

изводство, обеспечить их экономию и снизить стоимость жаропрочных суперсплавов нового поколения на 40–50% без снижения их качества; технология не имеет отечественных аналогов, защищена Патентом РФ.

Разработанные технологии по производству жаропрочных суперсплавов нового поколения реализованы на созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе по изготовлению литых прутковых заготовок жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для литья лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами. Данный комплекс включает в себя ряд отдельных участков, оборудованных современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество изготавливаемой продукции на уровне мировых стандартов.

На созданном в ВИАМ научно-производственном комплексе – помимо выплавки жаропрочных суперсплавов нового поколения – производят также переработку отходов серийных литейных жаропрочных сплавов, поступающих с моторостроительных и ремонтных заводов.

К настоящему времени на моторостроительные авиационные предприятия поставлено свыше 250 т литых прутковых заготовок сплавов ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ЖСЗДК-ВИ, ВХ4Л-ВИ, изготовленных с применением 100% отходов этих предприятий. Поставленные сплавы успешно использованы при отливке ответственных деталей современных ГТД.

*Е.Н. КАБЛОВ, В.Н. ТОЛОРАЙЯ*

## **ВИАМ – ОСНОВОПОЛОЖНИК ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД И ГТУ**

### *Применение монокристаллической структуры в турбинных лопатках ГТД из никелевых жаропрочных сплавов*

Создание в середине 40-х годов в Англии первого дисперсионно-твердеющего сплава Nimonic 80 для изготовления рабочих лопаток газовых турбин методом штамповки открыло новую главу в развитии жаропрочных материалов на никелевой основе. Открытие второй главы в истории этих материалов принадлежит СССР, когда в ВИАМ академиком С.Т. Кишкиным было предложено и реализовано решение о применении для лопаток ГТД литейных жаропрочных сплавов, определившее дальнейшее развитие авиационной техники. Были разработаны первые литейные жаропрочные никелевые сплавы ЖС3, ЖС6 и ЖС6К, позволившие создать литые лопатки ГТД и показать их преимущество перед деформированными. Одновременно была предложена гетерофазная теория жаропрочности, что позволило разработать основные положения теории легирования жаропрочных сплавов и практики их применения.

Дальнейшее повышение жаропрочности можно было достигнуть только переходом на изготовление лопаток методами точного литья по выплавляемым моделям. Следует отметить, что данная технология является в настоящее время практически единственным способом получения охлаждаемых лопаток, конфигурация внутренней полости которых имеет сложную геометрию. Это новое направление в развитии жаропрочных

сплавов для изготовления рабочих лопаток газовых турбин в дальнейшем было принято в США, Англии и других странах.

В 1946 г. на семинаре по проблеме длительной высокотемпературной прочности кобальтовых сплавов профессор Н. Грант говорил о том, что поскольку «в этих материалах происходит межзеренное разрушение, то желательно иметь сплавы с единственными зерном. Кроме того, если можно было бы управлять ориентацией этого зерна, то открылась бы перспектива создания самых прочных сплавов. К сожалению, в настоящее время управлять ориентацией зерна невозможно, и ориентация является вероятностной функцией». В то же время Н. Грант ввел понятие эквикогезивной температуры, выше которой разрушение поликристаллических жаропрочных сплавов в процессе ползучести происходит по границам зерен, перпендикулярным оси приложения нагрузки.

Позднее этот механизм получил экспериментальное подтверждение в работах академика С.Т. Кишкина, показавшего, что никелевый жаропрочный сплав ЭИ437 разрушается по границам зерен, ориентированным перпендикулярно оси внешней нагрузки, причем трещины на таких границах зарождаются уже в начале второй стадии ползучести. Именно это последнее обстоятельство и позволило сделать вывод о возможности значительного повышения длительной прочности за счет «удаления» из структуры материала поперечных составляющих границ зерен. Понятно, что если бы разупрочнение по указанным областям происходило бы в конце второй или на третьей стадии крипа, то выигрыш от устранения поперечных составляющих был бы значительно меньшим, а достаточно сложные технологические приемы достижения этой цели себя бы не оправдали. Отсюда следовал вывод о том, что для повышения длительной прочности никелевых жаропрочных сплавов должна быть сформирована столбчатая структура, при которой границы зерен параллельны направлению главных напряжений.

Данная цель была достигнута применением в технологии литья лопаток направленной кристаллизации (метод Бриджмена–Стокбаргера, разработан П. Бриджменом в 1925 г., усовершенствован Д. Стокбаргером в 1936 г.), позволяющей сформировать в отливке монокристаллическую структуру, состоящую из столбчатых зерен, границы которых в основном параллельны направлению главных растягивающих напряжений. Впервые такая столбчатая структура в отливках никелевых жаропрочных сплавов была получена в США Ф.Л. Фершнайдером и Р.В. Гуардом. Началом разработки промышленной технологии направленной кристаллизации отливок лопаток ГТД из жаропрочных сплавов в США можно считать середину 60-х годов, а в СССР – конец 60-х годов XX века.

#### ***Первые эксперименты по получению монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов (конец 60-х–начало 70-х годов)***

Разработка отечественной технологии монокристаллического литья жаропрочных сплавов началась в конце 60-х годов в ВИАМ в лаборатории физики металлов, возглавляемой академиком С.Т. Кишкиным, под непосредственным руководством проф. Д.А. Петрова и чл.-кор. А.Т. Туманова. Для этой цели в лаборатории был организован специальный сектор монокристаллического литья, оснащенный исследовательской аппаратурой (установки для рентгеноструктурного анализа, электронный

микроскоп, рентгеновский микроанализатор). Это позволяло достаточно оперативно проводить эксперименты по получению монокристаллических отливок, а также вести исследование их ростовой структуры. Параллельно в этой области велись работы в Московском авиационно-технологическом институте под руководством проф. А.А. Бухановой.

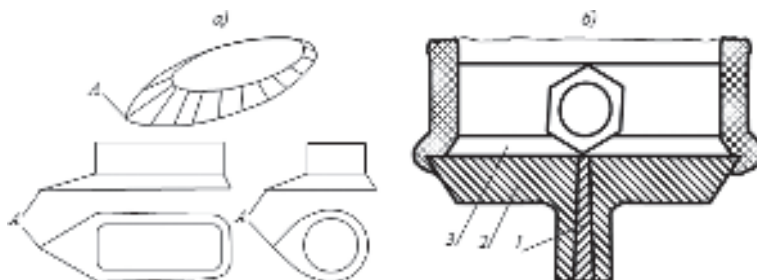
Первые эксперименты проводились на переделанной под метод Бриджмена установке РЕДМЕТ-4, исходно предназначенной для получения монокристаллов полупроводникового кремния методом Чохральского. Первоначально монокристаллы никеля и его сплавов отливались в керамических тиглях из оксида алюминия с плоским дном, изготавливаемым по технологии, разработанной И.Д. Абрамсоном и И.М. Демонисом. Монокристаллы отливались из сплавов с последовательным усложнением химического состава – сначала Ni–Al, затем Ni–Al–Cr, Ni–Al–Cr–W и далее до полного состава сплава MAR-M 200, из которого в США были получены первые монокристаллы.

Большого практического значения данные эксперименты не имели, однако позволили провести исследование монокристаллической структуры никелевых сплавов с дендритно-ячеистой структурой, разработать методики травления для выявления микроструктуры и методики определения кристаллографической ориентации. Кроме того, на этой установке в 1969 г. была получена первая в СССР монокристаллическая лопатка произвольной кристаллографической ориентации.

Следует отметить, что в этих экспериментах разработчики неожиданно столкнулись с таким явлением как пригар (т.е. с интенсивным взаимодействием «расплав–керамика»), который наблюдался при введении в сплав всего 0,12–0,15% углерода. Ранее взаимодействие «расплав–керамика» связывали в основном с наличием хрома в жаропрочном сплаве.

В начале 70-х годов были опубликованы данные, из которых следовало, что монокристаллические отливки в США в фирме «Pratt & Whitney» получают методом отбора одного зерна из множества столбчатых, образующихся при заливке расплава в форму, дном которой служил медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Дальнейший рост монокристаллической структуры осуществлялся последовательным снижением мощности многосекционного нагревателя (метод «Power Down»). Рассмотрев все достоинства и недостатки зарубежной технологии, Д.А. Петров отказался от ее копирования. За основу им была взята технология формирования структуры с помощью затравки – за счет вытягивания формы с расплавом из нагревателя установки направленной кристаллизации на подвижном водоохлаждаемом штоке (холодильнике). В США через некоторое время также отказались от метода «Power Down», несмотря на то, что установки для его осуществления намного проще в устройстве, и также перешли на формирование структуры с помощью затравки (метод HRS – high rate solidification).

Кроме этого, Д.А. Петров совместно с А.Т. Тумановым разработали способ получения монокристаллов, основанный на результатах исследований структуры монокристаллов никелевых сплавов, полученных в керамических тиглях или формах с плоским дном. Способ заключался в том, что зарождение монокристалла – самопроизвольное или от затравки – происходит в специальной полости, выполненной в основании



**Рис. 1.** Конфигурация стартовых козырьков при получении монокристаллов методом Петрова–Туманова (*а*; *А* – точка максимального переохлаждения расплава) и схема подвода затравки к двум козырькам (*б*; *1* – затравка; *2* – форма; *3* – козырьки)

формы и имеющей вид усеченного конуса переменной конусности – «стартовый козырек» (рис. 1, *а*).

При подводе холодильника-кристаллизатора к основанию конуса наибольшее переохлаждение расплава происходит в тонких кромках конусного козырька. Очевидно, максимальное переохлаждение будет в точке *А* контура, наиболее удаленной от центра. В дальнейшем монокристаллический зародыш, возникший в точке *А*, растет по наиболее переохлажденным участкам расплава в кромке стартового козырька и «обегает» его. Одновременно с этим монокристаллическая структура распространяется по дну конусного козырька от периферии к центру. На рис. 2 показан продольный шлиф стартового козырька с ориентацией [001], где видно прорастание структуры в радиальном направлении от его кромки.

Модели слитков или лопаток собирались на специальной подставке («подножие») из керамики, выполненной методом прессования, что обеспечивало точность ее размеров (рис. 1, *б*). В центре располагался затравочный карман с монокристаллической затравкой из сплава отливки длиной 40–45 мм конической формы (см. рис. 1, *б*).

Следует отметить, что аналогичная картина зарождения и распространения монокристаллической структуры наблюдалась академиком А.В. Шубниковым при кристаллизации капли концентрированного водного раствора  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . При этом было отмечено, что «обегание» зародышем контура капли происходит приблизительно в 50 раз быстрее, чем рост кристалла от периферии к центру.

Для осуществления способа Петрова–Туманова были созданы опытные установки направленной кристаллизации (НК) ВИАМ-1604 и ВИАМ-1790 (конструктор – А.С. Шалимов). На этих установках проводилась обработка основных температурно-скоростных параметров процесса направленной кристаллизации. Конструкция теплового узла печи В-1604 показана на рис. 3.



**Рис. 2.** Дендритная структура продольного сечения козырька монокристалла с ориентацией [001]

Отливки с заданной кристаллографической ориентацией можно получить, используя затравочный кристалл. Для этой цели в точку *А* подводят затравку. Конфигурация стартовой полости

литейной формы с подведенной к ней затравкой также показана на рис. 1, где монокристаллическая затравка 1, изготовленная из того же сплава, что и отливка, расположена в донной части формы 2, которая соединяется с точкой соприкосновения двух стартовых козырьков 3.

В установках для направленной кристаллизации литейная форма предварительно нагревается до температуры, превышающей на 100–150°C температуру ликвидус  $T_L$ , поэтому затравка неизбежно должна расплавиться до заливки металла в форму. Надежная передача структуры от затравки к изделию осуществляется только в том случае, когда верхний торец ее полностью расплавлен, а остальная часть остается твердой. Выполнить это условие достаточно сложно, так как жаропрочные сплавы имеют весьма широкий интервал кристаллизации, поэтому на затравке должен быть создан осевой температурный градиент. В частности, вышеуказанный способ получения монокристаллов предусматривал для этой цели специальный холодильник (8, см. рис. 3), который представляет собой подвижный водоохлаждаемый экран затравки, предохраняющий ее нижнюю часть от расплавления. Литейная форма 1 со стартовым козырьком 2 и затравкой 3 подвешена на верхнем штоке 4 внутри нагревателя 5. Затравочная полость формы вместе с затравкой частично находится внутри трубчатого молибденового экрана 6, установленного на водоохлаждаемом подвижном штоке 7, который проходит через холодильник формы 8 и имеет независимую от него систему передвижения. Поскольку зазоры между экраном и затравочной частью литейной формы составляют 2,5–3 мм, последнюю необходимо изготовлять с высокой степенью точности. Методами выплавляемых моделей такую точность внешних размеров получить не удастся, поэтому дно формы и полость для затравки изготовляют методом прессования.

Рекомендовать такую схему для промышленной установки НК, естественно, было невозможно. Малейшая неточность при подвеске формы и ее центровке привела бы к разрушению затравочного кармана, пробоем формы, при этом заливались бы расплавом и затравочный холодильник, и основной шток с холодильником, и, естественно, установка надолго выходила из строя. Однако на этой установке были определены основные температурно-скоростные параметры процесса НК по способу Петрова–Туманова и получены первые крупные монокристаллические отливки с ориентацией [001] – прямоугольные слитки (20 × 40 × 160 мм),

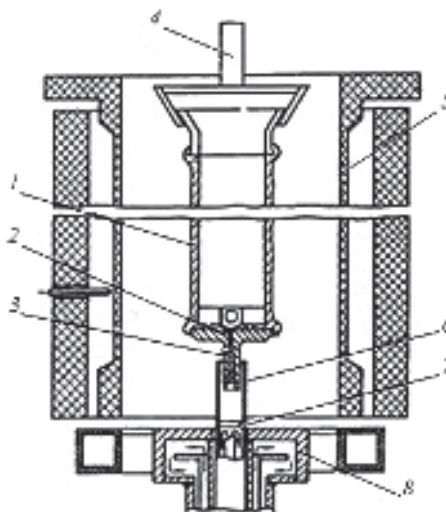
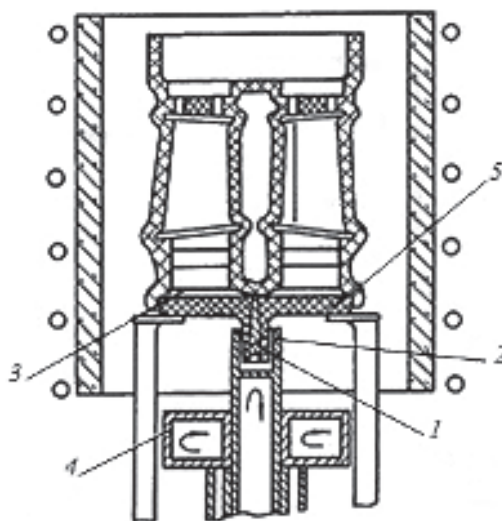


Рис. 3. Схема теплового узла экспериментальной установки для литья монокристаллов ВИАМ-1604:

1 – форма; 2 – стартовый козырек; 3 – затравка; 4 – верхний шток; 5 – нагреватель; 6 – экран затравки; 7 – шток затравки; 8 – холодильник формы





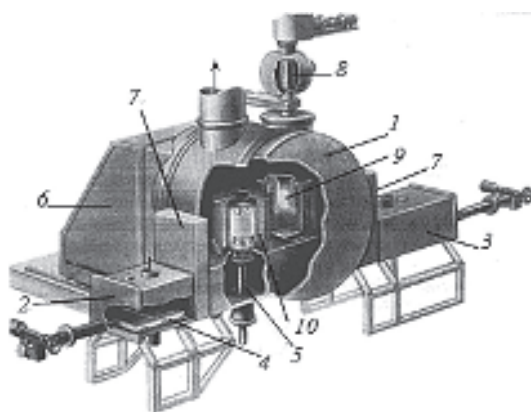
**Рис. 4.** Схема получения монокристаллических лопаток методом Петрова-Туманова в печи В-1790 и установке 1ИСВ-0,01-НФ:  
1 - заправка; 2 - экран заправки; 3 - стартовый козырек; 4 - кристаллизатор; 5 - керамическое подножие формы

с помощью которых определили основные прочностные характеристики. В этих работах активное участие принимали А.В. Рогов, А.В. Яковлева.

Следует отметить, что помимо отработки режимов получения монокристаллов проводилась отработка методов контроля монокристаллических отливок (А.И. Кривко и И.А. Игнатова).

Прототипом промышленной установки послужила печь В-1790. Литейная форма в этой печи не подвешивалась на верхнем штоке установки, а устанавливалась на специальной подставке, что надежно ее фиксировало. Такая же схема была выбрана для промышленной печи полунепрерывного действия (рис. 4).

#### **Разработка и внедрение технологии монокристаллического литья на Куйбышевском моторном заводе (КМЗ) в середине 70-х-начале 80-х годов**



**Рис. 5.** Общий вид установки для направленной кристаллизации 1ИСВ-0,01-НФ:  
1 - плавильная камера; 2, 3 - камеры для загрузки и выгрузки форм; 4 - тележка для перемещения форм; 5 - холодильник; 6 - подвижная часть электропечи; 7 - вакуумные затворы; 8 - загрузочная корзина; 9 - плавильная печь; 10 - индукционный нагреватель

Внедрение технологии монокристаллического литья по способу Петрова-Туманова проводилось на Куйбышевском моторном заводе (КМЗ), возглавляемом Генеральным конструктором Н.Д. Кузнецовым. Для этой цели институтом ВНИИЭТО по техническому заданию ВИАМ была спроектирована установка 1ИСВ-0,01-НФ (рис. 5), которая была снабжена шлюзовыми камерами загрузки и выгрузки, что позволяло вести процесс в полунепрерывном режиме. В шлюзовых камерах находились тележки, передающие литейную форму на опорный стол в рабочей камере, с помощью которого форма поднималась в индук-

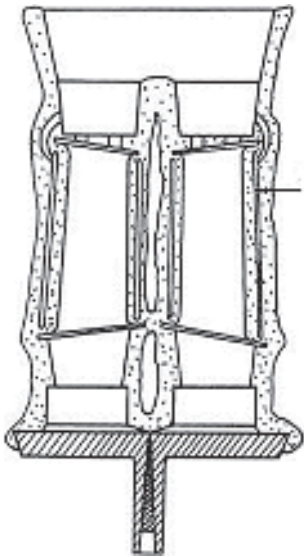
ционный нагреватель  $\varnothing 280$  мм. После расплавления шихтовой заготовки в отдельной индукционной печи и заливки расплава в форму, зарождение и рост монокристалла в стартовой полости осуществлялся путем программированного подвода холодильника к основанию формы. Отливки формировались при вытягивании формы из нагревателя на опорном столе. После окончания процесса НК залитая форма перемещалась на тележку камеры выгрузки и через шлюзовую камеру выгрузки выводилась из печи.

Механическая система печи отличалась большой сложностью. Например, система кристаллизации представляла собой три штока, расположенных друг в друге с независимым перемещением каждого из них. Механизм загрузки-выгрузки также требовал очень точной регулировки, обеспечивающей точность перемещения до миллиметра. Доводка установки до рабочего состояния была успешно проведена сотрудниками отдела новой техники службы Главного инженера КМЗ.

Технологию литья отрабатывали применительно к лопаткам 1-й ступени турбины из сплава ЖС6Ф. Отливку проводили блоками из четырех лопаток, на замковых частях которых были изготовлены стартовые козырьки, соприкасающиеся в одной точке – месте установки затравки. Однако эксплуатация этой печи периодического действия в течение достаточного продолжительного времени показала, что она не удовлетворяет потребности серийного производства из-за низкой производительности: рост по кромке стартового козырька был довольно неустойчив, поскольку проходил практически при нулевом радиальном температурном градиенте  $G_{xy}$ , что вело к зарождению посторонних кристаллов. Кроме того, выполнить тонкий контур козырька без дефектов было очень сложно, поскольку он формировался на поверхности раздела прессованной керамики (подножие) и керамики, полученной при окрашивании. Малейший выступ на нем вел к образованию посторонних кристаллов. Устойчивой работе установки ИСВ-0,01-НФ также не способствовала достаточная сложность ее устройства.

В конце 70-х годов при внедрении процесса монокристаллического литья на КМЗ была поставлена задача достижения показателя длительной прочности:  $\sigma_{100}^{1000^\circ} \geq 100\text{--}110$  МПа. На монокристаллических лопатках с ориентацией [001] из сплава ЖС6Ф, получаемых на КМЗ, образуется пригар – металлокерамический слой глубиной до 200–250 мкм. При его зачистке утоньшались стенки пера лопатки и последняя браковалась. Снижение температуры процесса вело к снижению выхода годного по структуре. Подобрать инертную керамику для форм не удалось. Казалось, что положение было безвыходным.

Однако было установлено, что взаимодействие расплава жаропрочного никелевого сплава с керамикой на основе корунда определяется наличием в сплаве углерода. Изучение этой реакции показало, что она идет с выделением СО и для ее подавления достаточно было создать препятствие для отвода газообразных продуктов, поскольку равновесное давление СО в условиях роста монокристаллов составляло  $\sim 10^{-1}$  мм рт. ст. (13,33 Па). Для устранения пригара достаточно было создать в стенке формы газонепроницаемую оболочку. Такую оболочку можно создать несколькими способами.



**Рис. 6.** Конструкция беспригарной формы установки ИСВ-0,01-НФ с полостью-«рубашкой» (показана стрелкой)

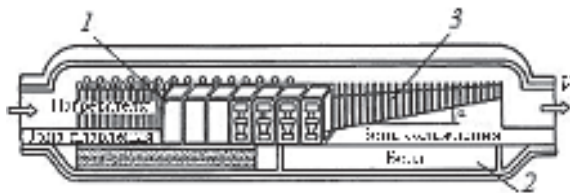
В данном случае при изготовлении формы между 5 и 6 слоем керамики выполнили пустотелую полость-«рубашку» (рис. 6), заполняемую расплавом при заливке его в форму, что препятствует отводу газообразных продуктов реакции. В этом случае пригар образовывался на внешней поверхности «рубашки», а поверхность отливки оставалась чистой.

После опробования и внедрения в технологию форм такого типа был получен акт внедрения технологического процесса литья монокристаллических лопаток 1-й ступени двигателя НК-25. Получить требуемые техническим заданием прочностные характеристики удалось, используя результаты испытаний монокристаллов из сплава ЖС6Ф с ориентацией [111] – при напряжении 300 МПа и температуре 975°C долговечность составила 56 и 52 ч; при напряжении 130 МПа и температуре 1100°C: 96 и 151 ч. Такая длительная прочность значительно превышала требования ТЗ.

Следует отметить, что это был один из первых экспериментов по исследованию анизотропии длительной прочности, показавший, что направление ориентации [111] имеет преимущество перед направлением [001] до температуры 1100°C. Ранее считалось, что анизотропия длительной прочности наблюдалась только при ~900°C.

### **Разработка и внедрение технологии монокристаллического литья в печах типа ПМП-2 (конец 70-х–начало 80-х годов)**

Если первоначально для получения монокристаллических лопаток создавались специальные установки типа ИСВ-0,01-НФ, то после неудачного их внедрения была поставлена задача получения монокристаллических отливок в серийных печах направленной кристаллизации



**Рис. 7.** Схема печи для направленной кристаллизации ПМП-2:

1 – оболочковые формы в графитовых опоках; 2 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 – нагреватель в зоне кристаллизации

в серийных печах направленной кристаллизации практически без изменения их конструкции. В частности, требовалось разработать технологию литья в печах проходного типа ПМП-2 (рис. 7).

Использование способов получения монокристаллов с затравками



из того же сплава, что и сплав отливки, – как это было сделано в технологии, разработанной для печей типа 1ИВС-0,01-ИФ, – в проходных установках ПМП-2 крайне затруднительно. Это связано с тем, что литейная форма в зоне заливки печи разогревается выше температуры ликвидус сплава и, естественно, затравка полностью расплавляется. Установка специального аналогичного имеющемуся в печи 1ИВС-0,01-ИФ холодильника для затравки, создающего на ней (затравке) температурный градиент, потребовала бы больших конструктивных изменений печи ПМП-2.

Учитывая вышесказанное, было предложено разработать технологию с применением затравок, имеющих температуру плавления на 100–150°C выше, чем у жаропрочного сплава, из которого получают отливку. Следует отметить, что эксперименты с затравками с температурой плавления выше, чем у сплава отливки, проводились еще при Д.А. Петрове, однако в то время они не получили дальнейшего развития.

Для реализации этого способа в качестве материала затравки вполне подходит чистый никель ( $T_{пл} = 1453^\circ\text{C}$ ). Однако получить из него монокристалл крайне трудно из-за возникновения на нем ростового дефекта «полосчатость», представляющего собой ряд параллельных зерен и субзерен, на которые в процессе роста «распадается» монокристаллическая структура. Кроме того, даже небольшой механический наклеп затравки из чистого никеля (например, при «выбивке» формы) приводит в дальнейшем к полной рекристаллизации в процессе нагрева формы под затравку, в результате чего затравка становится равноосной по всему объему. Поэтому в дальнейшем было решено использовать затравки из никеля, легированного в пределах твердого раствора элементами, повышающими его точку плавления. К этим элементам относятся прежде всего вольфрам и рений, являющиеся эффективными упрочнителями  $\gamma$ -твердого раствора. Последнее особенно важно, поскольку именно упрочнение твердого раствора подавляет образование полосчатости и, соответственно, повышает технологичность при получении монокристаллических затравок. Кроме того, указанные элементы (наряду с никелем) не образуют термодинамически стойких оксидов, которые могли бы сформировать плотную оксидную пленку на рабочем торце затравки, препятствующую передаче структуры к отливке, как это обычно и происходит на затравках из жаропрочных сплавов.

Путем легирования сплава вольфрамом температуру ликвидус можно поднять до 1510–1520°C при содержании W в сплаве ~34% по массе (~14% атомн.) (координаты точки максимума кривой ликвидус несколько различаются по данным различных источников). Распад твердого раствора ниже 1300°C несущественно сказывается на структуре даже при содержании вольфрама 35% (по массе).

Для печей ПМП-2 с относительно низкотемпературным режимом направленной кристаллизации (максимальная температура нагрева ~1510°C) можно использовать затравки с содержанием вольфрама от 15 до 25% (по массе) с температурой ликвидус от 1480 до 1500°C. Следует отметить, что применять затравки с 34–35% (по массе) вольфрама, т. е. в интервале составов, близких к максимуму на линии ликвидус, – нецелесообразно, так как на них вследствие малого интервала кристаллизации слабо выявляется при травлении дендритно-ячеистая структура, что

затрудняет их визуальный контроль, в частности, предварительную оценку ориентации. Кроме того,  $T_L$  в интервале концентрации от 30 до 35% (по массе) возрастает всего на 2–3°C, т.е. увеличение содержания вольфрама в этой области не эффективно.

Затравки на основе сплава системы Ni–W практически не подплавляются в процессе НК, поэтому их можно делать короткими – длиной 5 мм (затравка из жаропрочного сплава имеет длину 40–45 мм). Тугоплавкие затравки имели вид усеченных конусов длиной 5–7 мм с диаметром большего основания ~4,5 мм с конусностью 3 град.

Первые эксперименты с тугоплавкими затравками показали, что они, во-первых, не плавятся в печи ПМП-2, во-вторых, хорошо смачиваются жаропрочным сплавом и практически в 100% случаев передают структуру отливки. Таким образом, применение тугоплавких затравок из бинарных сплавов системы Ni–W позволяет нагревать литейную форму выше  $T_L$  сплава отливки, что и было использовано при разработке технологии литья монокристаллических турбинных лопаток двигателя НК-25 в печах проходного типа ПМП-2.

Поскольку отливать тугоплавкие затравки в печи ПМП-2 невозможно из-за недостаточной рабочей температуры, под отливку затравок приспособили печь ИСВ-0,01-НФ.

Следующим этапом отработки технологии монокристаллического литья была отработка конструкции той части формы, которая подводит монокристаллическую структуру к полости формы, образующей собственно отливку. Первоначально использовались конструкции, похожие на стартовые козырьки Д.А. Петрова. Затем при исследовании лопаток со столбчатой однонаправленной структурой было установлено, что местами зарождения кристаллов являются кромки гребешков лабиринтных уплотнений (на лопатке их было три). Взяв это за основу, было решено соединить три гребешка тонкой пластиной, в центр этой пластины подводилась затравочная полость. Для создания радиального градиента температуры вдоль кромки гребешков, модель лопатки смещали на угол 15–20 град относительно оси роста в сторону затравочной полости. Такой вариант подвода структуры назвали «объединенный лабиринт». В таком виде технология и была внедрена в производство и, по крайней мере, до последнего времени она применялась при литье монокристаллических лопаток 1-й ступени двигателя НК-86.

***Разработка технологии монокристаллического литья  
в высокоградиентных печах типа УВНК-8П  
(середина 80-х–начало 90-х годов)***

Разработка технологии монокристаллического литья проводилась в высокоградиентных печах УВНК-8П (рис. 8) завода «Салют». Целью работы была разработка технологии литья из сплава ЖС32 монокристаллических лопаток с ориентацией [001] для 1-й ступени турбины двигателя АЛ-31Ф.

Конструкция теплового узла печи УВНК-8П позволяет создать достаточно высокий аксиальный температурный градиент  $G_z \approx 5^\circ\text{C}/\text{мин}$  в основании литейной формы. Такая величина температурного градиента достигается при применении в качестве материала затравки сплава отливки. Однако, учитывая положительный опыт применения тугоплавких

затравок из сплава системы Ni–W в печах ПМП-2, решено было их использовать и в технологии монокристаллического литья в установках УВНК-8П.

Для отработки температурно-скоростных параметров процесса высокоградиентной направленной кристаллизации был проведен ряд термометрирований теплового узла установки, по результатам которого был выбран оптимальный режим. Этот режим практически без изменений применяется и в настоящее время при литье монокристаллических турбинных лопаток на многих заводах отрасли.

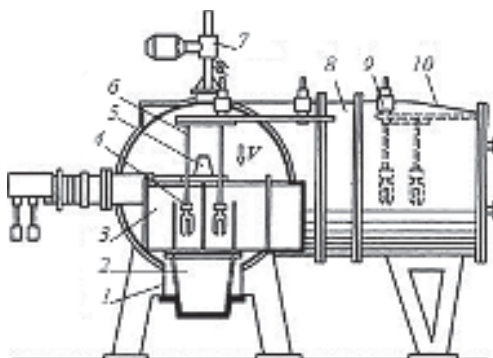
Одновременно с отработкой основных температурно-скоростных параметров литья монокристаллических лопаток проводилась модернизация самой технологии с применением затравки в двух основных направлениях:

- оптимизация технического процесса изготовления затравок;
- повышение надежности передачи структуры от затравки к отливке.

Печь УВНК-8П, в отличие от печи ПМП-2, позволяет проводить выплавку затравок из сплава Ni–(30–35)% W, при этом используются высокотемпературные режимы работы нагревателей, на 100–120°C превышающие температуры литья монокристаллических лопаток. Схема процесса получения монокристаллических затравок включает отливку блоков заготовок, их разрезку, травление, визуальный контроль ориентации, отбор затравок с  $\alpha \leq 5$  град и  $\alpha \leq 2,5$  град, которые затем используются для изготовления самих затравок. Как уже говорилось выше, основная трудность заключается в высоких требованиях по ориентации, которые предъявляются к затравкам ( $\alpha_{\{001\}} \leq 5$  град). Если затравка имеет большее отклонение от ориентации [001], то она, естественно, бракуется, так как ее уже невозможно «исправить». Контроль ориентации проводится рентгеноструктурным методом на дифрактометрах типа ДРОН по специально разработанной методике.

Для упрощения технологии изготовления затравок, увеличения точности их ориентации было предложено использовать так называемую ориентационную вырезку затравок из монокристаллических заготовок произвольной ориентации.

Первоначально в печи направленной кристаллизации отливаются цилиндрические заготовки из сплава Ni–W с монокристаллической структурой. Ориентация заготовок сама по себе существенного значения не имеет, желательно, чтобы отклонение от направления [001] не превышало ~35 град. При отливке заготовок можно даже не пользоваться затравкой, однако в большинстве случаев ее устанавливают,



**Рис. 8.** Схема установки для высокоскоростной направленной кристаллизации УВНК-8П:

1 – кристаллизационная камера; 2 – ванна с расплавленным алюминием; 3 – нагреватель сопротивления; 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

чтобы получить ориентации, близкие к [001] или к другой требуемой ориентации. Рекомендуемый размер заготовок применительно к тепло-вому узлу печи УВНК-8П – диаметр 6–8 мм, длина 120–150 мм. Количество заготовок, отливаемых за одну плавку, ~36 шт. Получение таких заготовок не вызывает особых затруднений. С учетом того, что требования по ориентации практически отсутствуют, выход годного составляет ~90% и выше.

Годные по структуре заготовки передаются на разметку под ориентированную вырезку. Эта разметка проводится на том же рентгеноструктурном оборудовании – дифрактометре типа ДРОН, на котором практически по той же методике проводят контроль кристаллографической ориентации отливок.

По сравнению с обычной технологией в операцию контроля ориентации добавляется только разметка торца затравки, а в операцию вырезки затравок – вырезка под заданным углом  $\alpha$ . Эти два несложных дополнения позволяют получать затравки любой ориентации с высокой точностью – до угловых минут. Для металлических монокристаллов с дендритно-ячеистой структурой, в частности из жаропрочных сплавов, такая точность не требуется, поскольку разориентация блоков (или субзерен) в них может достигать 2–3 град. Обычная, легко достигаемая, точность ориентации затравок, полученных такой методикой, находится в этих пределах.

Следует отметить, что при получении затравок ориентированной вырезкой кристаллографическая ориентация конкретной заготовки не определяется, т. е. остается неизвестной.

Затравки, полученные с помощью такой методики, представляют собой пластины эллиптической формы, вырезанные под углом  $\alpha$  к оси заготовки диаметром ~8 мм. Толщина этих пластин (затравок) составляет обычно 3,5–5 мм. Базовой поверхностью, по которой задается ориентация отливки, является поверхность пластины, т.е. плоскость (в отличие от ранее рассмотренных затравок), где базой является коническая боковая поверхность. Соответственно, в форме, точнее, в затравочной полости выполняется аналогичная поверхность, к которой должна прилегать базовая поверхность затравки.

В таком виде затравочная технология была применена для отливки монокристаллических турбинных лопаток в печах УВНК-8П, в частности, рабочих лопаток 1-й ступени турбины двигателя АЛ-31Ф из сплава ЖС32.

Работы по второму направлению – повышение надежности передачи структуры от затравки к отливке – были вызваны тем, что в отдельных случаях при нормальных режимах процесса высокоградиентной направленной кристаллизации наблюдается плохой контакт «затравка–отливка». Обычно это сопровождается образованием в зоне зарождения сильной блочности.

Для повышения надежности передачи совершенства монокристаллической структуры на стадии зарождения ее от затравки, был предложен комбинированный метод, в котором используется затравка из сплава Ni-W и кристаллоотборник в виде спирального литникового хода типа «геликоид».

На рис. 9 представлена конструкция затравочного узла литейной формы, в которой применяется комбинированный метод зарождения моно-

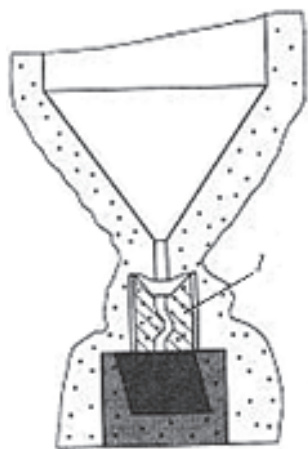


Рис. 9. Комбинированное зарождение «затравка–кристаллоотборник» (1)

нию структурного совершенства зародившегося от затравки монокристалла, что подтверждается достаточно малой для дендритно-ячеистой структуры ( $\sim 1,5$  град) угловой шириной рентгеновского рефлекса.

кристаллов. Кристаллоотборник представляет собой цилиндрическую вставку диаметром  $\sim 8-10$  мм и высотой  $\sim 10-12$  мм, в центре которой выполнен спиральный литниковый ход диаметром  $1,8-2$  мм. Эта вставка выполняется из керамической массы методом прессования с последующим обжигом. В комбинированной технологии кристаллоотборник, во-первых, отбирает одно субзерно из затравочного кристалла, если последний оказывается блочным, и, во-вторых, предотвращает или существенно уменьшает интенсивность образования на поверхности затравки пленок-конденсатов.

Результаты внедрения показали, что комбинированная технология монокристаллического литья обеспечивает высокий выход годного благодаря повыше-

Е.Н. КАБЛОВ, М.Р. ОРЛОВ, О.Г. ОСПЕННИКОВА

### МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТКАХ ТУРБИНЫ И КИНЕТИКА ЕЕ УСТРАНЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕМ ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ

*Формирование усадочной и газовой пористости при литье турбинных лопаток из никелевых жаропрочных сплавов*

Применение современных жаропрочных сплавов на никелевой основе для литья монокристаллических рабочих лопаток турбины позволило существенно повысить рабочую температуру газа и ресурс двигателя, однако высокая чувствительность монокристаллов к геометрическим концентраторам напряжений в условиях действия вибрационных нагрузок выдвигает новые проблемы обеспечения ресурса, решение которых определяется двумя направлениями: механической доводкой профиля пера лопаток и совершенствованием технологии их производства в части получения более совершенной структуры.

По данным работы [1], коэффициент чувствительности  $K_{\sigma}$  (при  $R = -1$ ) монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ к геометрическим концентраторам напряжений в условиях многоциклового усталости (МнЦУ) при симметричном цикле нагружения достигает значений  $2,5-3,0$ . Высокая чувствительность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов к концентраторам напряжений обусловлена отсутствием в монокристаллах большеугловых границ зерен, легированных упрочняющими элементами и являющихся эффективным препятствием для «эстафетного» скольжения дислокаций, движущихся, как правило, в плос-