

УДК 669.018.44

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИКАХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММАХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВОК В УСТАНОВКАХ ТИПА УВНК-9А

В.В. Герасимов, Е.М. Висик

Определены эмпирические зависимости температуры экранов и распределение температур по глубине в ванне жидкометаллического кристаллизатора – алюминия, необходимые для использования в прикладной компьютерной программе расчета температурно-скоростных параметров направленной кристаллизации лопаток и других длинномерных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов. В установке УВНК-9А эти температуры зависят от температуры рабочих нагревателей печи подогрева форм, так как в ней отсутствуют специальные системы независимого поддержания и регулирования данных температур.

Ключевые слова: направленная кристаллизация, жаропрочные сплавы, компьютерные модели и программы расчета параметров кристаллизации.

Введение

Процесс направленной кристаллизации (НК) жаропрочных сплавов на установке УВНК-9А начинается при перемещении отливки, затвердевающей в керамической форме, из нагревателя печи подогрева форм (ППФ) в кристаллизатор – ванну с жидкометаллическим охладителем (расплавом алюминия). Между нагревателем печи и ванной с охладителем расположен тепловой экран (рис. 1).

Для расчета температурно-скоростных параметров НК отливок (цилиндрических заготовок, лопаток газотурбинного двигателя, створок сопла и т.д.) необходимо знать температуру экрана между выходом из печи нагрева и зеркалом ванны и распределение температуры по глубине жидкометаллического охладителя.

Во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) совместно с «МАТИ – Российским государственным технологическим университетом им. К.Э. Циолковского» была выполнена научно-исследовательская работа на тему «Разработка математической модели монокристалльного литья» (Отчет по договору №100Ц-1605-4-4, 2004 г., руководи-

тель работы профессор, д.т.н. А.А. Неуструев), в которой представлена методика расчета температурно-скоростных параметров НК отливок из жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой.

Основой расчетной методики служит разработанная математическая модель квазистационарного температурного поля пера лопатки с постоянным и переменным по высоте сечениями. В модели учтены максимально допустимый дрейф фронта изоликидуса, теплообмен излучением в зоне теплового экрана и конвективный теплообмен в жидкометаллическом охладителе. С помощью методики расчета температурно-скоростных параметров монокристалльного литья определяется скорость перемещения отливки в охладитель, градиент температуры на фронте изоликидуса, фактический дрейф фронта и устойчивость его плоской формы, параметры дендритной структуры в зависимости от габаритов отливки и условий монокристалльного литья.

Данная методика послужила основой для разработки прикладной программы расчета технологических режимов литья газотурбинных лопаток из жаропрочных сплавов методом НК с монокристаллической структурой, кото-

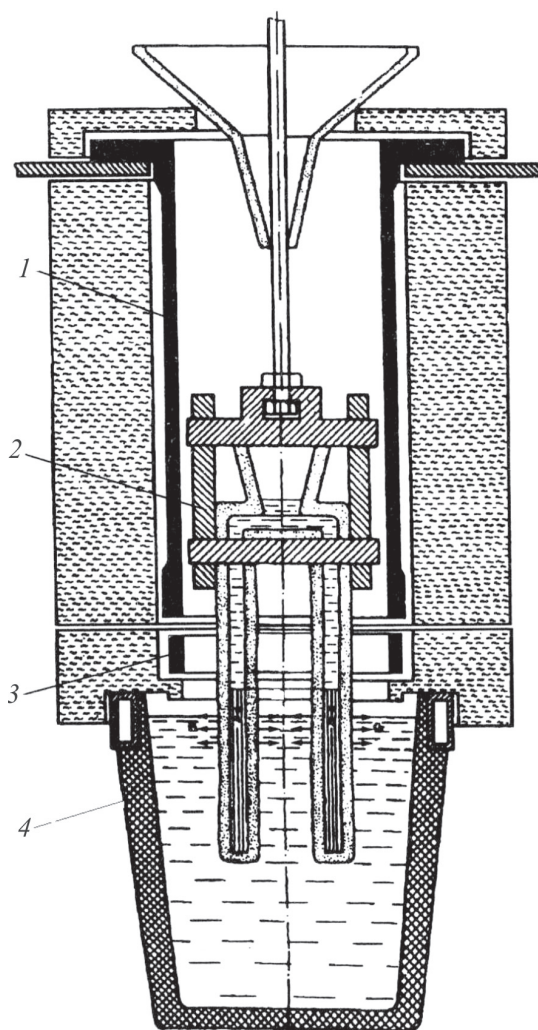


Рис. 1. Схема печи подогрева форм и жидкометаллического кристаллизатора:

- 1 – верхний нагреватель; 2 – подвеска с закрепленной на ней керамической формой;
3 – нижний нагреватель;
4 – кристаллизатор с жидкометаллическим охладителем – алюминием

рая может быть использована в автоматизированных системах управления технологическим процессом (АСУ ТП) монокристалльного литья. Прикладная программа адаптирована к конструктивным и эксплуатационным особенностям литейной установки УВНК-9А.

Одна из конструктивных особенностей УВНК-9А заключается в том, что температура экрана между нагревателем и зеркалом ванны и температура жидкого алюминия в ванне определяются температурой ППФ, так как в установке отсутствуют системы автономного регулирования и поддержания этих двух температур [1–5].

Целью настоящей работы явилось нахождение эмпирических зависимостей температур экрана и жидкого алюминия от температуры ППФ, необходимых для проведения расчетов технологических параметров НК отливок различных геометрических размеров.

Проведение экспериментов

На установке УВНК-9А экраном служит верхняя часть боковой стенки ванны (тигля) с жидкометаллическим охладителем (алюминием). Измерение температуры экрана при данной температуре печи производилось тремя термопарами, размещенными на стенке ванны (рис. 2). Термопары устанавливали в трехмиллиметровые отверстия в стенке ванны, выполненные на расстоянии 1,5...2 мм от ее внутренней поверхности. Средняя разность температур термопар 1 и 2 составляла ~ 20 К, а термопар 2 и 3 – ~ 50 К при температуре нагревателей ППФ 1773^{+20} К.

При повышении температуры нагревателей ППФ до 1873^{+20} К пропорционально растут и температуры экранов. Однако разница температур, измеряемых термопарами 1, 2 и 3, изменяется незначительно. Следовательно, в расчетах можно использовать среднюю температуру экрана (погрешность при этом не превышает $\pm 2\%$).

Для измерения температуры жидкометаллического охладителя производили погружение трех термопар в алундовом колпаке в верхний слой жидкого алюминия (рис. 3).

Средняя разность температур термопар 1 и 2 составляла ~ 50 К, а термопар 2 и 3 ~ 20 К (см. рис. 3). Следовательно, если в расчетах использовать среднюю температуру верхнего слоя ванны, то погрешность будет составлять не более $\pm 4\%$.

Результаты термометрирования ванны с жидкометаллическим охладителем на установке УВНК-9А показаны на рис. 4.

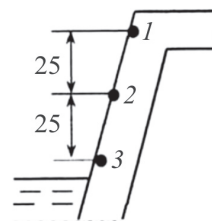


Рис. 2. Схема расположения трех термопар в верхней части стенки ванны жидкометаллического охладителя (расстояние между термопарами 25 мм)

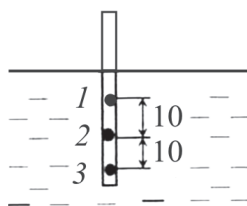


Рис. 3. Схема погружения трех термопар в ванну жидкометаллического охладителя (расстояние между термопарами 10 мм)

На рисунке 5 представлены результаты замеров температуры верхних слоев жидкометаллического охладителя тремя термопарами при температурах нагревателей ППФ 1773–20 К и 1873–20 К. Стрелками с цифрой 20 отмечены моменты времени, когда термопары погружались в расплав алюминия на глубину 20 мм. Суммарная глубина погружения составляла 60 мм. Погружение термопар в расплав осуществлялось в моменты относительной стабилизации температуры расплава.

Таблица 1
Средние значения температур экрана $T_{\text{э}}$ и жидкометаллического охладителя (алюминия) T_{Al} в зависимости от температуры нагревателей печи $T_{\text{ппф}}$

$T_{\text{ппф}}$, К	$T_{\text{э}}$, К	T_{Al} , К
1773	980	1098
1873	1060	1198

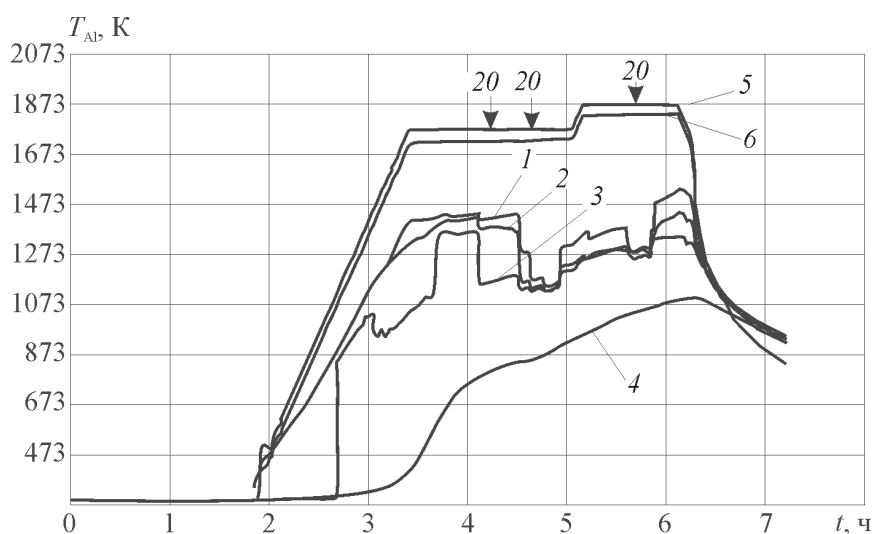


Рис. 5. Результаты термометрирования расплава алюминия в ванне кристаллизатора: 1, 2, 3 – показания термопар погружения (см. рис. 3); 4 – изменение температуры наружной стенки ванны с алюминием; 5, 6 – температуры верхнего и нижнего нагревателей ППФ

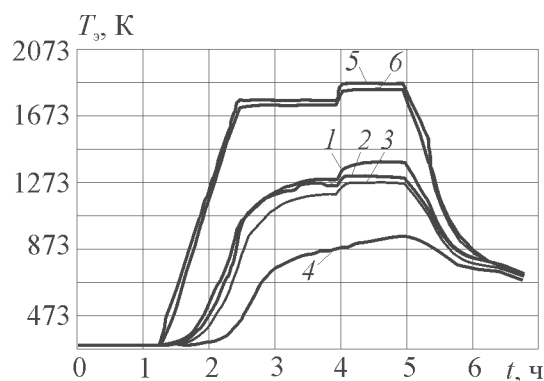


Рис. 4. Результаты термометрирования боковой поверхности ванны (экрана): 1, 2, 3 – показания термопар, закрепленных на внутренней стенке ванны с алюминием (см. рис. 2); 4 – изменение температуры наружной стенки ванны с алюминием; 5, 6 – температуры нагревателей ППФ

Анализ полученных результатов и проверка математической модели

В исследовании измерялись температуры экрана $T_{\text{э}}$ и жидкометаллического охладителя (алюминия) T_{Al} в зависимости от температуры нагревателей печи $T_{\text{ппф}}$. Их средние значения представлены в табл. 1. Измерение температур $T_{\text{э}}$ и T_{Al} осуществлялось при двух температурах ППФ: 1773 и 1873 К.

На основании приведенных результатов измерений температур получены следующие эмпирические зависимости, используемые в расчетных методиках и программах [6, 7] для УВНК-9А:

$$T_3 = 980 + 0,8(T_{\text{ппф}} - 1773) \text{ (K)}; \quad (1)$$

$$T_{\text{Al}} = T_{\text{ппф}} - 675 \text{ (K)}. \quad (2)$$

Для проверки адекватности математической модели в целом, применяемой для расчетов температурного поля и температурно-скоростных параметров процесса НК, выполнены эксперименты на пластинах из сплава ЖС26. Это пластины постоянного и конусообразного сечения по высоте, нижняя часть которых представляет собой стартовое основание в виде конической законцовки. Стартовый конус служит для передачи монокристаллической структуры от затравки к отливке.

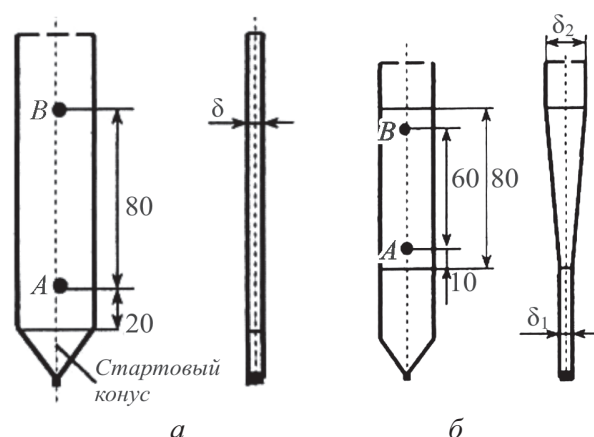


Рис. 6. Схемы плоского (а) и конусообразного (б) образцов: точками А и В обозначены места расположения термопар и привязка их к исходным размерам пластин (в мм); δ , δ_1 и δ_2 – толщины образцов

Таблица 2

Скорости погружения отливки в охладитель для разных типов образцов

Исходные данные ВНК	Образец	
	плоский	конусообразный
Толщина плоского образца δ , мм	6	–
Толщина конусообразного образца внизу δ_1 , мм	–	4
Толщина конусообразного образца вверху δ_2 , мм	–	10
Высота экрана h_3 , мм	70	70
Температура нагревателей печи ТППФ, °С	1500	1520
Скорость погружения отливки в охладитель w , мм/мин	18	18

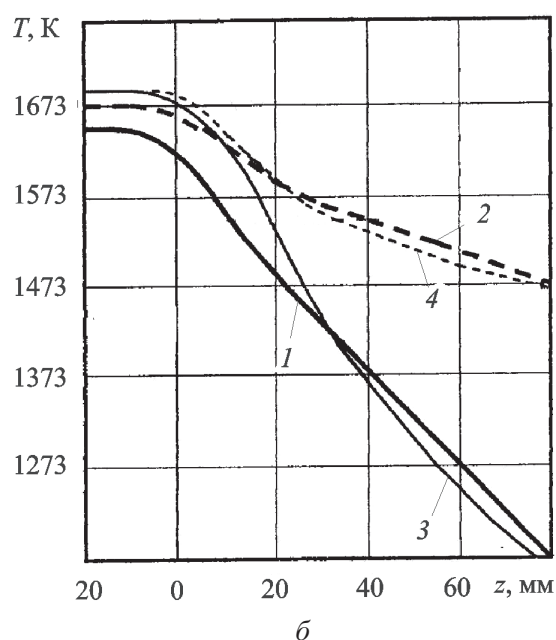
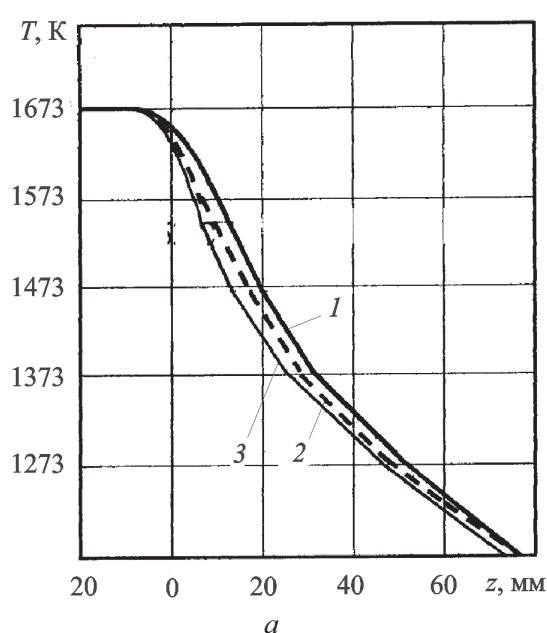


Рис. 7. Изменения температуры по глубине погружения z : а – плоского образца в сечениях А (кривая 1) и В (кривая 2), полученные экспериментально, а также расчетная кривая 3; б – конусообразного образца в сечениях А (кривая 1) и В (кривая 2), а также расчетные кривые 3 (в сечении А) и 4 (в сечении В)

Схемы плоского и конусообразного образцов [8] и расположение в них термопар для построения температурных кривых при НК в экспериментах на установке УВНК-9А изображены на рис. 6.

Исходные данные высокоградиентной направленной кристаллизации (ВНК) для двух типов образцов – плоского и конусообразного – позволили рассчитать один из важнейших параметров НК – скорость погружения отливки в охладитель (табл. 2).

Сопоставление экспериментальных кривых изменения температур в двух выбранных сечениях (совпадают с местами расположения термопар на рис. 6) плоского и конусообразного образцов с расчетными температурными кривыми представлено на рис. 7. Формулы их расчета в данной статье не приводятся.

Прямого соответствия температур экрана, охладителя и печи (уравнения (1) и (2)) данным, представленным на рис. 7, нет, поскольку эти температуры, как и сами уравнения, входят в более общую программу расчета температурного поля и температурно-скоростных параметров процесса.

На рисунке 7, а представлены графики изменения температуры в сечениях А и В (обозначенных на рис. 6) по ходу протяжки формы с отливкой из зоны нагрева в зону охлаждения (координата z). Так как пластина имеет постоянное сечение, разница температур в сечениях А и В незначительна и близка к рассчитанной с привлечением формул (1) и (2) кривой 3. На рисунке 7, б в связи с изменением сечения образца по высоте изменяется ход температурных кривых в точках измерений: в тонком сечении охлаждение происходит быстрее (кривая 1), а в толстом – медленнее (кривая 2). Расчетные кривые 3 и 4 с определенной погрешностью повторяют экспериментальные данные, из чего делается вывод об адекватности расчетной модели.

Показанные кривые подтверждают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Из пластин, полученных в описанных экспериментах, были вырезаны темплеты (рис. 8) для исследования сформировавшейся микроструктуры. Типичная дендритная структура в разных сечениях пластин показана на рис. 9.

Из рисунка видно, что в средних по высоте сечениях образцов имеет место развитие осей ден-

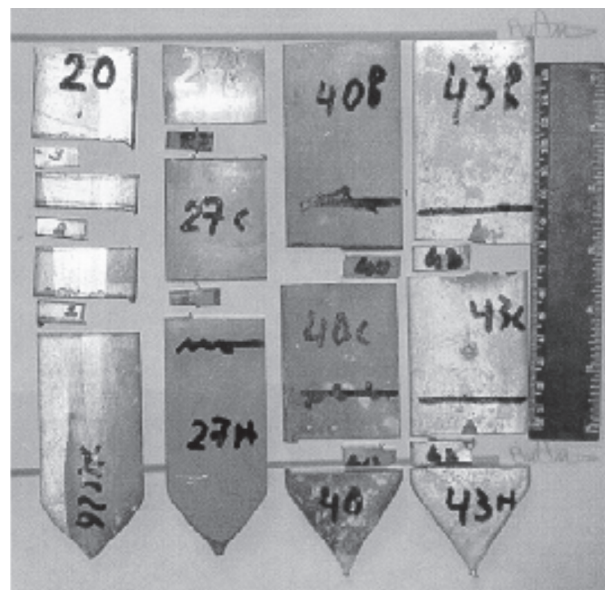


Рис. 8. Схема разрезки пластин на темплеты для изготовления микрошлифов

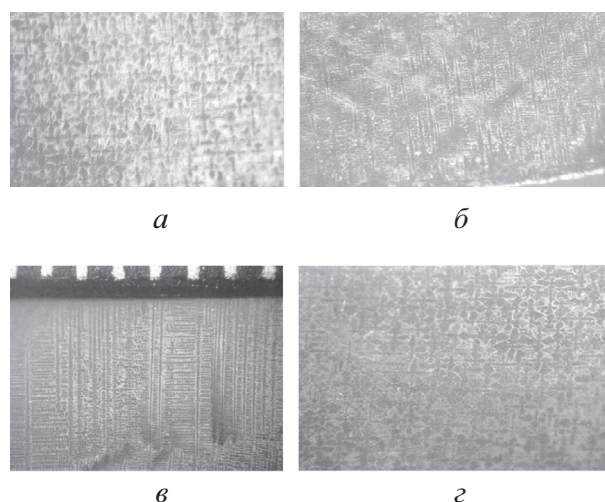


Рис. 9. Характерная микроструктура пластин в сечениях:

а – нижнем; б, в – среднем; г – верхнем

дритов второго порядка. Это говорит о том, что при указанных температурно-скоростных параметрах технологического процесса рассчитанная скорость погружения образцов в охладитель (18 мм/мин) является избыточной. Следовательно, необходима корректировка температурно-скоростных параметров для уменьшения скорости погружения пластин указанной толщины.

Установленные зависимости (1) и (2) явились недостающим звеном в компьютерной программе расчетов температурно-скоростных параметров процесса НК отливок любой геометрической формы и размеров.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментов на установке УВНК-9А получены эмпирические зависимости температуры экрана между зоной нагрева и зоной охлаждения и температуры верхних слоев жидкометаллического охладителя по глубине, используемые в расчетных методиках и программах для литейной установки УВНК-9А.

2. Получены удовлетворительные результаты при экспериментальной проверке адекватности математической модели температурного поля при отливке монокристаллических лопаток на установках типа УВНК-9А.

Заключение

Данная работа соответствует развитию фундаментально-ориентированных исследований, представленных в статье [9].

Установленные эмпирические зависимости явились недостающим звеном прикладной программы расчета технологических режимов литья газотурбинных лопаток из жаропрочных сплавов методом НК. Разработанная компьютерная программа позволяет осуществлять расчет температурно-скоростных параметров литья крупногабаритных деталей большой массы (до 50 кг) типа дисковых заготовок [10, 11] для последующей обработки методами деформации секторов сопловых лопаток [12] и створок реактивного сопла [13]. При этом не требуется проведения дорогостоящих экспериментов по определению оптимальных параметров (скорости кристаллизации, градиента температур, междендритного расстояния в будущей отливке) процесса направленной НК отливок любой геометрической формы.

Список литературы

1. Герасимов В.В., Колядов Е.В. Технические характеристики и технологические возможности установок УВНК-9А и ВИП-НК для получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов // Литейщик России. 2012. № 11. С. 33–37.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). – М.: Изд-во МИСИС, 2006. – 632 с.
3. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (при-

ложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 105–117.

4. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика её устранения при горячем изостатическом прессовании // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 117–129.
5. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. и др. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 97–105.
6. Инструкция по эксплуатации программы расчета технологических режимов литья методом ВНК газотурбинных лопаток из жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой для АСУ ТП установки УВНК-9А / Под руков. А.А. Неуструева. М., 2004.
7. Методика адаптации управляющей программы к промышленным литейным установкам / Под руков. А.А. Неуструева. М., 2004.
8. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 36–52.
9. Орлов М.Р. Стратегические направления развития испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 387–393.
10. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 129–141.
11. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных мате-

риалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. № 3–4. С. 34–38.

12. Герасимов В.В., Висик Е.М., Никитин В.А., Зернова М.Г. Опыт освоения технологии литья секторов сопловых лопаток с монокристаллической структурой из сплава

ВКНА-4 // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 13–18.

13. Герасимов В.В., Висик Е.М., Бакерин С.В. Изготовление протяженных литых заготовок из сплава ВКНА-1В направленной кристаллизацией // Литейное производство. 2011. № 10. С. 35–38.

Материал поступил в редакцию 15.04.13

ГЕРАСИМОВ

Виктор Владимирович

E-mail: gerfesavo@yandex.ru

Тел.: (499) 748-95-72

Кандидат технических наук, начальник сектора «Литейные жаропрочные сплавы и лопатки ГТД» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ФГУП ГНЦ «ВИАМ»). Сфера научных интересов – технология литья жаропрочных, эвтектических и интерметаллидных никелевых сплавов методом направленной кристаллизации. Автор 70 научных статей, в том числе монографии, более 40 патентов.

ВИСИК

Елена Михайловна

E-mail: Alexey_visik56@mail.ru

Тел.: (499) 748-95-72

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП ГНЦ «ВИАМ». Сфера научных интересов – технология литья жаропрочных, эвтектических и интерметаллидных никелевых сплавов методом направленной кристаллизации. Автор ряда научных статей и патентов.