плоскому кристаллоотборнику.

Во всех расчетах моделировался процесс направленной кристаллизации цилиндрической отливки из жаропрочного сплава ЖС26.

Тепловой расчет проводился в два этапа в термическом модуле системы ProCAST. На первом

Таблица 1. Химический состав сплава ЖС26, коэффициенты распределения и наклон линии ликвидуса для легирующих элементов

Элемент	C	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	V	Ni
Концентрация мас. %	0.15	4.9	9.0	1.1	11.7	1.7	5.9	1.0	0.9	Осн.
m , 1/К	–	–1.4	–	–4	11.9	–2.3	–3.5	–11	–5.5	–
k	–	0.9	–	0.8	0.67	0.34	0.85	0.88	0.7	–

этапе моделировался процесс нагрева печи с пустой формой, установленной на кристаллизаторе, от исходной температуры 20°C до заданной рабочей температуры со скоростью нагрева 0.45 К/с.

На втором этапе моделировался процесс кристаллизации. После нагрева печи и выдержки, кристаллизатор и залитая форма опускались с постоянной скоростью 5 мм/мин. Исходные тепловые поля были взяты из предыдущего расчета. Процесс направленной кристаллизации осуществлялся при температуре верхнего нагревателя равной 1540°C, нижнего – 1600°C. Температура сплава ЖС26 при заливке составляла 1600°C.

Теплофизические свойства сплава были рассчитаны по химическому составу сплава в термическом модуле системы ProCAST. Химический состав сплава ЖС26 и теплофизические свойства керамической оболочки, использованные в расчетах, приведены в табл. 1 и 2.

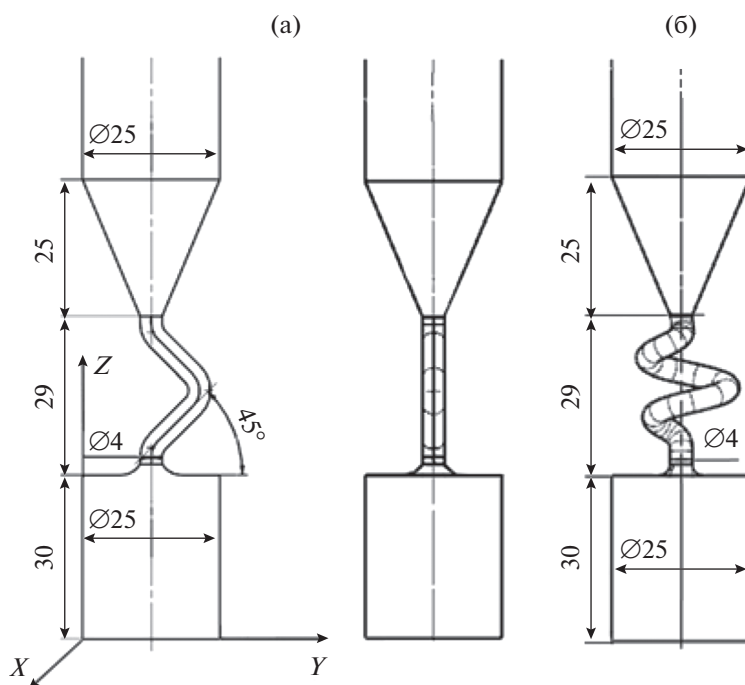
Были проведены три серии расчетов. Первая серия была проведена для исследования конку-

Таблица 2. Теплофизические свойства материала формы

Свойство	Значение
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)	2.2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	1200
Плотность, кг	2700

рентного роста двух зерен в зависимости от их кристаллографической ориентации и положения на входе в кристаллоотборник. Предполагалось, что на входе в канал кристаллоотборника присутствуют два зерна – А и Б – заданной кристаллографической ориентации. Схема расположения зерен на входе в канал кристаллоотборника показана на рис. 2.

Азимутальная ориентация всех зерен была таковой, что кристаллографические плоскости (001) совпадали с координатными плоскостями (на рис. 1). Зерно типа А было ориентировано таким образом, что кристаллографическое на-

**Рис. 1.** Эскизы стартовых систем, использованных в расчетах. а – Система с плоским зигзагообразным кристаллоотборником; б – стартовый узел со спиралевидным геликоидом.

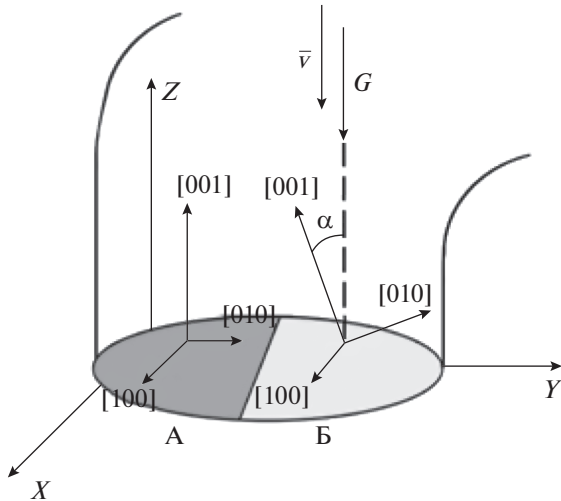


Рис. 2. Схема расположения зерен во входном сечении кристаллоотборника и их кристаллографическая ориентация.

правление $[001]$ было параллельно вектору скорости \mathbf{V} перемещения отливки. Отклонение кристаллографического направления $[001]$ зерна Б от вектора \mathbf{V} было равно $\alpha = -20^\circ$ или $+20^\circ$ (рис. 2), т.е. рассматривались две ситуации: 1 – конкурентный рост сходящихся зерен А и Б (угол $\alpha = 20^\circ$ и 2 – конкурентный рост расходящихся зерен (угол $\alpha = -20^\circ$).

В модуле SAFÉ ориентация зерен задается углами Эйлера (Φ_{i1} , Φ_i , Φ_{i2}), где угол Φ_{i1} определяет азимутальный разворот кристаллографической решетки, а угол Φ_i определяет отклонение первичных осей дендритов от вертикальной оси отливки. Таким образом, кристаллографическая ориентация зерен А всегда была задана углами $\Phi_{i1} = 0$, $\Phi_i = 0$, $\Phi_{i2} = 0$. Кристаллографическая ориентация зерна Б была задана углами $\Phi_{i1} = 0$, $\Phi_i = \alpha$, $\Phi_{i2} = 0$. Кроме того, в этой серии расчетов варьировался порядок расположения зерен во входном сечении кристаллоотборника.

Во второй серии расчетов исследовался процесс конкуренции множества зерен произвольной кристаллографической ориентации в плоском кристаллоотборнике (рис. 1а). Рассматривался процесс спонтанного зарождения зерен на поверхности кристаллизатора и конкурентный рост зерен сначала в стартовой зоне, а затем в плоском кристаллоотборнике. Условия процесса направленной кристаллизации были такими же, как и в первом случае.

В третьей серии расчетов моделировался процесс спонтанного зарождения и роста зерен в заправочном узле со спиральным кристаллоотборником – геликоидом (рис. 1б). Условия направленной кристаллизации были такими же, как и в первом случае.

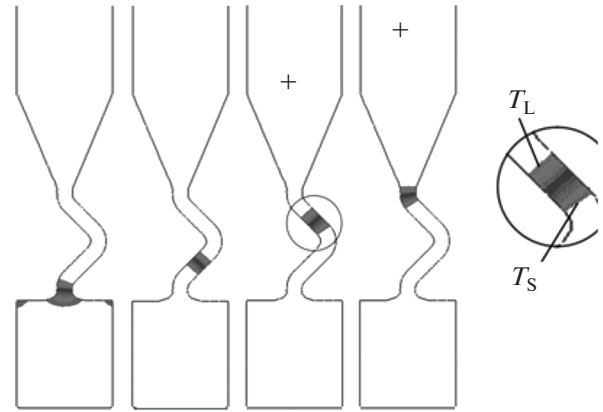


Рис. 3. Форма двухфазной зоны и ориентация изоповерхностей солидуса и ликвидуса в процессе кристаллизации металла в канале плоского кристаллоотборника.

Поскольку в последних двух сериях ориентация и количество зародившихся зерен было случайным, для получения статистически значимого результата было проведено по 30 расчетов в каждой серии.

Во всех расчетах возможность образования каких-либо еще зерен, например, в объеме расплава перед фронтом роста или на поверхности канала (паразитные зерна) не рассматривалась.

Для моделирования роста зерен использовался модуль SAFE системы ProCAST. В этом модуле случайное зарождение зерен описывается нормальным распределением Гаусса. Коэффициенты кинетического уравнения, связывающего скорость роста вершины дендрита с переохлаждением расплава, были рассчитаны с помощью модуля SAFE. Параметры, описывающие зарождение и кинетику роста дендрита сплава ЖС26, использованные в расчетах, можно найти в [6, 9].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 показана форма двухфазной зоны и ориентация изоповерхностей солидуса и ликвидуса в процессе кристаллизации металла в канале плоского кристаллоотборника. Поскольку вектор скорости перемещения изотермы \mathbf{W} и вектор градиента температуры \mathbf{G} параллельны вектору нормали к изотерме ликвидуса, по этому рисунку можно видеть, как изменялось направление этих векторов в процессе роста твердой фазы в канале кристаллоотборника.

В момент входа изотермы ликвидуса в кристаллоотборник вектор скорости роста \mathbf{W} направлен вертикально вверх, т.е. совпадает по направлению с вектором скорости перемещения формы. В криволинейном канале вектор скорости ориентирован по касательной к осевой линии канала.

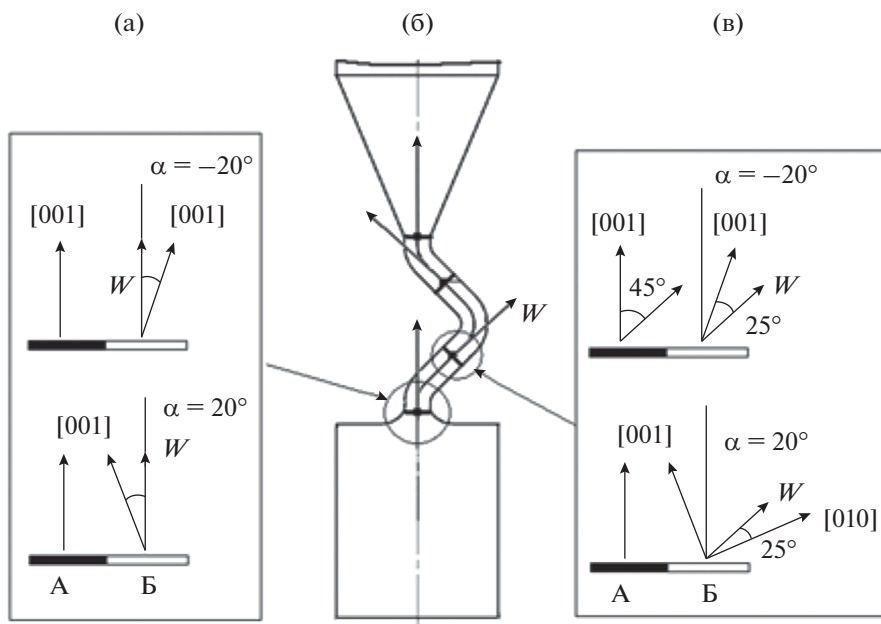


Рис. 4. Зерна А и Б и их кристаллографическая ориентация; а – вход зерен в канал кристаллоотборника, б – схема изменения направления вектора скорости роста, в – перемещение изотермы в середину первого наклонного участка.

На рис. 4 схематически показано изменение направления вектора скорости роста в зависимости от положения изотермы ликвидуса в канале кристаллоотборника. В момент входа зерен в канал кристаллоотборника (рис. 4а) зерно А имеет преимущественную ориентацию, поскольку направление [001] совпадает с направлением вектора **W**. Согласно теории Уолтона-Чармеса [10] зерно А имеет ростовое преимущество перед зерном типа Б и, со временем, должно вытеснить зерно Б.

При перемещении изотермы в середину первого наклонного участка (рис. 4в) угол между направлением [001] и вектором **W** для зерна А составляет 45°. В случае сходящихся зерен ($\alpha = 20^\circ$), показанном на рис. 4, на наклонном участке кристаллоотборника меняется не только угол между вектором **W** и направлением роста, но меняется с [001] на [010] кристаллографическое направление, по которому образуются первичные оси дендритов. Поскольку угол между направлением [001] и вектором **W** теперь составляет 65°, а угол между [010] и вектором **W** равен 25°, именно в направлении [010] будут формироваться оси первого порядка.

Нетрудно видеть, что на участке с наклоном в противоположную сторону произойдет новая смена преимущественного направления роста. Однако на этот раз ростовое преимущество получит сходящееся зерно Б ($\alpha = 20^\circ$), поскольку угол между [001] и **W** будет равен 25°, т.е. меньше чем у зерна А.

На рис. 5 показана расчетная макроструктура в плоском кристаллоотборнике, полученная в пер-

вой серии расчетов. Эта серия расчетов была проведена для двух зерен с заданной кристаллографической ориентацией. Каждое из этих зерен в исходном состоянии занимало ровно половину

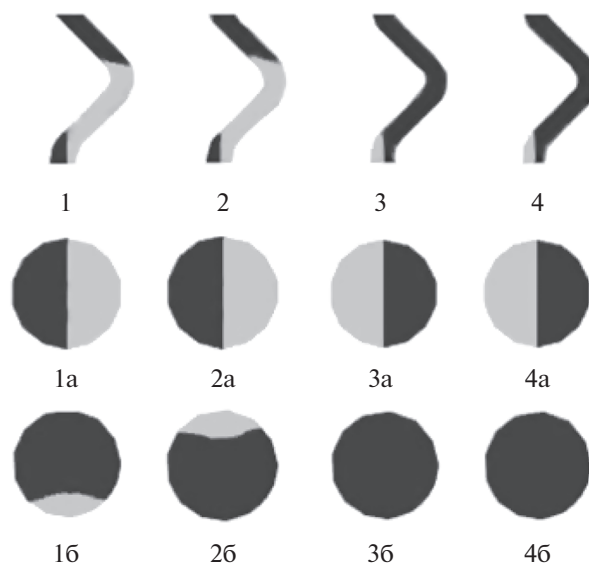


Рис. 5. Расчетная макроструктура отливки при конкурентном росте двух зерен. Зерно А показано черным цветом, зерно Б – серым. Ориентация зерна Б: 1, 3 – сходящиеся зерна, $\alpha = 20^\circ$; 2, 4 – расходящиеся зерна, $\alpha = -20^\circ$. 1–4 – структура в продольном сечении кристаллоотборника; 1а–4а – структура в сечении на входе в канал кристаллоотборника (исходная структура); 1б–4б – структура в сечении на выходе из канала кристаллоотборника.



Рис. 6. Типичный вид продольного сечения кристаллоотборника с монокристаллической (а) и не монокристаллической (б) структурой в выходном сечении.

сечения на входе в кристаллоотборник (рис. 2). Граница между этими зернами была ориентирована таким образом, что левое зерно (как показано на рис. 5) имело два препятствия для распространения в канале кристаллоотборника — нависающую над ним стенку канала и зерно, расположенное справа. Правое зерно имело относительно открытый путь для роста в канале кристаллоотборника.

Как следует из рис. 5, если зерно типа А (зерно с ориентацией $\alpha = 0$), расположено в позиции, дающей возможность беспрепятственного роста (т.е. справа), в выходном сечении кристаллоотборника имеется монокристалл. Если справа находится зерно типа Б, оно сохраняет свое присутствие в выходном сечении и монокристалла нет.

На основании первой серии расчетов можно предположить, что кристаллографическая ориентация монокристалла, получаемого на выходе из канала кристаллоотборника, определяется зерном, имеющим на входе наиболее выгодное положение. Вероятность получения монокристалла тем выше, чем меньше угол α этого зерна.

Для проверки этой гипотезы была проведена вторая серия расчетов, в которой рассматривался рост множества зерен, зародившихся на поверхности кристаллизатора. В каждом из тридцати проведенных расчетов кристаллографическая ориентация зерен была случайной, поскольку выбиралась генератором случайных чисел. Типичная структура, полученная в этой серии расчетов, показана на рис. 6.

Как видно из результатов расчета, в стартовой зоне происходит рост столбчатых зерен. В результате конкурентного роста на входе в канал кристаллоотборника оказываются зерна с близкой аксиальной и очень разной азимутальной ориентацией. Угол α , характеризующий аксиальную ориентацию, у зерен, попавших в канал кристаллоотборника, не превышает 14 градусов. Поскольку угол наклона канала кристаллоотборника равен 45° , это означает, что первичные оси дендритов зерен, растущих в канале, формируются вдоль направления [001].

Следует отметить, что, если бы угол наклона оси канала был больше 45° , то первичные оси дендритов формировались бы в направлениях [010] или [100], в зависимости от азимутальной ориентации зерна. Таким образом, полученные в данной работе результаты и выводы справедливы для углов наклона канала кристаллоотборника не более 45° .

Анализ полученных структур показал, что только в 6 из 30 случаев в выходном сечении плоского кристаллоотборника был монокристалл. На рис. 7 показана структура зерен для этих 6 случаев с указанием угла α для зерна, образовавшего монокристалл. На рис. 7б показана макроструктура на входе в канал кристаллоотборника. В этом сечении показаны границы всех зерен. Зерно, которое образовало монокристалл, закрашено серым цветом. В порядке слева направо на рис. 7в показаны монокристаллы с углом α равным 5, 7, 2, 6, 7 и 11 градусов. Ни в одном из приведенных расчетов зерно, образовавшее монокристалл, не является зерном с минимальным углом α , однако присутствует в зоне, наиболее благоприятной для конкурентного роста.

На рис. 8 показана типичная структура отливок, в которых не удалось получить монокристалл. Во всех случаях, зерна, оказавшиеся в цилиндрической отливке, близки по ориентации и занимают благоприятную позицию на входе в кристаллоотборник.

На рис. 8.2, показан случай, в котором результирующая структура состоит из трех зерен с ориентацией 3° , 5° и 7° . Зерна близки по ориентации и занимают благоприятную позицию для конкурентного роста.

На рис. 8.3 показаны результаты расчета, в котором результирующая структура состоит из трех зерен с ориентацией 4° , 11° и 14° . Следует отметить, что остальные зерна, представленные в сечении на входе в канал кристаллоотборника (рис. 8б), в этом случае имеют угол $\alpha < 11^\circ$. Тем не менее в выходном сечении (рис. 8в) их нет, поскольку благоприятная позиция занята другими зернами.

Из представленных результатов ясно, что наиболее благоприятным положением с точки зрения конкурентного роста является зона в правой части сечения канала кристаллоотборника (отмечена буквой S на рис. 7). Положение зоны S зави-

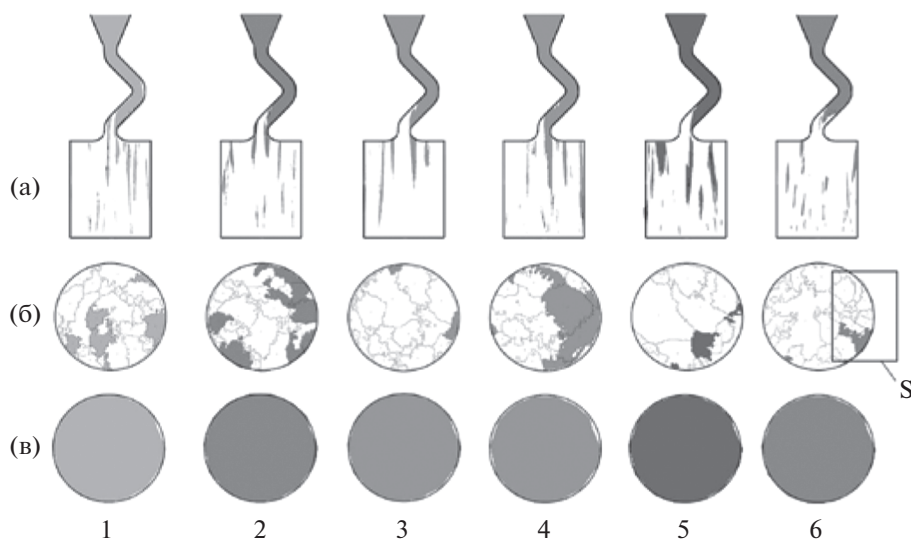


Рис. 7. Местоположение во входном сечении кристаллоотборника и кристаллографическая ориентация зерен, образовавшихся монокристалл. 1 – $\alpha = 5^\circ$; 2 – $\alpha = 7^\circ$; 3 – $\alpha = 2^\circ$; 4 – $\alpha = 6^\circ$; 5 – $\alpha = 7^\circ$; 6 – $\alpha = 11^\circ$; а – продольное сечение кристаллоотборника; б – сечение на входе в канал кристаллоотборника; в – сечение на выходе из канала кристаллоотборника. S – зона благоприятная для конкурентного роста.

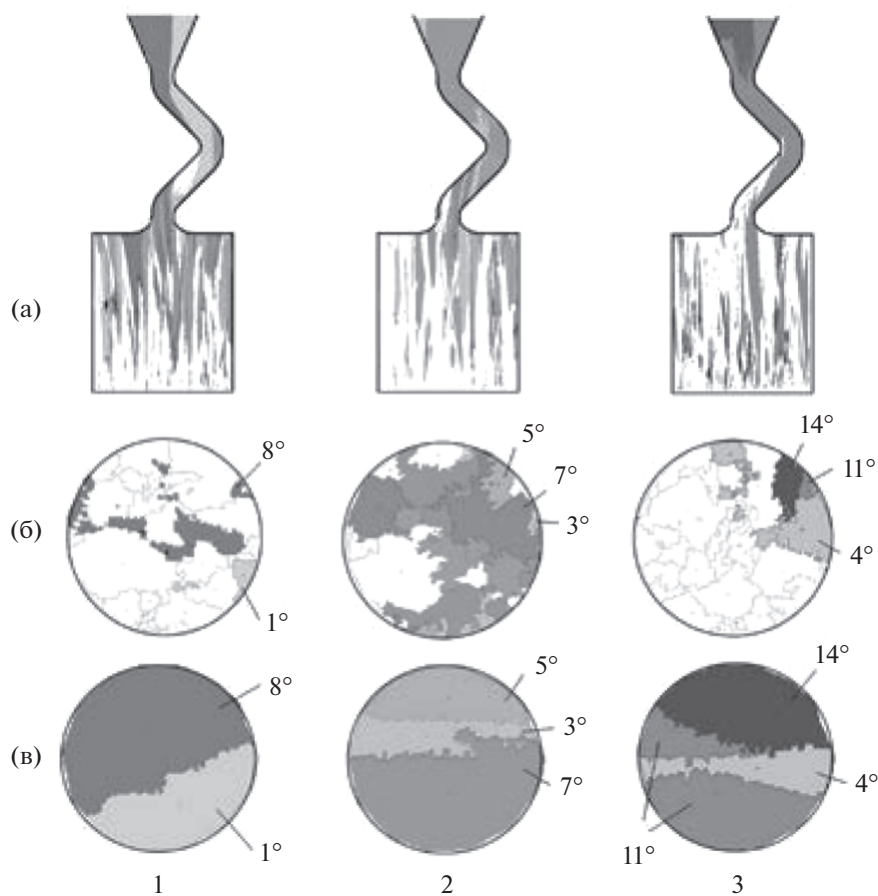


Рис. 8. Типичная структура не монокристаллических отливок, в трех разных расчетах; а – продольное сечение кристаллоотборника; б – сечение на входе в канал кристаллоотборника; в – сечение на выходе из канала кристаллоотборника. Цифрами показан угол α отклонения $[001]$ от вертикальной оси Z. Интенсивность тона серого цвета соответствует шкале угла α .

сит от того, в какую сторону наклонен первый прямолинейный участок канала кристаллоотборника, и где расположен поворот канала во второй прямолинейный участок.

В работе [9] показано, что эффективность отбора зерен при конкурентном росте падает с уменьшением угла разориентации зерен. По-видимому, зерна, оказавшиеся в прямолинейном канале кристаллоотборника, не способны вытеснить друг друга в силу незначительной разницы в кристаллографической ориентации. Они растут “параллельными курсами”, образуя границы зерен, перпендикулярные фронту роста (см. рис. 8в). Таким образом, на данном этапе кристаллизации существует единственный инструмент отбора одного зерна для образования монокристалла. Этим инструментом является перемещение зоны S с целью дать ростовое преимущество одному из зерен.

Нетрудно видеть, что на повороте канала произойдет смена положения зоны S — переместится на левую сторону сечения канала и преимущество в конкурентном росте получат зерна, распложенные в этой зоне поперечного сечения канала. На основании рис. 8 можно предположить, что после поворота в зоне S окажутся те же зерна, поскольку они будут занимать практически все сечение канала.

Для подтверждения правомерности этого заключения была проведена серия из 30 расчетов со спиралевидным геликоидом, представленным на рис. 16. Анализ полученной структуры показал, что во всех 30-ти расчетах отливка имела монокристаллическую структуру, что, по мнению авторов, может служить подтверждением существования в криволинейном канале кристаллоотборника механизма отбора зерен, выявленного при исследовании плоского кристалловода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В поперечном сечении криволинейного канала кристаллоотборника существует зона наиболее благоприятных условий конкурентного роста. Зерна, оказавшиеся в этой зоне, получают позиционное преимущество. Они имеют меньше препятствий для роста и больше шансов для захвата большей площади поперечного сечения канала.

На начальном этапе кристаллизации зерна, стартовавшие из благоприятной зоны, реализуют свое позиционное преимущество. Это приводит к сокращению числа зерен в сечении кристаллоотборника до 1–3 зерен. Близость кристаллографической ориентировки этих зерен приводит к тому, что вытеснение зерен с “худшей” кристаллографической ориентацией по механизму конкурентного роста, описанному в теории Уолтона–Чалмерса, идет медленно или невозможно.

Наиболее действенным способом отбора одного зерна в криволинейном канале кристаллоот-

борника является частая смена расположения зоны благоприятных условий конкурентного роста.

Кристаллоотборники простой геометрической формы, типа рассматриваемого в данной работе, менее эффективны, поскольку смена зоны благоприятного роста в них происходит всего один раз. Поэтому, как показала серия из 30 расчетов, образование монокристалла происходит только в 20% случаев.

В канале геликоида происходит многократная циклическая смена зоны благоприятного роста, что приводит к гарантированному получению монокристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толорайя В.Н., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Технология получения монокристаллических отливок турбинных лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов / В сб.: Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. Под. Ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2006. С. 206–218.
2. Dai H.J., Dong H.B., D'Souza N., Gebelin J.-C., Reed R.C. Grain Selection in Spiral Selectors During Investment Casting of Single-Crystal Components: Part II. Numerical Modeling // Metal. Mater. Trans. A. 2011. V. 42A. P. 3439–3446.
3. Dai H.J., D'Souza N., Dong H.B. Grain Selection in Spiral Selectors During Investment Casting of Single-Crystal Turbine Blades: Part I. Experimental Investigation // Metal. Mater. Trans. A. 2011. V. 42A. P. 3430–3438.
4. Gao S.F., Liu L., Wang N., Zhao X.B., Zhang J., Fu H.Z. Grain Selection During Casting Ni-Base, Single-Crystal Superalloys with Spiral Grain Selector // Metal. Mater. Trans. A. 2012. V. 43A. № 10. P. 3767–3775.
5. Wang N., Liu L., Gao S.F., Zhao X.B., Huang T.W., Zhang J., Fu H.Z. Simulation of grain selection during single crystal casting of a Ni-base Superalloy // J. Alloys Compounds. 2014. V. 586. P. 220–229.
6. Монастырский В.П., Поздняков А.Н., Ершов М.Ю., Монастырский А.В. Моделирование конкурентного роста зерен в криволинейном канале кристаллоотборника при направленной кристаллизации жаропрочного сплава на основе никеля // ФММ. 2017. Т. 118. № 7. С. 686–692.
7. Поздняков А.Н., Монастырский В.П., Ершов М.Ю., Монастырский А.В. Анализ условий конкурентного роста в геликоиде при направленной кристаллизации никелевого жаропрочного сплава // Материаловедение. 2015. № 7. С. 13–20.
8. ProCAST, торговая марка ESI Group, France, www.esi-group.com
9. Поздняков А.Н., Монастырский В.П., Ершов М.Ю., Монастырский А.В. Моделирование конкурентного роста зерен при направленной кристаллизации никелевого жаропрочного сплава // ФММ. 2015. Т. 116. № 1. С. 67–75.
10. Walton D., Chalmers B. The origin of the preferred orientation in the columnar zone of ingots // Transaction of AIME. 1959. V. 215. P. 447–452.