

Шероховатость поверхности готового проката Ra составляла 0,258-0,551 мкм.

Качество проката по другим параметрам также отвечает техническим требованиям. Размеры ленты и рулона, мм: толщина – $1,7 \pm 0,04$; ширина – 88-0,5; диаметр рулона внешний – 390-420; диаметр рулона внутренний – 300; удельная электропроводность – $17,8 \pm 0,4$ % IACS.

На рис. 2 представлено изменение макро- и микроструктуры сплава из образцов, вырезанных из слитка перед прокаткой. При травлении концентрированной HNO_3 обнаружили типичную однофазную структуру полиэдрического типа с разным размером зерен, что характерно для литого состояния промышленных латуней.

Микроструктура лент (рис. 3) в твердом, полутвердом и мягком состояниях свидетельствует, что при отжиге и по следующей прокатке структура остается однородной, образования вторичных фаз не обнаружили, наблюдается удвоение зерен, типичное для низколегированных латуней.

Микрорентгеноспектральный анализ распределения легирующих элементов в структуре лент в отожженном состоянии (рис. 4) показал удовлетворительное распределение элементов – усредненная их концентрация отвечает заданному химическому составу сплава в пределах погрешности измерений.

Таким образом, специальная лента из сплава с заданной удельной электропроводностью может быть изготовлена на ОАО «АЗОЦМ» по заказам в необходимом количестве, при этом качество ленты будет отвечать техническим условиям на ленту (ТУ У 27.4-05417153-002:2009), разработанным по результатам данной работы.



Список литературы

1. Плітченко В. В. Розробка економнолегованого багатокомпонентного сплаву на основі міді для монет середніх номіналів: Автореф дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2008. – 18 с.

Поступила 05.10.2009

УДК 669.245: 536.421.4

**В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая,
А. С. Притуляк, Е. В. Михнян**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Показана возможность управления такими фазово-структурными характеристиками, как степень регулярности структуры, дендритный параметр, дисперсность и объемная доля упрочняющих интерметаллидных и карбидных фаз отливок из жаропрочного коррозионностойкого сплава типа ХН60КМЮВТ (базового без гафния и модельного с 0,2 % Hf), полученных путем направленной кристаллизации на промышленной установке УВНК-8П (ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект», г. Николаев) в условиях регулируемого теплоотвода при

скоростях $V_{кр} = 5$ и 10 мм/мин. Проведен также выбор температурно-временного режима термической обработки деталей (рабочих лопаток ГТД) с целью повышения их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, газотурбинный двигатель, литые детали, направленная кристаллизация, регулируемый теплоотвод, ориентированная структура.

Показана можливість управління такими фазово-структурними характеристиками, як ступінь регулярності структури, дендритний параметр, дисперсність та об'ємна частка зміцнюючих інтерметалідних і карбідних фаз виливків з жароміцного корозійностійкого сплаву типу ХН6ОКМЮВТ (базового без гафнію, та модельного з 0,2 % Hf), отриманих шляхом спрямованої кристалізації на промисловій установці УВНК-8П (ДП НВ КГ «Зоря-Машпроєкт», м. Миколаїв) в умовах регульованого тепловідводу при швидкостях $V_{кр} = 5$ і 10 мм/мін. Проведено також вибір температурно-часового режиму термічної обробки деталей (рабочих лопаток ГТД) з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: жароміцні сплави, газотурбінний двигун, литі деталі, спрямована кристалізація, регульований тепловідвід, орієнтована структура.

The possibility of management by phase-structural descriptions is shown, such how the degree of regularity of structure, dendrite- parameter, dispersion and by a volume stake of consolidating intermetallidnih and carbide phases of founding, is from the superalloy of the type 6O Ni-Cr-Co-Al-Ti-Mo-W (base, without hafnium, and model, with 0,2 % Hf), got by the directed crystallization on the industrial setting UVNK-8P (GTR&PC «Zorya»- «Mashproekt», Nikolaev) in the conditions of the managed taking of heat at the speeds $V_{кр} = 5$ and 10 mm/min. The choice of the temperature-temporal mode of heat treatment of details (blades of gas turbine engine) with the purpose of rise of their operating descriptions is also conducted.

Keywords: superalloys, gas turbine engine, cast details, directed crystallization, the managed taking of heat, oriented structure.

Существующие технологии литья деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов с равноосной структурой вакуумной выплавки уже не позволяют получать требуемую в настоящее время пластичность, термостойкость и длительную прочность, которые являются важнейшими показателями работоспособности материала. Следовательно, разработка новой технологии и активного способа управления процессом формирования ориентированной структуры литых деталей в жаропрочных сплавах на никелевой основе с матрично-карбидно-интерметаллидным упрочнением является актуальной.

Следует отметить, что в таких элементах ГТД, как рабочие лопатки компрессоров, динамические нагрузки приложены вдоль продольной оси деталей. Значительно меньшая протяженность поперечных границ зерен в сплавах с ориентированной структурой уменьшает вероятность образования в процессе ползучести локальных зернограницных дефектов, а повышенная пластичность облегчает релаксацию напряжений в материале. Поэтому любое ослабление границ зерен больше проявляется в сплавах с равноосной структурой [1, 2].

Кроме того, анализ показывает, что при направленном затвердевании примеси частично могут оттесняться движущимся фронтом кристаллизации в верхнюю часть оливки, поэтому их концентрация на границах будет ниже, чем в случае равноосной кристаллизации.

Известно также, что с целью понижения температуры поверхности лопаток в процессе эксплуатации разработаны их конструкции с внутренней полостью сложной геометрии (так называемые газовые тракты), при этом метод направленной кристаллизации позволяет не только повысить прочность деталей, но и получать бесприпусковые по газовому тракту поверхности лопатки, а также увеличить коэффициент использования материала за счет сокращения литниково-питающей системы [1-3].

Обобщение основных теоретико-экспериментальных особенностей влияния легирующих элементов на уровень физико-механических свойств сплавов для литых деталей с ориентированной структурой, полученных методом направленной кристаллизации (НК), позволило сформулировать ряд принципов многокомпонентного легирования такого рода сплавов, а именно:

– обеспечение устойчивости плоского фронта кристаллизации, являющегося залогом формирования наиболее совершенной регулярной структуры, что достигается за счет сужения температурного интервала плавления сплава;

– повышение термической стабильности матрицы γ/γ' , достигаемое увеличением температуры полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе и температуры затвердевания сплава.

В процессе НК, в зависимости от температурно-скоростных условий ее проведения, в слитках формируется монокристалльная либо ориентированная структура, каждое зерно которой имеет дендритно-ячеистое строение. Причем, рост кристалла при ориентированном теплоотводе начинается с образования одной дендритной ветви, сопряженной с зародышем, либо с затравки – в случае монокристалльного роста, и в процессе кристаллизации происходит заполнение межзольного пространства разрастающимися ветвями второго порядка с последующим сращиванием дендритных колонн. Ниже температуры полного растворения γ' -фазы начинается ее выделение в междендритных пространствах, а также формируются включения карбидов, преимущественно MC-типа. Известно также, что дисперсность фазовых составляющих более чувствительна к химическому составу сплава, чем размер дендритной ячейки, так как она определяется диффузией в твердом состоянии, существенно зависящей от соотношения легирующих элементов в сплаве, в отличие от коэффициента диффузии в расплаве [3, 4].

В представленной работе с применением современных методов металловедческого анализа показана возможность управления фазово-структурными характеристиками (степенью регулярности структуры, дендритного параметра, дисперсности упрочняющих интерметаллидных и карбидных фаз) жаропрочного коррозионностойкого сплава типа ХН60КМЮВТ с ориентированной структурой. Сплавы получали путем вакуумно-индукционного переплава чистых шихтовых материалов в слиток в печи УППФ-2 с последующим переплавом методом направленной кристаллизацией отливок в промышленной печи УВНК-8П. В качестве материала оболочковых форм применялась многослойная керамика на основе электрокорундовой суспензии с модификаторами, повышающими термическую прочность форм. Для формирования внутренней полости лопатки в качестве стержней были опробованы как стержни на основе корунда, так и на основе циркона, модифицированного кремнием и комплексным модификатором Al+Si. Термопрочностные характеристики у них примерно одинаковые и их термостойкость при температуре обжига керамических вставок (стержней) 1200 °С достаточна для получения качественных отливок [5].

Известно, что температурно-скоростные условия процесса кристаллизации, которые определяются скоростью перемещения фронта кристаллизации ($V_{кр}$, мм/мин) и градиентом температуры на фронте роста (G , К/мм), существенным образом влияют на внутризеренную структуру, дисперсность и фазовый состав сплава.

С целью установления влияния технологических параметров процессов кристаллизации на вышеприведенные характеристики сплавов проведены серии экспериментов с варьированием скорости кристаллизации отливок на 2-х уровнях: 5 и 10 мм/мин и градиентом температур на фронте кристаллизации 15-20 °С/см.

Количественные характеристики дендритной структуры – расстояние λ между дендритными осями 1 и 2-го порядка, связанные со скоростью охлаждения расплава на фронте кристаллизации, изменились при варьировании значений скоростей – от $\lambda = 180-150$ мкм при $V_{кр} = 5$ мм/мин (30 см/ч) до $\lambda = 180-120$ мкм при $V_{кр} = 10$ мм/мин (60 см/ч).

Отметим, что поскольку сплавы на основе никеля имеют ГЦК-решетку, то форми-

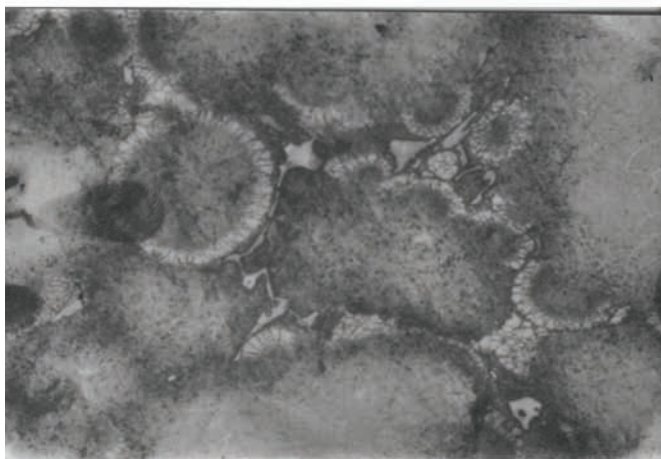
рование ветвей дендритов 1-го порядка происходит вдоль кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$, причем тех, которые образуют минимальный угол с вектором температурного градиента G в процессе НК. При этом ветви первого порядка в процессе НК выстраиваются параллельными рядами вдоль плоскостей $\{001\}$, декорируя тем самым пространственное положение этих плоскостей в отливке. Междендритное расстояние λ в рассматриваемом случае – это среднестатистическое расстояние между дендритными осями первого порядка, измеренное в кратчайшем направлении, то есть $\langle 001 \rangle$, и определяемое графически с помощью среднего расстояния λ_n на поперечном сечении слитка произвольной ориентации соотношением $\lambda_n = \bar{e}_n \cdot \cos \alpha$, где α – угол между плоскостью $\{001\}$, образовавшей след, и осью слитка [3, 4, 6].

Поскольку увеличение скорости кристаллизации влечет значительное повышение уровня ликвации элементов в сплаве, в структуре наблюдается появление обширных областей эвтектической высокотемпературной $\gamma'_{\text{эвт}}$ -фазы (рис. 1, а). Количество ее, определенное с помощью статистической металлографии по 10-ти полям зрения, составило 2-4 объемных % (%об.) при $V_{\text{кр}} = 5$ мм/мин и 6-8 %об. – при $V_{\text{кр}} = 10$ мм/мин. При повышении скорости кристаллизации заметно уменьшилось количество вторичной дисперсной γ' -фазы, локализованной в междендритных пространствах. Она измельчается, сохраняя преимущественно форму, близкую к сферической, меняя размеры от 0,4-0,6 до 0,2-0,3 мкм. Увеличение $V_{\text{кр}}$ сопровождается появлением в структуре большого количества частиц карбидной фазы шрифтовой морфологии MC-типа на основе титана, являющихся, как известно, термически менее устойчивыми по сравнению с дисперсными ограниченными MC-карбидами (рис. 1, б). Все вышеперечисленные фиксируемые металлографически количественные и морфологические изменения структурных элементов при повышении скорости кристаллизации являются следствием усиления степени неравновесности сплава, что, как показали испытания механических свойств, влечет за собой снижение уровня как длительной прочности, так и пластичности.

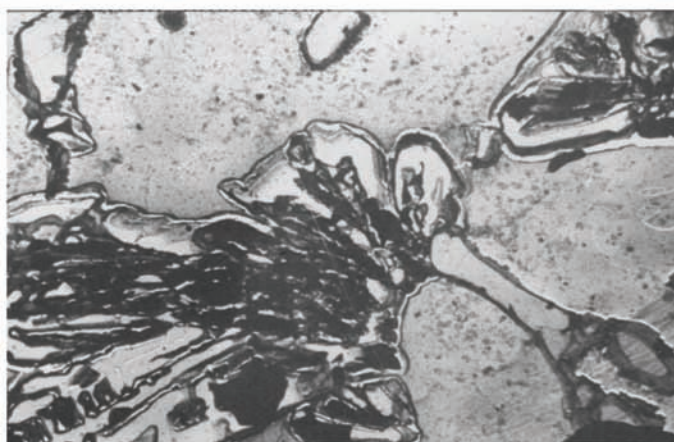
Решающая роль в формировании макро-, микроструктуры и фазового состава сплавов как в равноосном виде, так и особенно в НК-состоянии, принадлежит степени ликвационной способности элементов, составляющих легирующий комплекс. Согласно многочисленным литературным данным, из легирующих элементов основного комплекса модельного сплава максимальный коэффициент ликвации проявляет гафний (k может менять значение от 4,1 до 1,1 в зависимости от условий кристаллизации сплава и термообработки) [4, 6]. Согласно этим экспериментальным данным, приведенным в работе [6], объясняется тот факт, что, например, в жаропрочных сплавах, аналогичных базовому, но с более низким содержанием хрома, предназначенных для авиадвигателестроения (сплавы типа ЖС), количество выделяющейся при кристаллизации дисперсной упрочняющей γ' -фазы эвтектического состава (интерметаллидная фаза типа $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) при равноосной кристаллизации больше, чем при направленной. При этом установлено, что гафний не только сам сильно ликвирует в никелевых сплавах, но при этом еще изменяет направление ликвации молибдена на обратное и значительно усиливает отрицательную ликвацию кобальта и хрома, что может снизить термическую стабильность структуры сплава [4, 6].

Однако, учитывая многочисленные факты положительного влияния гафния на структуру и уровень свойств ряда отечественных и зарубежных жаропрочных сплавов (упрочнение твердого раствора, увеличение количества упрочняющих фаз, повышение температуры полного растворения ($T_{\text{н.р.}}$) γ' -фазы, возрастание высокотемпературной пластичности и т. п.), установленных, главным образом, для случаев равноосной кристаллизации, воздействие гафния на фазово-структурные характеристики исследуемых коррозионностойких модельных сплавов с высоким содержанием хрома, полученных в процессе НК, представляет особый интерес. Важное значение имеет то обстоятельство, что легирование гафнием сужает температурный интервал кристаллизации сплава, способствуя уменьшению протяженности твердо-жидкой зоны кристаллизующегося слитка [4, 6, 7].

Металлографический анализ базового (без гафния) и модельных (с 0,2 % Hf) сплавов показал, что при изучении микроструктуры после процесса НК можно

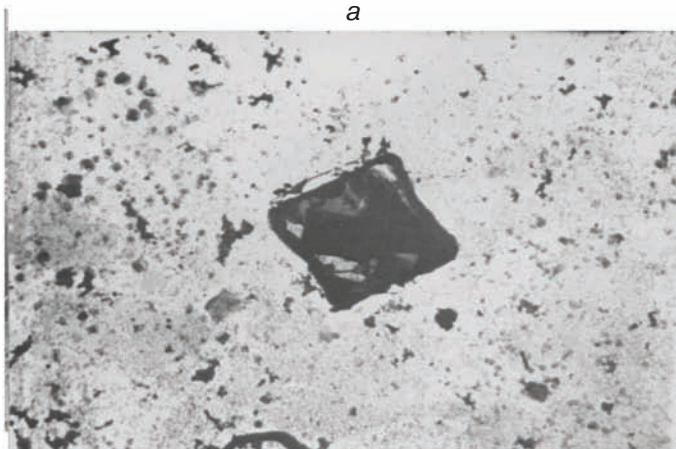


×500



×3000

a



×3000

б

Рис. 1. Микроструктура модельного сплава с гафнием после НК ($V_{кр}=10$ мм/мин): *a* – эвтектические выделения матрица/карбид $M_{23}C_6$; *б* – карбид MC-типа на основе титана (угольные реплики с экстракцией)

выделить несколько типов субзерен, а именно: субзерна, представляющие собой отдельные дендритные ветви в пределах одной колонии, размеры которой коррелируют с размерами последних, а разориентация составляет 0,5-1,0 градусов; субзерна, принадлежащие к различным ориентированным группам дендритных ветвей одного направления, имеющие размеры, сопоставимые с размерами отливки и с разориентацией между ними 1-3 градуса и, наконец, наиболее мелкие субзерна с размерами 20-30 мкм и разориентацией 20-30 градусов.

Сравнительно дисперсная (0,5-0,8 мкм) разновеликая γ -фаза округлой формы, представляющая интерметаллид $Ni_3(Al, Ti, W, Mo)$, заполняет междендритные пространства (рис. 2). Суммарное ее количество составляет 45-46 % (по массе) для обоих вариантов легирования. Количество карбидной фазы, представленное, главным образом, дисперсными ограненными частицами (1-2 мкм) MC-карбидов в виде «китайских иероглифов» на основе титана, гафния и ниобия, возрастает от 1,1 в сплавах без гафния до 1,4-1,6 %мас. в образцах с 0,2 % Hf. Достаточно высокий коэффициент ликвации гафния ($k_{Hf} = 1,2-2,4$) способствовал, как показали микрорентгеноспектральные исследования, пересыщению междендритных объемов сплава γ -образующими элементами, что должно приводить к значительному упрочнению межосных участков. Определили также, что введение гафния сопровождается некоторым уменьшением расстояния между осями дендритов. Возможно, это происходит за счет транскристаллитного роста дендритов. Так, в области контролируемого роста при $V_{кр} = 5$ и 10 мм/мин степень регулярности дендритной структуры удовлетворительная и на поперечном шлифе можно наблюдать, что дендриты представляются в виде «мальтийского креста» с расстоянием между осями дендритов $\lambda \approx 130-150$ мкм (рис. 2).

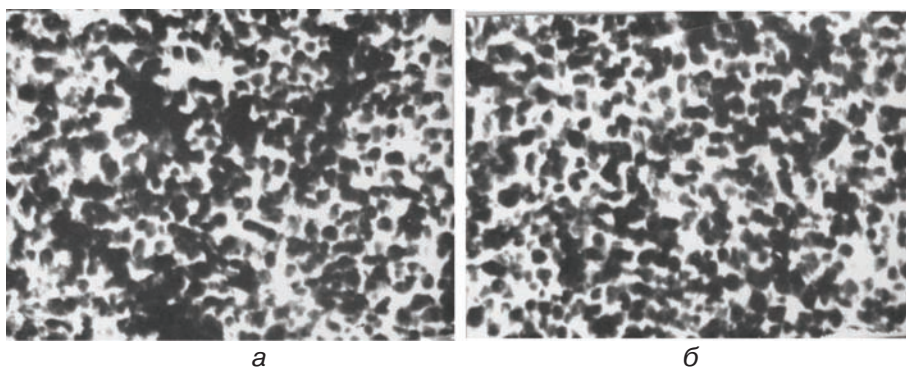


Рис. 2. Выделения упрочняющей γ -фазы $Ni_3(Al, Ti)$ (электронная микроскопия, угольные реплики с экстракцией) в модельном сплаве с гафнием после НК до (а) и после (б) гомогенизации, $\times 7000$

Таким образом, гафний в исследуемом сплаве способствует улучшению работоспособности материала как за счет повышения температуры полного растворения γ -фазы, так и благодаря упрочнению межосных участков матрицы большим объемом количеством стабильных дисперсных выделений MC-карбидов. Кроме того, было обнаружено, что введение гафния в базовый сплав приводит к образованию сложных карбидов типа M_6C , которые по данным микрорентгеноспектрального анализа содержат до 10 % Cr и до 2 % Hf. Появление этой фазы может снизить вероятность выделения в твердом растворе при длительном высокотемпературном воздействии на сплав охрупчивающих фаз типа σ и μ , что, по-видимому, связано с уменьшением растворимости элементов VI группы таблицы Менделеева.

Проведенный анализ влияния технологических параметров процесса направленного затвердевания и выбор оптимальной скорости кристаллизации, обеспечивающей формирование регулярной ориентированной структуры на модельных сплавах типа ХН6ОКМЮВТ без гафния и с 0,2% Hf, позволил перейти к выбору режима термической обработки сплавов с целью повышения их эксплуатационных характеристик.

Учитывалось, что время термической обработки, требуемое для растворения эвтектик γ/γ' , зависит от дендритных расстояний в сплаве – чем меньше λ и чем менее объемны островки γ/γ' , тем меньший промежуток времени требуется для гомогенизации, способствующей также частичному снижению уровня ликвационной неоднородности дендритных сегрегаций [4, 6]. В рассматриваемом случае, при $\lambda = 150-180$ мкм и среднем поперечном сечении островков γ/γ' – эвтектики 18-25 мкм в исходном состоянии до термообработки, оптимальное время гомогенизации составило 3 ч. Выбранный режим термической обработки приводил к растворению значительной части γ/γ' эвтектики. Так, до термообработки объемная доля эвтектики составляла 2,5-3,0 % объемных в сплавах с гафнием, после термообработки – 1,5-2,0 %, а средний диаметр островков γ/γ' -фазы уменьшался до 15-20 мкм. Одновременно повышалась и объемная доля дисперсной γ' -фазы, сопровождаемая измельчением ее частиц до 0,2-0,5 мкм (рис. 2, б).

Выводы

С целью установления влияния технологических параметров процессов кристаллизации на такие характеристики сплавов, как внутризеренная структура, состав и морфология упрочняющих фаз, связанные с коэффициентами ликвации элементов в равноосном и направленно закристаллизованном состояниях, проведены серии экспериментов с варьированием скорости кристаллизации на 2-х уровнях: 5 и 10 мм/мин и градиентом температур на фронте кристаллизации 15-20 °С / см для базового (без гафния) и модельного (с 0,2 % Hf) сплавов типа ХН60КМЮВТ.

Показано, что с увеличением скорости кристаллизации отливок от 5 до 10 мм/мин и при введении в базовый сплав 0,2 % Hf, происходит измельчение дендритной структуры, увеличивается объемное содержание интерметаллидной упрочняющей γ' -фазы с одновременным уменьшением размеров ее частиц и среднего поперечного сечения островков γ/γ' -эвтектики, а также возрастает количество дисперсных карбидов МС-типа в междендритных пространствах.

Таким образом, гафний в исследуемом типе сплавов способствует улучшению работоспособности материала как за счет повышения температуры полного растворения γ' -фазы, так и благодаря упрочнению межосных участков матрицы большим объемным количеством более стабильных дисперсных выделений МС-карбидов.

В качестве материала оболочковых форм применялась многослойная керамика на основе электрокорундовой суспензии с модификаторами, повышающими термическую прочность форм. В качестве стержней для формирования внутренней полости лопатки были опробованы как стержни на основе корунда, так и на основе циркона, модифицированного кремнием и комплексным модификатором Al+Si.



Список литературы

1. Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагел У. К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: Пер. с англ. / Под ред. Р. Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – Т. 1. – 384 с.
2. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД / Под ред. С. И. Яцка. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
3. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. А. Т. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. – М.: Машиностроение, 1997. – 460 с.
4. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
5. Симановский В. М. Термический анализ формовочных и огнеупорных смесей на основе корунда // Металл и литье Украины. – 2006. – № 11-12. – С. 19-21.
6. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1987. – 258 с.
7. Королева М. М., Лобашев А. Г., Шевелев Ю. П. Организация режимов высокоскоростной направленной кристаллизации газотурбинных лопаток // Литейн. пр-во. – 2001. – № 2. – С. 24 - 27.

Поступила 27.01.2010