

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО УПРАВЛЯЕМОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИХ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Е.Н. Каблов

Ю.А. Бондаренко

А.Б. Ечин

Viamlab1@mail.ru

ФГУП «ВИАМ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы условия направленной кристаллизации с переменным управляемым градиентом. Определены факторы, влияющие на температурный градиент на фронте роста. Наиболее значимым является способ отвода теплоты кристаллизации за счет радиационного или конвективного охлаждения при погружении формы в жидкометаллический охладитель. Важными факторами являются: температура в печи подогрева, температура жидкометаллического охладителя, тепловые экраны, отделяющие зону нагрева от зоны охлаждения, теплопроводность керамической формы. Предложена методика экспериментальной оценки значений температурного градиента на фронте роста с помощью термопар. В результате экспериментальных исследований, проведенных на монокристаллических образцах с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ Re-содержащего сплава ВЖМЗ, показано, что управляя значениями температурного градиента, можно существенно влиять на размер структурных составляющих жаропрочного сплава. Приведены результаты металлографических исследований, выполненных методами оптической и электронной микроскопии. Методом наименьших квадратов получены закономерности изменений структурных составляющих сплава ВЖМЗ, которые представлены в виде уравнений

Ключевые слова

Направленная кристаллизация, температурный градиент, никелевый монокристаллический жаропрочный сплав, упрочняющая γ' -фаза, γ/γ' -эвтектика, дендритная ликвиция, микропористость, кратковременная прочность, длительная прочность

Поступила в редакцию 11.04.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.5: Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») и направлена на создание концепта «Перспективный двигатель»

Введение. Процесс направленной кристаллизации (НК) широко применяется как в России [1], так и за рубежом при получении деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД), в первую очередь рабочих лопаток, изготавливае-

мых из жаропрочных сплавов (ЖС) с монокристаллической структурой [2] с использованием технологии точного литья по выплавляемым моделям.

Такая технология базируется на методе Бриджмена — Стокбаргера, позволяющем получать отливку, состоящую из столбчатых зерен в направлении кристаллизации. В 1960-е годы с развитием газотурбинного двигателестроения работы по НК ЖС с получением столбчатой структуры были продолжены в США Ф.Л. Верснайдером, Р.В. Гуардом [3].

В середине 1960-х годов сотрудники ВИАМа Соболев Г.И. и Чумаков В.А. на опытной установке с водоохлаждаемым кристаллизатором получили отливки сплава ЖС6К с направленной структурой, с высокими показателями жаропрочных свойств и пластичности. Также в ВИАМе профессором Д.А. Петровым в начале 1970-х годов были инициированы работы по получению отливок ЖС с монокристаллической структурой [4].

На рис. 1, а приведена схема реализации метода Бриджмена — Стокбаргера (HRS — High Rate Solidification) [5] при производстве лопаток из ЖС, в котором процесс НК осуществляется перемещением керамической формы с расплавом ЖС на водоохлаждаемом кристаллизаторе из зоны нагрева в зону охлаждения. Известен также метод кристаллизации с помощью постепенного снятия мощности с нагревателя [6]. Вследствие того, что приведенные методы предполагают отвод теплоты кристаллизации только за счет радиационного охлаждения, они обеспечивали невысокие температурные градиенты на фронте роста.

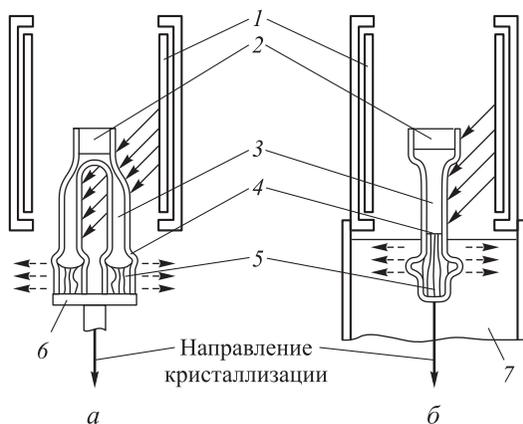


Рис. 1. Схема НК лопаток ГТД традиционным методом Бриджмена (а) и с жидкометаллическим охладителем (б):

1 — нагреватель; 2 — керамическая форма; 3 — расплав; 4 — фронт кристаллизации; 5 — твердый сплав; 6 — кристаллизатор; 7 — жидкометаллический охладитель; →, - - - → — подвод и отвод теплоты

Исследования микроструктуры образцов и лопаток ГТД, полученных методом HRS в условиях с невысоким температурным градиентом ($G \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$), свидетельствуют о формировании в них крупнодендритной структуры с развитыми осями второго порядка и наличием осей третьего порядка, с междендритным расстояни-

ем (в зависимости от элемента конструкции лопатки) $\lambda = 350 \dots 500$ мкм, крупными выделениями частиц γ' -фазы (~ 50 мкм) в эвтектике γ - γ' , частиц упрочняющей γ' -фазы ($\sim 1,0$ мкм), а также значительной пористостью (до $V_p \sim 0,8$ %).

Формирование крупнодендритной структуры сопровождается значительной дендритной ликвацией элементов (Al, Ti, W, Re ...) между осями дендритов и межосным пространством, значительным размером и количеством пор, образующихся в межосном пространстве вблизи выделений эвтектики γ - γ' . Направленная кристаллизация в условиях невысокого температурного градиента часто приводит к образованию на поверхности отливок нарушений структуры в виде струйчатой полосчатости (специфический дефект) в НК, состоящей из крупных выделений эвтектики γ - γ' и карбидов (freckles) [7].

Материалы и методы. Для решения проблем повышения качества однородной структуры, снижения дендритной ликвации, пористости в отливках лопаток ГТД используют энергоемкие, требующие значительных материальных затрат технологически сложные процессы высокотемпературной гомогенизации и газостатического прессования (ГИП).

Необходимость в более эффективном отборе теплоты привела к созданию процесса направленной кристаллизации с жидкометаллическим охлаждением — метод LMC (Liquid Metal Cooling) [8–10] (рис. 1, б). В этом процессе керамическую форму с расплавом ЖС перемещают из зоны нагрева в зону охлаждения, где погружают в ванну с жидким охлаждающим металлом. Использование конвективного охлаждения существенно повышает скорость теплоотвода, так как отливка охлаждается в 3–4 раза эффективнее, чем при охлаждении излучением с поверхности формы.

При разработке процесса НК методом LMC в ВИАМе в середине 1970-х годов были созданы лабораторные установки УВНЭС-3 и ВИАМ-1790 [1]. Температурный градиент на фронте роста повысился до значений $G \sim 50 \dots 60$ °С/см. На базе разработанного метода была реализована промышленная технология высокоскоростной (ВСНК) направленной кристаллизации, а также создано промышленное плавно-литейное оборудование — установки типа УВНК-8, где вследствие повышения интенсивности охлаждения формы удалось увеличить скорость кристаллизации и уменьшить размер структурных составляющих. На установках типа УВНК-8 в качестве жидкометаллического охладителя при ВСНК использовали расплав алюминия [11], за рубежом — расплав олова [8].

Однако было замечено, что увеличение скорости роста приводит к увеличению кривизны межфазной поверхности (фронта роста), высоким радиальным температурным градиентам, росту вторичных ветвей дендритов и зарождению зерен на стенках формы [8]. Для формирования однородной тонкодендритной структуры, уменьшения дендритной ликвации и пористости в ВИАМе был разработан процесс высокоградиентной НК литейных ЖС [12, 13], который позволил осуществить НК при температурном градиенте на фронте роста $G \geq 200$ °С/см [14, 15]. При НК с невысоким температурным градиентом (метод Бриджмена — HRS) высота жидкотвердой области достигает десятков миллиметров (рис. 2, а), при этом

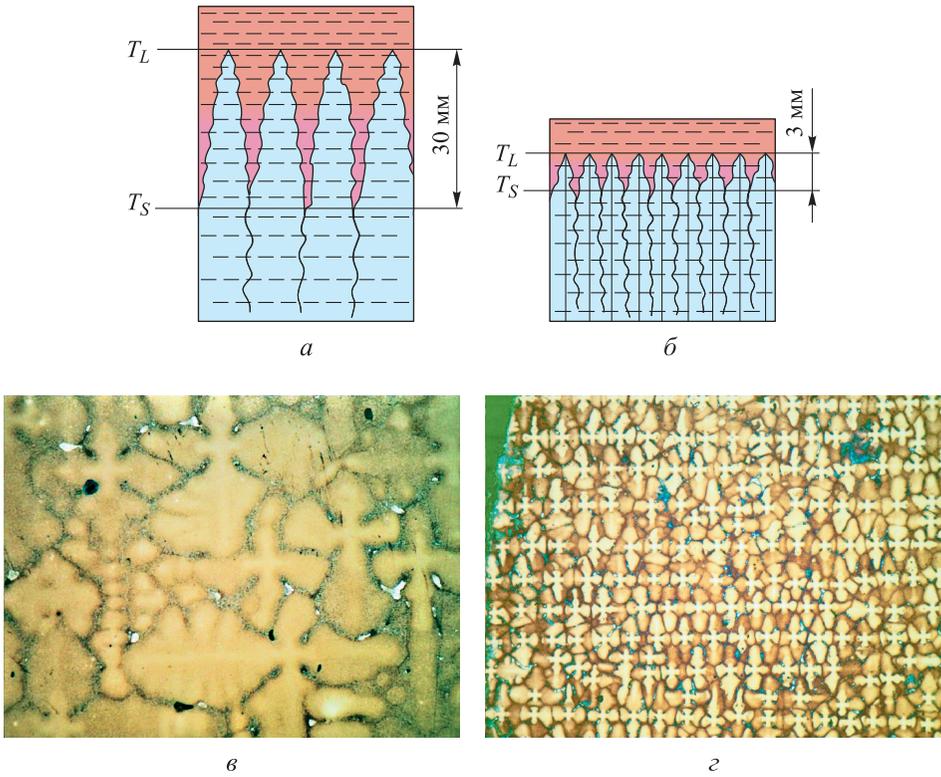


Рис. 2. Схема фронта кристаллизации в условиях дендритного роста при НК и микроструктура жаропрочного сплава ($\times 100$), полученного при температурном градиенте:

a, в — $G \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$; *б, з* — $G \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$

формируется крупнодендритная структура (рис. 2, *в*) с развитыми осями второго порядка. Ввиду перекрытия дендритных каналов осями второго порядка течение расплава в межосном пространстве затруднено.

Вследствие различия молярных объемов жидкой и твердой фаз в основании дендритов вблизи кристаллизующей эвтектики γ - γ' могут образовываться междендритные поры. Механизм их образования во многом связан с усадкой — меньшим объемом твердых фаз по сравнению с расплавом.

Повышение температурного градиента методом НК с жидкометаллическим охладителем обеспечивает уменьшение высоты жидкотвердой зоны до 3 мм (рис. 2, *б*), что улучшает подпитку основания дендритов, уменьшает пористость. Одновременно увеличивается скорость охлаждения, вследствие чего формируется более однородная тонкая дендритная структура (рис. 2, *з*) с меньшим размером упрочняющих частиц γ' -фазы, а также выделений эвтектики γ - γ' [12].

Таким образом, в ранее выполненных работах был установлен факт существенного влияния температурного градиента в процессе НК на структуру и свойства ЖС.

Цель настоящей работы — исследование процесса НК с переменным управляемым температурным градиентом, а также изучение влияния температурного градиента на особенности структуры, фазовый состав, размер упрочняющих фаз и свойства ЖС.

Результаты. Для решения поставленной задачи была разработана методика экспериментальной оценки температурного градиента на фронте роста при НК ЖС. Для определения значений температурного градиента при проведении экспериментальных плавок использовали вольфрам-рениевые термопары ВР 5/20, защищенные тугоплавкой керамической солодкой на основе оксида алюминия. Для получения объективной информации термопары устанавливали как на поверхности керамической формы (рис. 3), так и внутри отливки и в процессе НК получали кривые распределения температуры по высоте теплового узла установки.

Значения температурного градиента оценивали по разности температур между T_s (солидус сплава) и температурой на 10 мм выше, используя полученные кривые.

Для установления влияния методов НК, конструктивных особенностей теплового узла, способов охлаждения, материала охладителя, рабочей температуры и других параметров на значение температурного градиента на фронте кристаллизации были обобщены ранее полученные результаты, а также дополнительно проведены эксперименты на специализированных установках типа УВНЭС с жидкометаллическим охладителем и без него, имеющих одинаковые размеры конструкции теплового узла (печь сопротивления с графитовыми нагревателями высотой ~350 мм, внутренним диаметром ~130 мм). Все эксперименты проведены при $R_{кр} = 5$ мм/мин и температуре в пространстве печи 1550...1650 °С.

Результаты экспериментов по НК методом HRS на установке УВНЭС-2 (рис. 4), где теплота с поверхности формы отводилась радиационным охлаждением, свидетельствуют о невысоких значениях температурного градиента на фронте роста ($G \approx 10...15$ °С/см). Использование бокового водоохлаждаемого холодильника несущественно увеличивает интенсивность отвода теплоты с поверхности формы, значения температурного градиента на фронте роста увеличиваются незначительно ($G \approx 20$ °С/см). Термопары, установленные внутри отливки, зафиксировали очень малые значения температурного градиента на фронте роста ($G \leq 5$ °С/см), что связано с низкой теплопроводностью керамической формы.

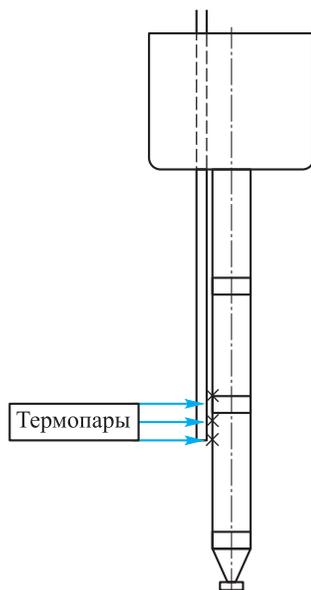


Рис. 3. Схема установки термопар на керамической форме

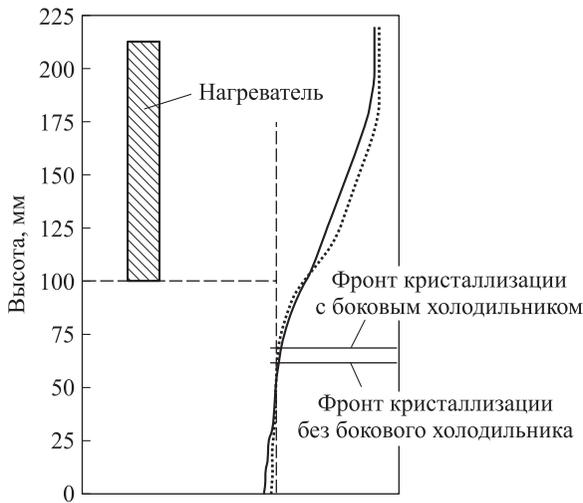


Рис. 4. Кривые распределения температуры по высоте теплового узла при НК методом HRS:

.... — без бокового холодильника; — — с боковым холодильником

Следует также отметить, что положение фронта кристаллизации при методе HRS существенно смещается (на ~35 мм) ниже нагревателя. Боковой холодильник приближает положение фронта к нагревателю (на ~30 мм).

Микроструктурные исследования полученных заготовок отливок (длиной 150 мм и диаметром 15 мм) показали, что при НК методом HRS формируется крупнодендритная структура с $\lambda \approx 500$ мкм (без бокового холодильника) и $\lambda \approx 450$ мкм (с боковым холодильником) (рис. 5), в которой на развитых осях 2-го порядка

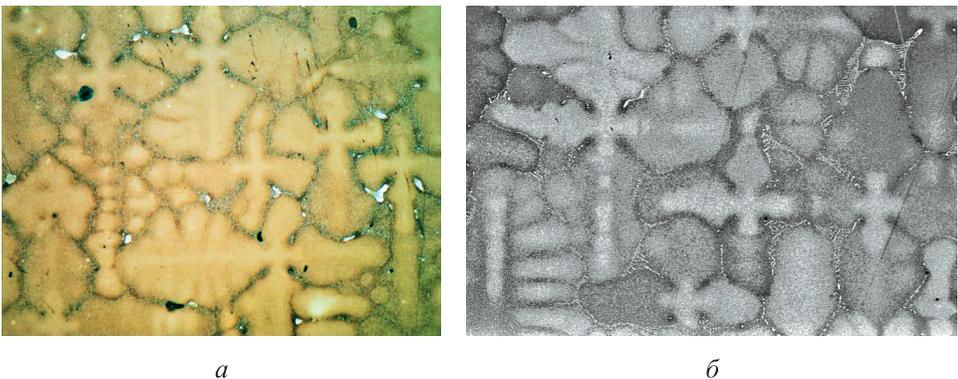


Рис. 5. Микроструктура заготовок отливок, полученных методом HRS ($\times 100$):

а — без бокового холодильника, б — с боковым холодильником

наблюдаются оси 3-го порядка, а на поверхности отливок (без бокового холодильника) в ряде случаев видны выделения струйчатой полосчатости (специфических дефектов НК) (рис. 6).

В результате экспериментов выявлено, что при НК методом HRS трудно влиять на температурный градиент на фронте роста (значения температурного градиента низкие).

Применение метода LMC обеспечивает существенное повышение эффективности теплоотвода с поверхности формы, поэтому для оценки возможности управления температурным градиентом на фронте кристаллизации были проведены эксперименты с различными температурами охладителя.

Экспериментальные плавки осуществляли на установке УВНЭС-4 в аналогичной по размеру конструкции теплового узла печи подогрева форм (высота нагревателя ~350 мм, внутренний диаметр ~130 мм) при скорости кристаллизации $R_{кр} = 5$ мм/мин, рабочей температуре ~1600 °С. Все плавки проводились без тепловых экранов, отделяющих нагреватель от ванны с охладителем. При температурах охладителя ~250 и ~400 °С в качестве жидкометаллического охладителя использовали расплав олова, а при ~650 и ~950 °С — расплав эвтектики Al-Si.

В результате экспериментов с использованием термопар, закрепленных на поверхности форм, были получены кривые распределения температуры по высоте теплового узла установки (рис. 7).

Значения температурного градиента оценивали по описанной методике. Результаты оценки приведены в таблице.

Значения температурного градиента на фронте кристаллизации и размер междендритного расстояния в зависимости от температуры охладителя

Температура охладителя, °С	Температурный градиент на фронте роста G , °С/см	Размер междендритного расстояния в структуре отливок λ , мкм
250	120	210
400	100	260
650	70	420
950	50	450
Без ЖМО	20	500

Результаты экспериментов свидетельствуют, что температурный градиент на фронте роста зависит от температуры охладителя: с ростом температуры охладителя от 250 до 950 °С температурный градиент на фронте роста уменьшается от 120 до 50 °С/см. Это, соответственно, сказывается и на структуре ЖС (рис. 8), с уменьшением температуры охладителя (от 950 до 250 °С) междендритное расстояние λ в структуре сплава уменьшается от 450 до 210 мкм.



Рис. 6. Внешний вид выделений струйчатой полосчатости (x2)

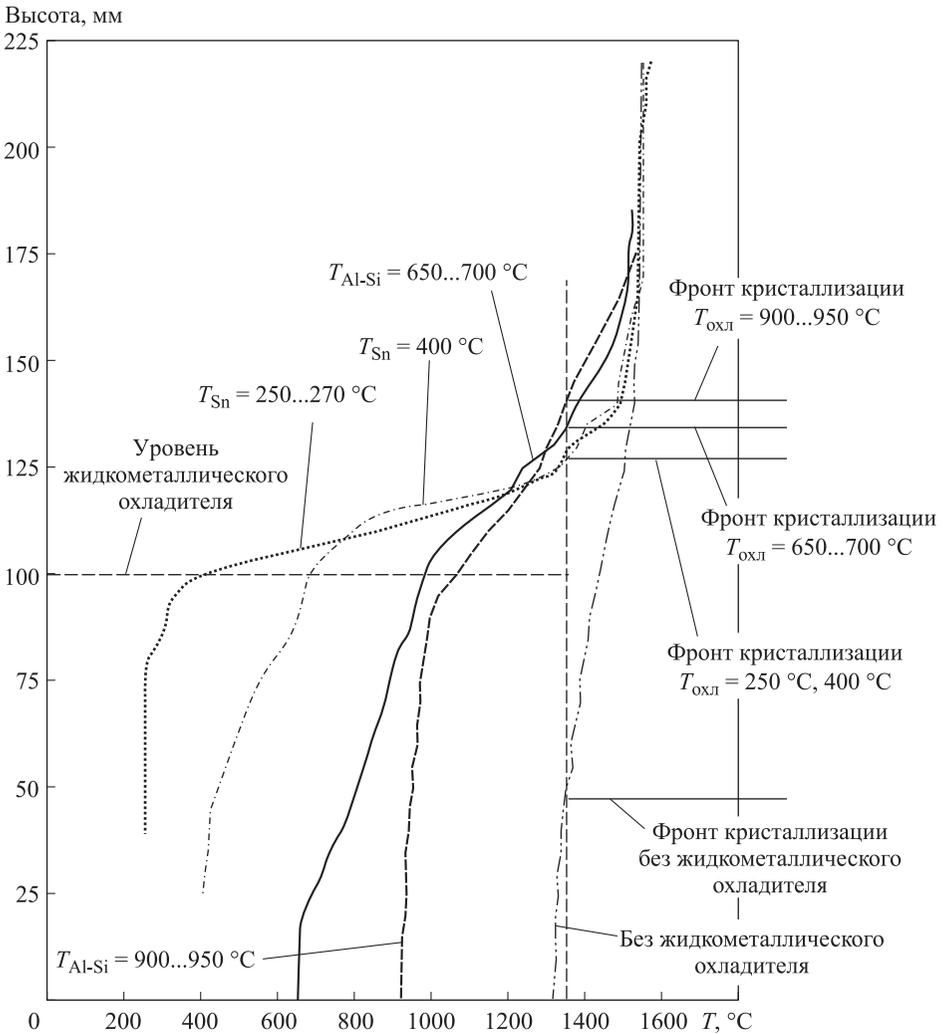


Рис. 7. Кривые распределения температуры по высоте теплового узла при разных температурах жидкометаллического охладителя

Таким образом, управляя температурой охладителя, можно в значительной степени управлять температурным градиентом на фронте роста [16]. Также получил экспериментальное подтверждение факт, что метод ЛМС обеспечивает осуществление процесса НК в условиях существенно бóльших значений температурного градиента на фронте роста.

Усовершенствование конструкции установки с жидкометаллическим охладителем, реализованное на установке УВНЭС-4 за счет применения двухзонного нагревателя, комбинированных тепловых экранов, отделяющих зону нагрева от зоны охлаждения, снижения температуры охладителя (250...300 °С), обеспечило существенный прирост температурного градиента. Для получения более полной информации эксперименты проводили с термопарами, размещенными как на поверхности формы, так и внутри отливки. Вследствие близкого контакта рас-

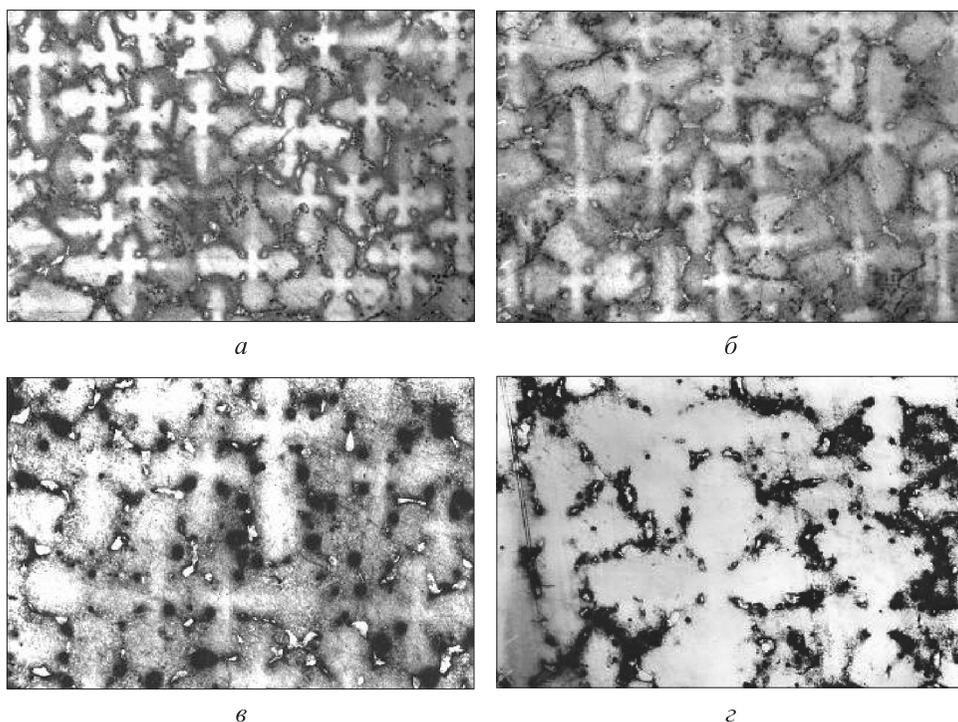


Рис. 8. Микроструктура ЖС в зависимости от температуры жидкометаллического охладителя ($\times 100$):

а — 250...260 °С, $\lambda = 210$ мкм; *б* — 400...420 °С, $\lambda = 260$ мкм; *в* — 600...650 °С, $\lambda = 420$ мкм; *г* — 900...950 °С, $\lambda = 450$ мкм

плава ЖС с термопарами внутри отливки для получения надежных результатов термопары были защищены высокоогнеупорной термопарной керамикой на основе оксида алюминия (99,6 % Al_2O_3). Результаты экспериментов свидетельствуют, что термопары, размещенные внутри отливки, часто отказывают из-за их контакта с расплавом ЖС. Двухзонный нагреватель, тепловые экраны между нагревателями и жидкометаллическим охладителем, высокие температуры на форме перед тепловыми экранами ($T_{\text{ф}} > 1600$ °С), низкая температура охладителя ($T_{\text{охл}} \sim 300$ °С) обеспечивают высокие значения температурного градиента $G > 200$ °С/см по термопарам на поверхности формы и значения температурного градиента в 2 раза ниже по термопарам внутри отливки (рис. 9), что связано с трудностями в передаче теплоты от отливки через стенки керамической формы, имеющей низкую теплопроводность. В отливках ЖС была сформирована однородная тонкая дендритная структура с $\lambda < 200$ мкм. Дополнительно был сделан вывод, что для повышения температурного градиента необходимо увеличить теплопроводность керамической формы, возможно, за счет уменьшения ее толщины.

Дальнейшие исследования процесса НК методом ЛМС [17–20], направленные на совершенствование конструкции теплового узла с двухзонным нагревателем установок с жидкометаллическим охладителем, в том числе за счет тепло-

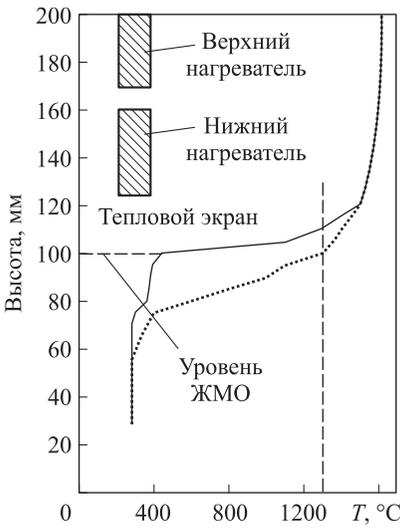


Рис. 9. Кривые распределения температуры по высоте теплового узла установки НК с двухзонным нагревателем и тепловыми экранами:
 — на поверхности формы; - - - внутри формы

исследования был выбран современный Re-содержащий малоуглеродистый сплав ВЖМ-3, разработанный в ВИАМЕ и имеющий высокие жаропрочные свойства [22].

Для получения сопоставимых результатов на опытно-промышленной установке УВНС-5 с компьютерной системой управления были проведены экспериментальные плавки при заданных значениях температурного градиента $G = 20, 50, 100, 150$ и $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ [23]. Управление значением температурного градиента обеспечивалось отсутствием или наличием жидкометаллического охладителя, тепловых экранов, величиной температуры в печи подогрева форм. Так, плавки при $G = 20$ и $50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ проводили без жидкометаллического охладителя при пониженных температурах в печи ($\sim 1500 \dots 1510 \text{ }^\circ\text{C}$) без тепловых экранов и с экранами. Плавки с $G = 100, 150, 200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ проводили с жидкометаллическим охладителем при более высоких температурах ($\sim 1550 \dots 1620 \text{ }^\circ\text{C}$) с различными тепловыми экранами, скорость кристаллизации $R_{кр} = 5 \text{ мм}/\text{мин}$.

Металлографические исследования позволили выявить закономерности влияния температурного градиента на изменение размеров структурных составляющих (рис. 10, 11). Так, с увеличением температурного градиента от 20 до $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ междендритное расстояние уменьшается более чем в 2 раза, от 310 до 130 мкм (рис. 10, а), размеры частиц упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов уменьшаются в 3 раза от $0,6$ до $0,2 \text{ мкм}$ (рис. 10, б), размеры выделяющихся частиц γ' -фазы в эвтектике $\gamma-\gamma'$ уменьшаются более чем в 2 раза от ~ 19 до $\sim 7 \text{ мкм}$ (рис. 10, в), объемная доля микропор уменьшается более чем в 10 раз от $0,124$ до $0,011 \text{ \%}$.

вых экранов, отделяющих зону нагрева от зоны охлаждения [21] и температурных режимов процесса НК, позволили обобщить основные факторы, обеспечивающие повышение температурного градиента на фронте кристаллизации. В их числе в качестве наиболее эффективных следует выделить: повышение температуры на форме перед фронтом кристаллизации, применение многослойных тепловых экранов между зоной нагрева и зоной охлаждения, низкие температуры жидкометаллического охладителя, минимальное расстояние между нагревателем и жидкометаллическим охладителем.

Полученные результаты позволили приступить к практическим исследованиям влияния управляемого переменного градиента на особенности структуры, фазового состава, свойств ЖС. В качестве объекта

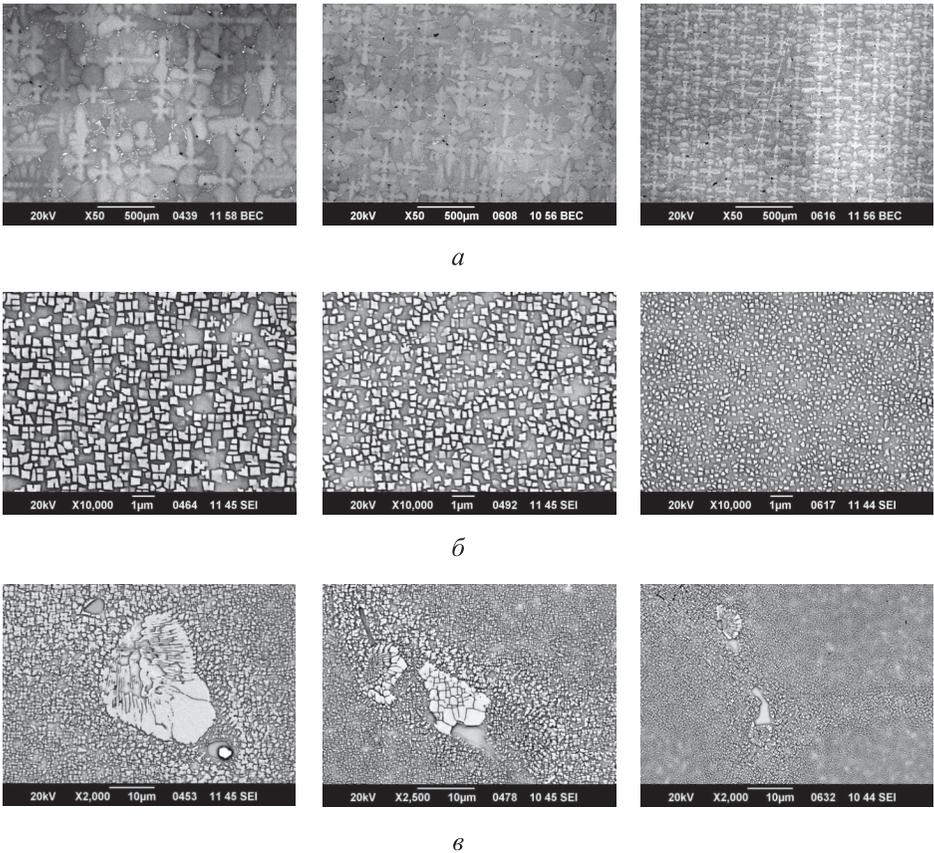


Рис. 10. Влияние температурного градиента на размеры структурных составляющих ЖС (при $G = 20 \text{ }^\circ\text{C}$):

a — междендритное расстояние; *б* — частицы упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов; *в* — выделяющиеся частицы γ' -фазы в эвтектике γ - γ'

На основе полученных экспериментальных данных по оценке методом наименьших квадратов размеров междендритного расстояния, частиц упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов и выделяющихся частиц γ' -фазы в эвтектике γ - γ' определены закономерности влияния температурного градиента на изменения размеров структурных составляющих. Полученные закономерности могут быть представлены в виде следующих уравнений:

$$\lambda = 447(GR)^{-0,23}; \tag{1}$$

$$\lambda_{\gamma' \text{ в осях}} = 2,4(GR)^{-0,53}; \tag{2}$$

$$\lambda_{\gamma/\gamma' \text{ эвт}} = 50(GR)^{-40}. \tag{3}$$

Таким образом, показано, что размерность структурных составляющих связана с изменением скорости охлаждения известным соотношением Брууди — Флемингса:

$$d = a(GR)^{-n},$$

где d — средний размер структурных составляющих; a — коэффициент, пропорциональный интервалу кристаллизации; G — температурный градиент; R — скорость перемещения фронта кристаллизации; n — показатель степени.

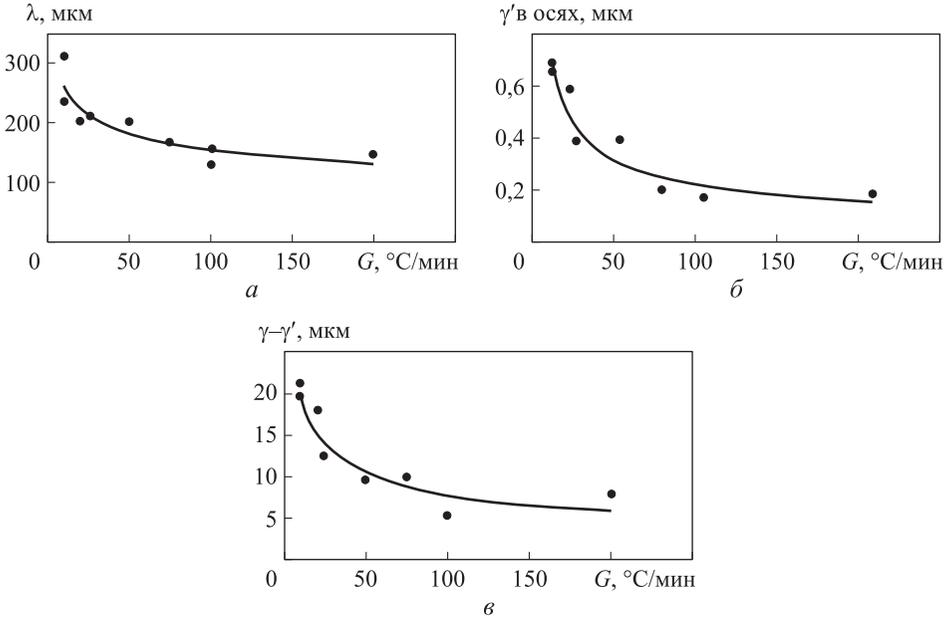


Рис. 11. Изменение междендритного расстояния (а), размеров частиц γ' -фазы в осях дендритов (б) и выделяющихся частиц γ' -фазы в эвтектике γ - γ' (в) в зависимости от скорости охлаждения

По результатам аппроксимации полученных уравнений установлено, что экспериментальные данные достоверно описываются степенной зависимостью, которая имеет вид гиперболы.

Полученные в уравнениях (1)–(3) значения коэффициентов a и n несколько отличаются от значений, приведенных в работе И.Л. Светлова [24]. Это объясняется тем, что в указанной работе экспериментальные данные по влиянию скорости охлаждения на размерность структурных составляющих никелевых сплавов были получены на лабораторной установке при невысоких температурных градиентах на фронте роста в основном за счет изменения скорости кристаллизации.

Исследования влияния температурного градиента на дендритную ликвацию, проведенные методом микрорентгеноспектрального анализа, позволили уточнить, что оси дендритов обогащены тугоплавкими элементами W, Re, межосное пространство — Al, Cr, Mo, Ta. Повышение температурного градиента существенно уменьшает ликвацию легирующих элементов внутри дендритов, что особенно важно для современных ЖС с повышенным содержанием тугоплавких элементов (W, Re).

Полученные в результате исследования монокристаллические образцы сплава ВЖМЗ с КГО <001> были использованы для определения их механических свойств в зависимости от значений температурного градиента ($G = 20, 50, 100, 150, 200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$). Оценивались: кратковременная прочность при 20 и $980 \text{ }^\circ\text{C}$ и длительная прочность при $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ и нагрузке 120 МПа и одинаковой скорости кристаллизации $R_{кр} = 5 \text{ мм}/\text{мин}$.

Установлено, что при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ предел прочности монокристаллических отливок из сплава ВЖМЗ в литом состоянии с повышением температурного градиента увеличивается от 870 до 1200 МПа . Предел текучести увеличивается от 780 до 930 МПа (рис. 12, а). При температуре $980 \text{ }^\circ\text{C}$ пределы прочности и текучести с повышением температурного градиента увеличиваются незначительно (рис. 12, б). Оценка длительной прочности (времени до разрушения при $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\sigma = 120 \text{ МПа}$) монокристаллических образцов сплава ВЖМЗ в литом состоянии показала, что минимальные свойства имеют образцы, закристаллизованные при $G \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ (рис. 12, в). С ростом температурного градиента отмечается рост продолжительности времени до разрушения при испытании на жаропрочность от $\tau = 57 \text{ ч}$ при $G \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ до $\tau = 139 \text{ ч}$ при $G \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$.

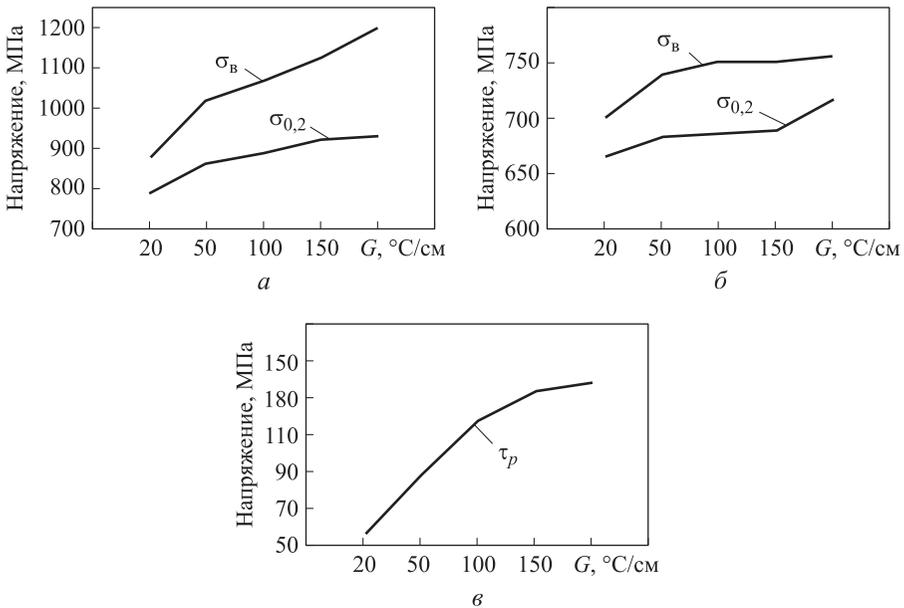


Рис. 12. Механические свойства литых образцов сплава ВЖМЗ в зависимости от температурного градиента:

а — кратковременная прочность при $20 \text{ }^\circ\text{C}$; б — кратковременная прочность при $980 \text{ }^\circ\text{C}$;
 в — длительная прочность при $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\sigma = 120 \text{ МПа}$

Заключение. Разработана методика определения температурного градиента и выявлена взаимосвязь между его значениями на фронте кристаллизации и условиями процесса НК (конструкцией теплового узла, температурными режимами процесса НК, способами охлаждения).

Установлены закономерности влияния температурного градиента на междендритные расстояния, размеры частиц упрочняющей γ' -фазы и выделяющихся частиц γ' -фазы в эвтектике γ - γ' , позволившие определить значения коэффициентов уравнений для расчета размеров основных структурных составляющих монокристаллического ЖС ВЖМЗ.

Показано, что увеличение температурного градиента существенно уменьшает ликвацию легирующих элементов внутри дендритов, а также повышает кратковременную и длительную прочность литых образцов сплава ВЖМЗ (с ростом температурного градиента от 20 до 200 °С/см).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. М.: Наука, 2006. 632 с.
3. *Versnyder F.L., Guard R.W.* Directional grain structure for high temperature strength // Trans. ASM. 1960. Vol. 52. P. 485–493.
4. Петров Д.А. Сплавы цветных металлов: К анализу некоторых сторон метода направленной кристаллизации. М.: Наука, 1972. С. 76–81.
5. Куриц В., Зам П.П. Направленная кристаллизация эвтектических материалов. М.: Металлургия, 1980. 272 с.
6. *Versnyder F.L., Shank M.E.* The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification // Mater. Sci. and Eng. 1970. Vol. 6. No. 4. P. 213–247. DOI: 10.1016/0025-5416(70)90050-9
7. *Giamei A.F. and Kear B.H.* On the nature of freckles in nickel-base superalloys // Met. Trans. 1970. Vol. 1. No. 8. P. 2185–2192. DOI: 10.1007/BF02643434
8. *Giamei A.F., Tschinkel J.G.* Liquid metal cooling: a new solidification technique // Met. Trans. A. 1976. Vol. 7. No. 9. P. 1427–1434. DOI: 10.1007/BF02658829
9. *Giamei A.F., Kraft E.H., Lemkey F.D.* New trends in materials processing // Amer. Soc. for Metals. 1976. P. 48–98.
10. *Tschinkel J.G., Giamei A.F.* Apparatus for casting of directionally solidified articles. U.S. Patent No. 3.763.926, 1971.
11. Каблов Е.Н., Панкратов В.А. Инкубатор для турбинных лопаток // Наука и жизнь. 1991. № 8. С. 62–64.
12. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа RENE-N5 // МиТОМ. 1999. № 2. С. 15–18.
13. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А. Получение монокристаллических лопаток ГТД высокоградиентной направленной кристаллизацией // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 53–56.
14. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава,

полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 25–31.

15. *Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н.* Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МиТОМ*. 2002. № 7. С. 20–23.

16. *Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р.* О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя // *Литейное производство*. 2011. № 5. С. 36–39.

17. *Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А.* Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 1. С. 3–8.

18. *Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р.* Влияние условий направленной кристаллизации на структуру деталей типа лопатки ГТД // *Литейное производство*. 2012. № 7. С. 14–16.

19. *Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А.* Особенности высокоградиентной направленной кристаллизации и современное оборудование, используемое при производстве лопаток газотурбинных двигателей // *Труды ВИАМ. Электрон. журн*. 2014. № 12.

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-3-3

20. *Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р.* Влияние температурного градиента на структуру жаропрочного сплава при его направленной кристаллизации // *Литейщик России*. 2014. № 5. С. 24–28.

21. *Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А.* Устройство для получения отливок с направленной и монокристаллической структурой. Патент РФ № 2398653 от 18.03.2009.

22. *Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г.* Литейные жаропрочные никелевые сплавы // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. № 5. С. 15–19.

23. *Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Нарский А.Р.* Влияние переменного градиента на дисперсность структуры Re-содержащего сплава // *Литейное производство*. 2015. № 10. С. 33–36.

24. *Светлов И.Л., Кулешова Е.А., Монастырский В.П.* Влияние направленной кристаллизации на фазовый состав и дисперсность структуры никелевых сплавов // *Металлы*. 1990. № 1. С. 86–93.

Каблов Евгений Николаевич — генеральный директор ФГУП «ВИАМ» (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Бондаренко Юрий Александрович — д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории «Технологии литейных процессов жаропрочных сплавов и сталей» ФГУП «ВИАМ» (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Ечин Александр Борисович — зам. начальника лаборатории «Технологии литейных процессов жаропрочных сплавов и сталей» ФГУП «ВИАМ» (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Исследование влияния переменного управляемого температурного градиента на особенности структуры, фазовый состав, свойства высокотемпературных жаропрочных сплавов при их направленной кристаллизации // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2016. № 6. С. 43–61.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-43-61

VARIABLE CONTROLLED TEMPERATURE GRADIENT EFFECT ON THE FEATURES OF STRUCTURE, PHASE COMPOSITION, PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE SUPERALLOYS IN THEIR DIRECTIONAL SOLIDIFICATION

E.N. Kablov

Yu.A. Bondarenko

A.B. Echin

Viamlab1@mail.ru

Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents the research into the conditions of directional solidification with a variable controlled gradient. In our work first, we determined the factors influencing the temperature gradient at the growth front. We found that the most significant method is to remove the crystallization heat by radiation or convection cooling when the mould is immersed into the liquid metal coolant. When examining this process, we discovered important factors: temperature in the heating furnace, the liquid metal coolant temperature, heat shields, separating the heating zone from the cooling zone, the thermal conductivity of the ceramic mould. The study offers the method for the experimental evaluation of the temperature gradient values at the growth front by thermocouples. Findings of experimental studies conducted on the single-crystal samples with crystallographic orientation CLC <001> of Re-containing VZHM3 alloy, show that by controlling the temperature gradient values ($G = 20, 50, 100, 150$ and $200 \text{ }^\circ\text{C} / \text{cm}$) we can significantly influence the size of the structural superalloy components. Metallurgical studies carried out by optical and electron microscopy showed that with the increase in the temperature gradient with $20 \text{ }^\circ\text{C} / \text{cm}$ to $200 \text{ }^\circ\text{C} / \text{cm}$, the interdendritic distance halves from 310 microns to 130 microns, the size of the reinforcing particles γ' -phase in axes and mezhosnom space is reduced by 3 times, the particle size of the eutectic γ - γ' is reduced by more than 2 times, the volume fraction of micro-porosity is reduced by more than 10 times. By the method of least squares we obtained the regularities of changes of structural components VZHM3 alloy, which are presented in the form of equations. With increasing temperature gradient alloy, single crystal casting properties of cast samples VZHM3 values of tensile strength at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ increase in ~ 1.5 times, while $980 \text{ }^\circ\text{C}$ — by 10–20 %, the time to failure at $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ and $\sigma = 120 \text{ MPa}$ increases more than 2 times. This work is within the framework of an integrated research area 9.5: Directional crystallization (with variable controlled

Keywords

Directional solidification, temperature gradient, a nickel single crystal superalloy, reinforcing γ' -phase, γ / γ' eutectic, dendrite segregation, micro-porosity, short-term strength, long-term strength

gradient) of high-temperature superalloys ("Strategic trends in development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030") and is aimed at creating the concept of "The advanced engine"

REFERENCES

- [1] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).
- [2] Kablov E.N., ed. *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley: splavy, tekhnologii, pokrytiya* [Cast blades of gas-turbine engine: alloys, technologies, coatings]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 632 p.
- [3] Versnyder F.L., Guard R.W. Directional grain structure for high temperature strength. *Trans. ASM*, 1960, vol. 52, pp. 485–493.
- [4] Petrov D.A. *Splavy tsvetnykh metallov: K analizu nekotorykh storon metoda napravlennoy kristallizatsii* [Non-ferrous alloys: analysis of some features of directional crystallization technique]. Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 76–81.
- [5] Kurts V., Zam P.R. *Napravennaya kristallizatsiya evtekticheskikh materialov* [Directional crystallization of eutectic materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 272 p.
- [6] Versnyder F.L., Shank M.E. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification. *Mater. Sci. and Eng.*, 1970, vol. 6, no. 4, pp. 213–247. DOI: 10.1016/0025-5416(70)90050-9
- [7] Giamei A.F. and Kear B.H. On the nature of freckles in nickel-base superalloys. *Met. Trans.*, 1970, vol. 1, no. 8, pp. 2185–2192. DOI: 10.1007/BF02643434
- [8] Giamei A.F., Tschinkel J.G. Liquid metal cooling: a new solidification technique. *Met. Trans. A*, 1976, vol. 7, no. 9, pp. 1427–1434. DOI: 10.1007/BF02658829
- [9] Giamei A.F., Kraft E.H., Lemkey F.D. New trends in materials processing // *Amer. Soc. for Metals*. 1976, pp. 48–98.
- [10] Tschinkel J.G., Giamei A.F. Apparatus for casting of directionally solidified articles. U.S. Patent No. 3.763.926, 1971.
- [11] Kablov E.N., Pankratov V.A. Turbine blades incubator. *Nauka i zhizn'*, 1991, no. 8, pp. 62–64 (in Russ.).
- [12] Bondarenko Yu.A., Kablov E.N., Morozova G.I. Effect of high-gradient directed crystallization on the structure and phase composition of a high-temperature alloy of the type rene-N5. *MiTOM*, 1999, no. 2, pp. 15–18. (Eng. version of journal: *Metal Science and Heat Treatment*, 1999, vol. 41, no. 2, pp. 61–64. DOI: 10.1007/BF02468315)
- [13] Kablov E.N., Bondarenko Yu.A. Producing monocrystal blades for gas turbine engine by means of high-gradient directional crystallization. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 2000, no. 1, pp. 53–56 (in Russ.).
- [14] Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Kablov D.E. Particularities of <001> single crystals structure and heat-resistant properties of high-rhenium ni-base superalloy, produced under the high-gradient directed solidification conditions. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2011, no. 4, pp. 25–31 (in Russ.).

- [15] Bondarenko Yu.A., Kablov E.N. directional crystallization of heat-resistant alloys with increased temperature gradient. *MiTOM*, 2002, no. 7, pp. 20–23 (in Russ.).
- [16] Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskiy A.R. On the directional solidification using heat-resistant alloys. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2011, no. 5, pp. 36–39 (in Russ.).
- [17] Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Advancement of the directional crystallization process of GTE blades of superalloys with the single-crystal and composition structures. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2012, no. 1, pp. 3–8 (in Russ.).
- [18] Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskiy A.R. Influence of directional crystallization conditions on the structure of parts of the gas-turbine engine blade type. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2012, no. 7, pp. 14–16 (in Russ.).
- [19] Echin A.B., Bondarenko Yu.A. Modern equipment for turbine blades production designed with a glance of high-gradient directional crystallization process. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2014, no. 12. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-3-3
- [20] Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narskiy A.R. Effect of temperature gradient on heat-resistant alloy structure in event of its crystallization. *Liteyshchik Rossii*, 2014, no. 5, pp. 24–28 (in Russ.).
- [21] Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. Ustroystvo dlya polucheniya otlivok s napravlennoy i monokristallicheskoj strukturoy [Equipment for producing casting with directional and monocrystal structure]. Patent RF № 2398653, 2009 (in Russ.).
- [22] Petrushin N.V., Svetlov I.L., Ospennikova O.G. Liteynye zharoprochnye nikel'evye splavy. Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik [Heat-resistant Ni-base casting alloys. In: All materials. Encyclopedia], 2012, no. 5, pp. 15–19 (in Russ.).
- [23] Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Narskiy A.R. Influence of variable temperature gradient on refinement of dendritic structure of Re-containing super alloy. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2015, no. 10, pp. 33–36 (in Russ.).
- [24] Svetlov I.L., Kuleshova E.A., Monastyrskiy V.P. Effect of directional crystallization on phase composition and dispersability of Ni-base alloys structure. *Metally*, 1990, no. 1, pp. 86–93 (in Russ.).

Kablov E.N. — General Director of Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Echin A.B. — Deputy Head of the Laboratory of Technology of Casting Processes of Heat-resistant Steels and Alloys, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bondarenko Yu.A. — Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Scientist of the Laboratory of Technology of Casting Processes of Heat-Resistant Steels and Alloys, Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Variable Controlled Temperature Gradient Effect on the Features of Structure, Phase Composition, Properties of High-Temperature Superalloys in Their Directional Solidification. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 43–61. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-43-61



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
автора **Л.Н. Лысенко**

«Наведение баллистических ракет»

Изложены научные и методологические основы наведения баллистических ракет. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы определения точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначения, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет указанных классов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru