



Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации

Е.Н. Каблов

профессор, член-корреспондент РАН

Январь 2000

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Газотурбинные технологии», № 3, 2000 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации

Е.Н. Каблов

Всероссийский институт авиационных материалов

Жаропрочные никелевые сплавы являются основным материалом для литья лопаток современных перспективных газотурбинных двигателей.

Изучение механизмов деформации жаропрочных сплавов в процессе ползучести при высоких температурах, а также анализ причин эксплуатационных разрушений лопаток в условиях воздействия статических, циклических и термоциклических напряжений показывают, что разупрочнение материала обусловлено в первую очередь такими структурными элементами, как границы зерен и присущей литью микропористостью. В процессе воздействия температур и внутренних напряжений происходит накопление дефектов в этих областях, что приводит к возникновению микротрещин усталостного, термоусталостного и статического характера и к последующему разрушению лопаток. Применение в технологии изготовления турбинных лопаток метода направленной кристаллизации (НК) исключает из отливок турбинных лопаток поперечные границы зерен или границы зерен вообще, повышая механические характеристики жаропрочных сплавов. В первом случае в отливке создается столбчатая структура зерен, параллельных оси действующих напряжений, во втором – отливка формируется в виде монокристалла. Механические свойства некоторых отечественных жаропрочных сплавов представлены в таблице.

Характерный график зависимости ростовой структуры жаропрочного сплава типа ЖС-32, построенный в координатах G_x-R , представлен на рис. 1. Заштрихованная область соответствует росту направленной или монокристалльной структуры без струйчатой ликвации.

Свойства литейных жаропрочных сплавов

Сплав	Длительная прочность, МПа			Предел усталости, σ_{-1} на базе 2×10^7 циклов, МПа	
	$\sigma_{100/1000}^{900}$	$\sigma_{100/1000}^{1000}$	$\sigma_{100/1000}^{1100}$	20°C	900°C
ЖС6У РК	350/250	170/100	–	140	290
ЖС26 ВНК	400/280	200/120	90/55	250	350
ЖС32 ВНК	475/380	250/165	125/75	250	350
ЖС30 НК моно <001>	420/320	220/145	120/80	330	310
ЖС36 ВНК моно <001>	480/360	255/165	140/90	330	360
ЖС40 НК моно <001>	440/315	240/165	140/80	320	380
ЖС32М* <001>	510/–	260–270/–	160/–	–	–
ЖС50М* <001>	540–550/–	300–320/–	160–180/–	–	–
ЖС55М* <001>	590–600/–	350–360/–	180–190/–	–	–

Принятые сокращения: в числителе приведены типичные свойства сплавов на базе 100 ч, в знаменателе – на базе 1000 ч; РК – равноосная кристаллизация; НК – направленная кристаллизация; ВНК – высокоградиентная направленная кристаллизация;

* Сплавы ЖС32М, ЖС50М, ЖС55М – опытные монокристалльные сплавы, легированные, соответственно, 4, 6 и 9% рения.

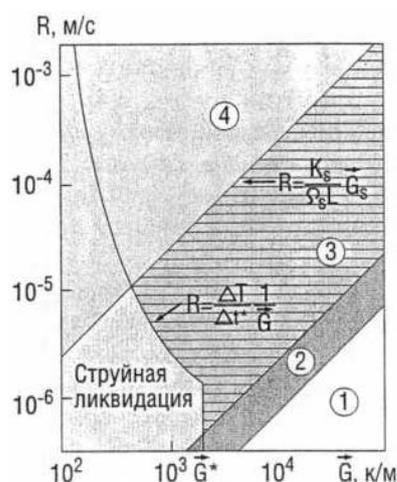


Рисунок 1. График зависимости типа ростовой структуры от G_x и R :
 1 – плоский фронт; 2 – ячеистый фронт; 3 – ячеисто-дендритный фронт;
 4 – равноосная кристаллизация

Методом НК можно получить различные типы структур отливок турбинных лопаток ГТД.

Первый тип – отливки с направленной структурой, сформированные из столбчатых зерен, направленных параллельно вертикальной оси лопатки. С учетом морфологии формирующих их кристаллов эти отливки можно разделить на две группы.

Первая группа – отливки, состоящие из множества столбчатых зерен с

поперечным размером до 2–5 мм (рис. 2, а).

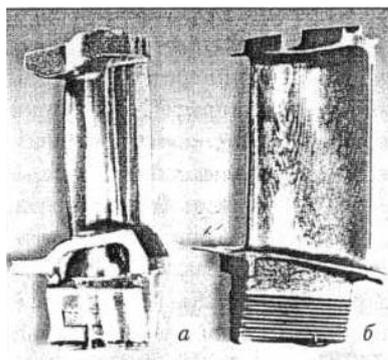


Рисунок 2. Турбинные лопатки ГТД, выполненные методом направленной кристаллизации: а – лопатка с однонаправленной столбчатой структурой; б – монокристаллическая лопатка ориентации [001]

Для их получения в основании стартовой зоны отливки создаются условия для множественного зарождения зерен, что достигается использованием форм, дном которых является водоохлаждаемый холодильник. При заливке металла в такую форму в момент контакта расплава с холодильником создаются высокие скорости охлаждения ($\sim 1000\text{--}3000^\circ\text{C}/\text{мин}$), обеспечивающие зарождение зерен размером ~ 100 мкм. Этот способ нашел широкое применение в зарубежной технологии (фирмы «Pratt-Whitney», «General Electric», «Rolls-Royce»).

Скорость роста зерен в печах такого типа обычно равна скорости вытягивания формы из нагревателя и составляет $\sim 3\text{--}3,5$ мм/мин. Для увеличения ростовых градиентов температуры в основании нагревателя используется система экранов или диафрагм. Недостаток такого способа получения отливок связан с трудностью обеспечения плотного контакта основания керамической литейной формы с медным холодильником.

Вторая группа отливок с направленной структурой сформирована несколькими (обычно 3–5) крупными направленными зёрнами произвольной кристаллографической ориентации. При проведении НК отливки изготавливаются в литейных формах с керамическим дном, в которых скорость теплоотвода в момент заливки невелика, мала и скорость зародышеобразования кристаллов. В основном происходит образование одного зерна, т.е. отливка лопатки получается монокристаллической с

произвольной кристаллографической ориентацией. Отливки данного типа характеризуются разбросом механических свойств, являющихся следствием ориентационной зависимости механических свойств отдельных кристаллов. Однако некоторый разброс значений прочностных характеристик компенсируется упрощением технологии НК при использовании литейных форм с керамическим дном. Данная технология используется на отечественных серийных установках НК проходного типа ПМП-2 с производительностью 10–12 отливок турбинных лопаток в час (рис. 3).

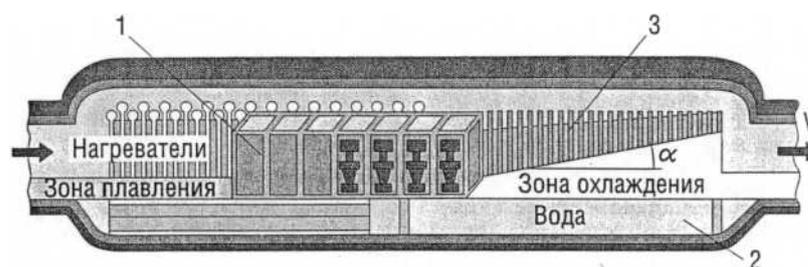


Рисунок 3. Схема проходной печи направленной кристаллизации типа ПМП-2: 1 – опоки с литейными формами; 2 – водоохлаждаемый холодильник; 3 – нагреватель зоны кристаллизации

Литейный блок из 2–4 лопаточных форм помещается в графитовую опоку с засыпкой из графитовой крошки. Опоки с формами через шлюзовую камеру подаются в рабочий объем установки и перемещаются по горизонтальной графитовой направляющей, проходя последовательно зоны предварительного нагрева, зону плавления шихтовой заготовки и заливки расплава в форму. Затем форма с расплавом попадает в зону кристаллизации, где расположен водоохлаждаемый холодильник, являющийся продолжением графитовой направляющей, и нагреватель, высота которого уменьшается по длине холодильника. Пройдя зону кристаллизации, опока с полученной отливкой через шлюзовую камеру выводится из печи НК.

В установках типа ПМП-2 формирование структуры проходит при скорости роста зерен ~3 мм/мин. В результате во многих случаях на отливках лопаток из сплавов ЖС6Ф, ЖС30 наблюдаются дефекты в виде полос струйчатой ликвации.

ВИАМ разработал способ интенсифицирования теплоотдачи от литейной

формы. В установке УВНК-8П охлаждение блоков литейных форм осуществляется погружением их в расплав алюминия, находящегося в специальной емкости (кристаллизаторе), расположенной под нижним срезом двухзонного нагревателя (рис. 4). Повышение интенсивности теплоотвода позволяет повысить скорость роста зерен до 10 мм/мин. В связи с этим такой процесс направленной кристаллизации называют высокоскоростным (ВНК). Из-за повышения скорости роста зерен достигается высокая производительность процесса (12–18 лопаток за одну плавку).

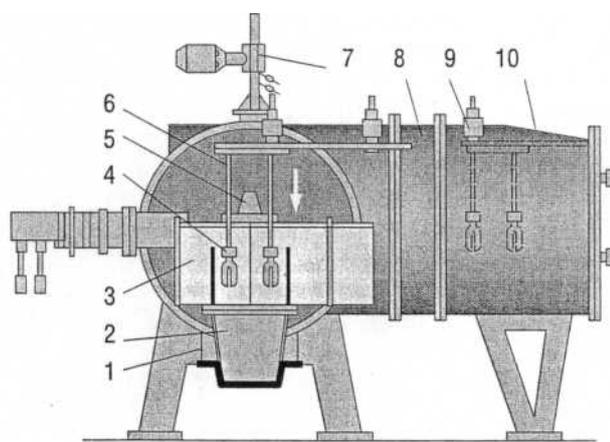


Рисунок 4. Схема печи направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем: 1 – корпус печи; 2 – ванна с расплавленным алюминием; 3 – нагреватель; 4 – оболочковые формы; 5 – плавильная печь; 6 – подвески форм; 7 – механизм вертикального перемещения форм; 8 – вакуумный затвор; 9 – механизм горизонтального перемещения форм; 10 – шлюзовая камера

В настоящее время созданы новые типы промышленных установок высокоскоростной направленной кристаллизации УВНК-9, УВНК-12, предназначенные, в частности, для литья крупногабаритных турбинных лопаток стационарных ГТУ длиной до 500 мм.

За счет увеличения скорости охлаждения в процессе ВНК происходит уменьшение размеров структурных составляющих материала, уменьшается размер дендритной ячейки λ (расстояние между осями дендритов):

- для низкоградиентных установок ПМП-2 $\lambda_{[001]}=450-500$ мкм;
- для установок типа УВНК-8П величина $\lambda_{[001]}=250-300$ мкм;
- для экспериментальных печей с охладителем – расплавом олова

$\lambda_{[001]}=180-200$ мкм (рис. 5).

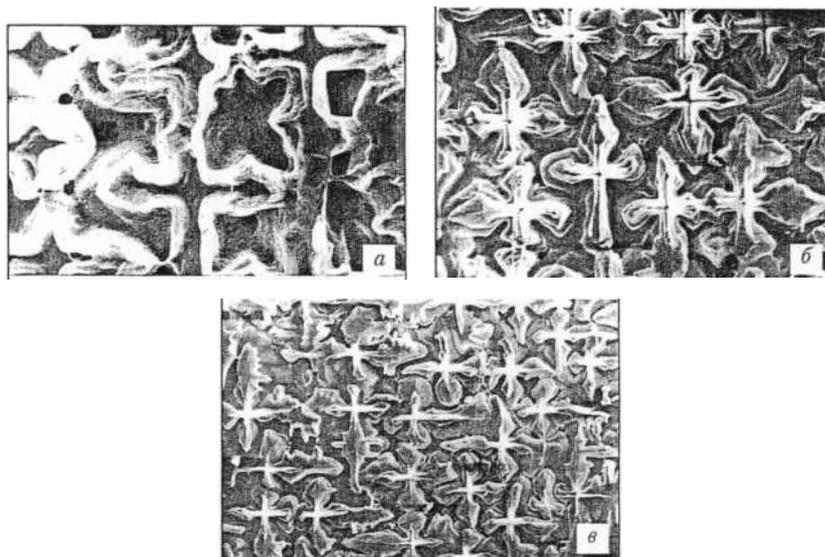


Рисунок 5. Дендритная структура отливок с ориентацией [001], полученная: *а* – в печи ПМП-2; *б* – в печи УВНК-8П; *в* – в опытной высокоградиентной установке типа ВИАМ-1790

Отливки с более мелкой структурой отличаются высокими прочностными свойствами в литом состоянии, высокими характеристиками циклической прочности.

Второй тип отливок, получаемых методом НК, – отливки турбинных лопаток с монокристалльной структурой (рис. 2, б). Получение таких лопаток стало следующим этапом в совершенствовании структуры жаропрочного сплава, когда из нее полностью были исключены большеугловые границы зерен. Повышение эксплуатационных характеристик, кроме того, достигается за счет оптимальной кристаллографической ориентации монокристалльной структуры относительно действующих в лопатке механических и термических напряжений и совершенствования композиций сплавов. Создан новый класс монокристалльных жаропрочных сплавов, не содержащих в своем составе элементов-упрочнителей границ зерен – бора, циркония, углерода. Эти сплавы (отечественные – ЖС30М, ЖС36, ЖС40, зарубежные – CMSX2, 4, 10) предназначены только для получения монокристалльных отливок. В них реализованы системы легирования и термообработки, обеспечивающие значительное повышение прочностных характеристик по

сравнению со сплавами традиционного легирования (см. таблицу).

Технология монокристалльного литья, широко применяемая за рубежом, основана на отборе одного кристалла с помощью специальных кристаллоотборников из множества столбчатых зерен с аксиальной текстурой [001]. Наиболее распространенная конструкция кристаллоотборника представляет собой спиральный литниковый ход. Он расположен в форме, находящейся между стартовой полостью, где формируется столбовая структура зерен, и полостью самой отливки. Технология позволяет получать только отливки в ориентации [001] с точностью $\alpha_{[001]}=10-15^\circ$. Азимутальную ориентацию так же, как и отличные от [001] аксиальные ориентации, регламентировать в данной технологии практически невозможно.

Отечественная технология получения монокристалльных отливок, разработанная в ВИАМ, основана на использовании затравок с температурой плавления на $120-150^\circ\text{C}$ выше, чем температура ликвидус жаропрочного сплава отливки. Для этой цели используется бинарный сплав никеля с вольфрамом, т.к. легирование вольфрамом в области γ -твердого раствора обеспечивает повышение температуры плавления никеля до $\sim 1520^\circ\text{C}$. Затравочный метод позволяет получить отливки любой заданной ориентации – как аксиальной, так и азимутальной.

Анализ серийной технологии монокристаллического литья в печах УВНК-8П с применением никелево-вольфрамовых затравок показал, что наряду с лопатками достаточно высокой для дендритно-ячеистой структуры степенью совершенства ($\Delta\alpha_{[001]}=1,0-1,5^\circ$) встречаются лопатки с расширенным рентгеноструктурным рефлексом, состоящим из нескольких пиков (рис. 6, а). Наличие «сложных» рефлексов указывает на присутствие в отливке фрагментов, блоков или субзерен, сравнимых по размеру с размерами самой отливки. Величина $\Delta\alpha$ в таких монокристаллах может достигать $3-5^\circ$. Следует отметить, что разориентация в таких пределах незначительно сказывается на эксплуатационных характеристиках лопаток.

Так, например, по техническим условиям зарубежных фирм в монокристаллических отливках допускается разориентация блоков или субзерен $\Delta\alpha=6-8^\circ$.

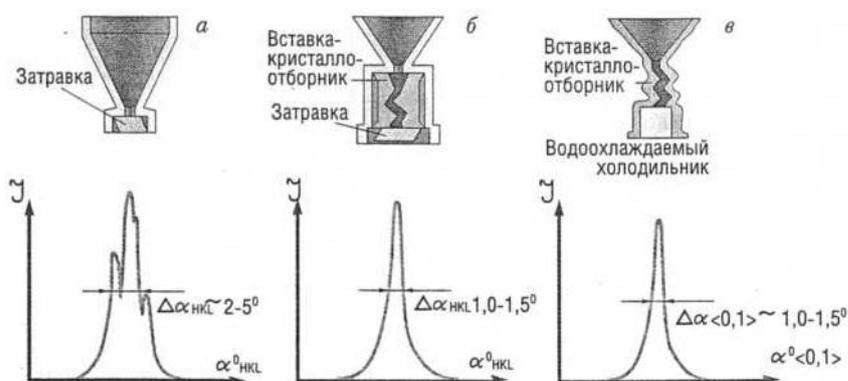


Рисунок 6. Конструкция стартовой зоны формы для монокристалльного литья: *а* – с применением затравки из сплава никеля и вольфрама; *б* – комбинированный метод затравка-кристаллоотборник; *в* – метод отбора

Исследования механизма возникновения разориентации на стадии зарождения показали, что разориентация возникает в результате образования на рабочем торце затравки налетов оксидного характера при нагреве формы под заливку в ППФ. В результате контакт расплава металла и затравки становится неполным, что и ведет к возникновению крупных субзерен. Кроме того, в отливке может наследоваться блочность самого затравочного кристалла.

С учетом вышеизложенного была предложена комбинированная технология, в которой используется затравка из сплава никеля и вольфрама и кристаллоотборник типа «геликоид». Ожидалось, что такая технология сохранит все преимущества затравочной технологии и обеспечит получение совершенной монокристалльной структуры, характерной для метода отбора. При разработке конструкции кристаллоотборника учитывались технические требования к нему, а также особенности, которые возникают при его совместной работе с затравкой. Во-первых, в отличие от зарубежной технологии, когда отбирается одно зерно из множества столбчатых зерен, в данном случае необходимо отобрать одно субзерно из затравочного кристалла, если последний оказывается блочным. Во-вторых,

кристаллоотборник должен предотвратить или хотя бы существенно уменьшить интенсивность образования на поверхности затравки пленок-конденсатов. И, наконец, в-третьих, конструкция и размеры кристаллоотборника должны органично вписаться в габариты отработанной конструкции литейной формы, с минимальной переделкой последней.

На рис. 6, б представлена конфигурация затравочной полости литейной формы, выполненной по комбинированному варианту. Над затравкой располагается полость для размещения кристаллоотборника. Сам кристаллоотборник представляет собой цилиндрическую вставку диаметром ~8–10 мм и высотой ~10–12 мм, в центре которой выполнен спиральный литниковый ход диаметром 1,8–2,0 мм. Эта вставка выполняется из керамических масс методом прессования с последующим обжигом. Вставка-кристаллоотборник устанавливается в форму, затем на нее помещается затравка, которая фиксируется керамической массой.

Результаты внедрения показали, что «комбинированная» технология монокристалльного литья обеспечивает высокий выход годных деталей за счет повышения структурного совершенства, зародившегося от затравки монокристалла, что подтверждается достаточно малой для дендритно-ячеистой структуры угловой шириной рентгеновского рефлекса от него (рис. 6, б, в).

Таким образом, в результате комплекса научно-технических работ, проведенных ВИАМ совместно с другими двигателестроительными предприятиями авиационной промышленности, были разработаны жаропрочные сплавы, созданы промышленные установки и технологии получения турбинных лопаток с направленной и монокристалльной структурой для современных авиационных ГТД и стационарных ГТУ. Кроме того, в институте проводятся работы по созданию технологии производства лопаток с новыми высокоэффективными системами охлаждения транспирационного типа.