

УДК 66.065.5

Е.В. Колядов¹, Ю.А. Межин²**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
НА УСТАНОВКАХ ТИПА УВНК**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-4-4

Рассмотрен принцип направленной кристаллизации, указаны основные параметры процесса, оказывающие решающее влияние на морфологические особенности структуры формирующейся отливки. Рассмотрены установки для направленной кристаллизации, применяемые на авиационных заводах. Объяснена причина необходимости полной автоматизации технологического процесса в литейном производстве. Показан принцип автоматизации технологического процесса получения отливок с монокристаллической структурой на установках типа УВНК, который позволяет упростить работу оператора и обеспечить воспроизводимость технологического процесса, при котором человеческий фактор в литейном производстве сводится к минимуму.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.5. «Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: температурный градиент, установки для направленной кристаллизации, компьютерная система управления, монокристаллическая структура.

The article deals with the principle of directional solidification, the main parameters of the process having decisive influence on the morphological features of the structure of the emerging casting. The installations of directional solidification used in aircraft factories are considered. The reasons of the necessity of complete automation of the technological process in foundry are explained. The principle of automation of the technological process of single-crystal casting on units UVNK-type simplifying work of operator and ensuring the reproducibility of the process, in which the «human factor» in the foundry industry would be minimized is shown.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 9.5. «The directional solidification (with variable controlled gradient) of superalloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: thermal gradient, installations of directional solidification, computer control system, single crystal structure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Модули систем автоматического управления» [Limited liability company «Modules of automatic control systems»] E-mail: info@mcau.ru

Введение

Наиболее ответственные отливки деталей горячего тракта газотурбинного двигателя получают из жаропрочных никелевых сплавов методом направленной кристаллизации, в частности на отечественных предприятиях в вакуумных плавильных установках типа УВНК с жидкометаллическим охладителем. Метод заключается в том, что форма с расплавом перемещается из зоны нагрева, одновременно погружаясь в охла-

ждающую среду из легкоплавкого расплава. Этот метод имеет определенные преимущества перед методом HRS (High Rate Solidification), используемым за рубежом: более высокий коэффициент теплопередачи при охлаждении в расплаве алюминия (благодаря конвекции) по сравнению с охлаждением формы излучением в вакууме.

Как известно, основными параметрами в процессе направленной кристаллизации являются градиент температур на фронте роста (G , °C/см) и скорость кристаллизации (R , мм/мин), которая в установившемся процессе равна скорости перемещения формы с расплавом из горячей зоны в холодную. Величина GR оказывает решающее влияние на морфологические особенности структуры. Ее увеличение при направленной кристаллизации способствует измельчению структурных составляющих сплава, снижению микропористости, дендритной ликвации и количества ростовых дефектов (*freckles*, паразитные зерна и т. д.), что положительно сказывается на его механических свойствах [1–15].

Повышение градиента температур на фронте кристаллизации позволяет успешно бороться со структурными дефектами в виде полос струйной ликвации. Так, в 1990-е гг. лопатки первой ступени получали из сплава ЖС6Ф в проходной печи ПМП, и на поверхности получаемых отливок было большое количество дефектов (*freckles*) и карбидов крупного размера, видимых невооруженным глазом. Изготовление этих деталей на установке УВНК-8П, где в качестве охладителя используется расплав алюминия и которая обеспечивает температурный градиент на фронте кристаллизации в несколько раз выше, чем в ПМП, позволило полностью устранить дефекты в виде полос струйной ликвации и поверхностных карбидов, измельчить структурные составляющие и повысить механические свойства.

Для всех отливок существует технологический процесс их получения, при котором отливка приобретает определенные структуру и уровень механических свойств [1]. Точное поддержание основных параметров в процессе направленной кристаллизации оказывает важное влияние на качество получаемой отливки. Так, отклонение температуры от заданной в технологическом процессе не должно превышать 5°C, отклонение скорости перемещения из горячей зоны в холодную ≤5%, в противном случае возникают структурные дефекты (паразитные зерна, *freckles*), а структурные составляющие по сечению отливки имеют различный размер.

Возрастающие требования к качеству литых монокристаллических лопаток из жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов привели к необходимости максимально сократить влияние человеческого фактора в технологических процессах. Однако используемые на тот момент установки для направленной кристаллизации УВНК-8П не имели компьютерной системы управления, позволяющей осуществлять технологический процесс в автоматическом режиме с точным регулированием и сохранением всех параметров в электронном виде. Регулировка нагрева осуществлялась с помощью прибора «Протерм 100», который обеспечивал регулируемый нагрев и поддержание технологической температуры в диапазоне 30–50°C. Скорость кристаллизации задавалась вручную путем регулировки реостата, связанного с приводом вертикального перемещения форм. Данные по плавке записывались на приборах КСП и хранились на бумаге. Вследствие влияния человеческого фактора на технологический процесс и несовершенства систем регулирования и контроля узлами установки качество получаемых отливок в разных плавках заметно различалось.

Материалы и методы

Для решения вышеназванной проблемы специалисты фирмы «МЭШплюс» совместно с сотрудниками ВИАМ в начале 2000-х гг. разработали универсальную компьютерную систему управления вакуумным литейно-термическим оборудованием.

Возможность гибкого программирования алгоритмов работы и развитые средства связи созданной компьютерной системы с объектом управления позволили легко адаптировать ее для установок монокристаллического литья типа УВНК и УВНЭС [16].

Конструктивно система управления выполнена в виде нескольких универсальных электрошкафов фирмы АВВ, в которых размещены компьютеры, контроллеры и другие электротехнические устройства и приборы. Шкафы имеют развитую систему укладки кабелей, установки кросс-панелей, универсальных разъемов и монтажных плат. Они выполнены в соответствии с европейским телекоммутиационным стандартом ETS 300, имеют высокую степень защиты от воздействия окружающей среды (пыле-влагозащита) и электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, что положительно влияет на надежность работы системы управления.

Компьютерная система управления построена на базе современных средств электронной техники и имеет архитектуру в виде локальной вычислительной сети, на верхнем уровне которой находится промышленный компьютер, а на нижнем – программируемые логические контроллеры.

Верхний уровень представлен компьютером промышленного исполнения, который через интерфейс RS-232/RS-485: обеспечивает функции диспетчеризации между контроллерами нижнего уровня; поддерживает графический многооконный диалог с оператором, включая индикацию текущих значений технологических параметров процессов в реальном времени; осуществляет ввод и коррекцию форм, автоматическое формирование базы данных как технологических параметров, так и технических характеристик работы установок.

Промышленный компьютер имеет следующие преимущества перед персональным компьютером:

- архитектура IBM PC совместима с операционной системой Windows;
- жидкокристаллический монитор с сенсорным экраном;
- высокая надежность (наработка с максимальной нагрузкой до 200 000 ч), пыле- и влагозащищенность (IP65), устойчивость к вибрации и ударам;
- способность работать в широком температурном диапазоне – от 0 до 50°C.

Нижний уровень представляет собой программируемые логические контроллеры ADAM-5510, которые обеспечивают реализацию функций циклической электроавтоматики по управлению вакуумной системой и функций многопараметрического регулятора с различными законами управления нагревательными печами и линейными перемещениями исполнительных механизмов по шести координатам.

Компьютерная система управления обеспечивает проведение в автоматизированном режиме по заданной программе всех этапов полного технологического цикла:

- создание вакуума в камерах установки;
- нагрев форм в печи подогрева и поддержание заданной температуры с точностью +5°C;
- плавление металла в тигле при заданной температуре и регулируемый слив расплава в керамическую форму;
- поддержание заданного температурного градиента кристаллизации путем автоматического регулирования скорости перемещения формы и температуры;
- достижение высокого градиента температуры (до 200°C/см) на фронте кристаллизации путем синхронного перемещения тепловых экранов, согласованного с вертикальным перемещением формы.

Наряду с управлением компьютерная система обеспечивает контроль, индикацию в режиме реального времени, регистрацию и архивацию в памяти всех параметров выполненных технологических процессов, а также технических данных работы установки. Эта система позволяет осуществлять интерактивный интерфейс «оператор–

система управления» по диагностике состояния работы всех систем, узлов и механизмов установки с графическим изображением процессов плавки металла и его кристаллизации на жидкокристаллическом мониторе с сенсорным экраном.

В случае нештатных ситуаций система управления выводит на экран перечень подсказок – операций для выхода из этих ситуаций. Параметры технологического процесса фиксируются как в цифровой, так и графической форме, постоянно отображаются на дисплее и записываются на жестком диске с возможностью последующей распечатки информации. На дисплее фиксируются следующие технологические параметры работы установок и процесса:

- мощность для всех нагревателей;
- остаточное давление в плавильной камере;
- мощность индуктора;
- давление, создаваемое насосами;
- температура расплава в тигле;
- температура в печи подогрева форм;
- температура жидкометаллического охладителя в ванне;
- скорость перемещения формы при опускании ее в ванну с жидкометаллическим охладителем.

Большим достоинством программы является возможность редактирования технологических параметров непосредственно в процессе плавки. Это позволяет предотвратить брак и получать отливки высокого качества.

После окончания процессов литья и кристаллизации лопатки технологическая программа со всеми зарегистрированными параметрами хранится в памяти компьютера и в любое время может быть выведена на принтер или для просмотра на монитор.

Однако полная автоматизация всего технологического процесса не осуществлена, так как система управления включала подпрограммы нагрева, кристаллизации, вакуумной откачки и т. д., запуск которых производился оператором установки.

Результаты

С целью уменьшить влияние человеческого фактора в технологических процессах специалисты фирмы «МСАУ» совместно с сотрудниками ВИАМ доработали систему управления установок, мнемосхема которой представлена на рис. 1, для проведения всего технологического процесса получения отливок в автоматическом режиме.

Существенных изменений в мнемосхему внесено не было. В нее включены подпрограммы нагрева, кристаллизации, вакуумной откачки, загрузки и выгрузки форм и т. д., но используются они для проведения технологического процесса в ручном режиме при отработке технологии получения новых деталей, использовании новых сплавов и нештатных ситуациях, когда необходимо выйти из автоматического режима управления.

Панель системы нагрева и кристаллизации состоит из следующих элементов (рис. 1):

1. мнемосхема системы нагрева и перемещения, на которой отображаются:
 - текущие температуры в печи подогрева форм, охладителя, тигле;
 - управляющие термодары для верхней и нижней зон печи подогрева форм;
 - текущее состояние нагревателей печи (нагреваются/охлаждаются/выключены);
 - текущая мощность, выдаваемая на нагреватели печи;
 - направление движения привода вертикального перемещения;
 - координаты формы;
 - скорость опускания формы;
 - участки перемещения формы в графическом виде;

- блок управления нагревом, с помощью которого можно задать параметры нагрева/охлаждения и запустить соответствующий процесс;
- блок управления кристаллизацией, с помощью которого можно задать границы участков перемещения формы, скорость перемещения формы на них, а также тип движения (с остановкой в конце участка/без остановки/последний участок);
- таймеры 1 и 2 (настроенные стандартно на отсчет 20 и 3 мин соответственно), которые оператор может вывести на дисплей в случае необходимости;
- панель с показаниями оптического датчика ПИРО, которую оператор может вывести на дисплей в случае необходимости, чтобы отслеживать показания датчика издалека.

2. мнемосхема вакуумной системы, на которой отображается следующее:

- состояние устройств, входящих в состав вакуумной системы;
- положение формы;
- показания датчиков давления;
- состояние макроопераций;
- общее состояние системы (блокировка, авария, охлаждение);
- состояние пульта дистанционного управления загрузкой/выгрузкой формы.

При отображении состояний устройств используются следующие цвета:

- включено (открыто) – зеленый;
- выключено (закрыто) – красный;
- промежуточное – желтый.

Показания фотопирометра, термопары погружения, мощности

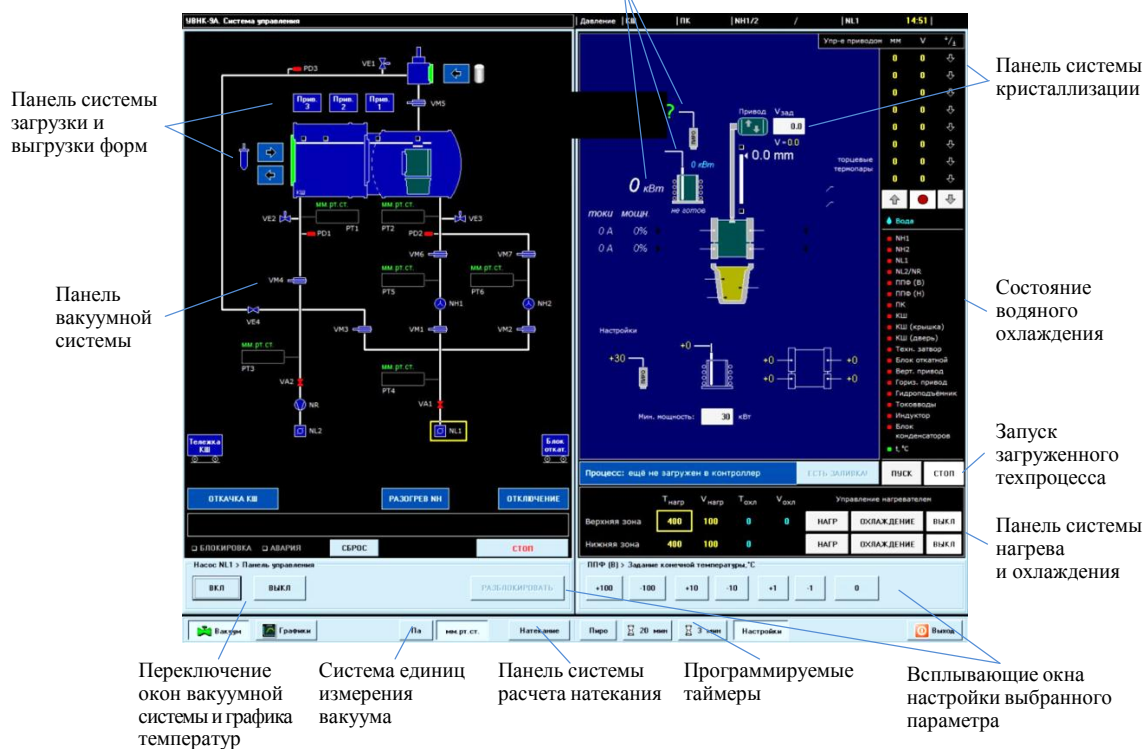


Рис. 1. Мнемосхема системы управления установок типа УВНК

Существуют еще переходные состояния, которые отображаются следующим образом:

- включение (открытие)/выключение (закрытие) – мерцает изображение устройства;
- блокировка операции – мерцает контурное изображение устройства желтого цвета;
- авария устройства – мерцает контурное изображение устройства красного цвета.

Кроме этого, такие устройства, как приводы горизонтального перемещения формы (приводы 1, 2 и 3), экран и блок откатной в промежуточных переходных состояниях показывают направление своего движения (вправо или влево) с помощью стрелки на изображении.

Панель управления объектом, расположенная под мнемосхемой, зависит от текущего выбранного объекта на мнемосхеме. Чтобы выбрать объект, необходимо коснуться его пальцем, при этом вокруг данного объекта должен появиться фокус ввода – прямоугольная рамка желтого цвета.

При выборе объекта внизу выводится соответствующая панель управления. На панели отображается название объекта и предоставляются кнопки для управления им. Кнопка «Разблокировать» на панели управления становится доступной в том случае, если оператор пытается выполнить действие, недопустимое ввиду наличия блокировок – тогда система дает возможность проигнорировать блокировки и выполнить операцию (под ответственность оператора). Например, оператор задает команду «Открыть затвор» несмотря на то, что требуемое давление не было достигнуто. Система выдает блокировку «Не достигнут требуемый вакуум», не выполняя при этом никаких действий. Если оператор считает необходимым открыть затвор, то нужно нажать кнопку «Разблокировать». В противном случае следует нажать «Стоп» или «Закрыть», чтобы отменить операцию (т. е. оставить затвор закрытым).

Система управления имеет большое количество блокировок, действующих как при ручном, так и при автоматическом управлении, но возможность проигнорировать блокировку допускается лишь при ручном управлении (под ответственность оператора).

Система блокировок включает:

- блокировки вакуумной системы по показаниям датчиков измерения вакуума «Пирани», предотвращающие запуск насоса, открытие затвора для объединения объемов и т. д., которые могут привести к повреждению самих устройств или вакуумного уплотнения;

- блокировки системы нагрева, ограничивающие максимальную мощность трансформаторов, благодаря чему повышается срок их службы и обеспечивается защита от поломки при нештатной ситуации;

- все движущиеся элементы установки имеют жесткие концевые выключатели, а также временные блокировки, т. е. в случае несрабатывания концевого выключателя программа остановит узел по истечении контрольного времени. Это способствует повышению надежности и увеличивает срок службы движущихся элементов установки.

Положение формы отображается на мнемосхеме в виде изображения формы, висящей на рельсе (рис. 2). О положении формы также можно судить по обратным сигналам с датчиков положения формы. Датчики расположены над рельсом в виде маленьких квадратиков: зеленый цвет означает, что форма находится под датчиком, черный цвет – что формы под датчиком нет. При движении формы (загрузка или выгрузка) под ней отображается мерцающая стрелка, показывающая направление движения. Если сигналы обратных связей с датчиков положения формы конфликтуют друг с другом и определить положение формы невозможно, то система индицирует аварию в виде мерцающей формы красного цвета, висящей на рельсе за пределами камеры. Как только система сможет определить положение формы, то нужное изображение снова появится в области ее местонахождения.

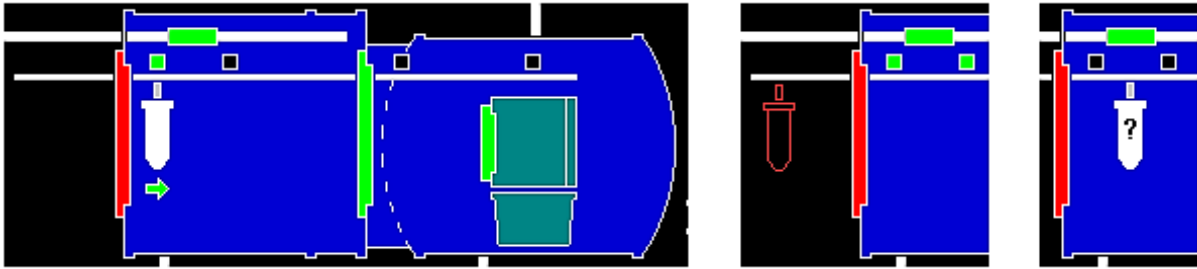


Рис. 2. Визуализация положения формы

Для ведения технологического процесса полностью в автоматическом режиме были созданы окна оператора и технолога (рис. 3).

В окне технолога (рис. 3, б) задаются все температурно-временные параметры технологического процесса для определенной отливки и сохраняются под шифром детали. Программа нагрева (рис. 3, б) печи подогрева форм разбита на 10 участков, для которых задаются температуры и скорость нагрева/охлаждения, а также необходимая продолжительность выдержки на определенных участках (например, выдержка после заливки металла в форму или при термостатировании). Программа кристаллизации (рис. 4) также разбита на 10 участков, в которых задаются необходимые интервалы и скорость кристаллизации в зависимости от геометрических размеров отливки, уровень опускания каретки с формами под заливку. После того как все параметры технологического процесса на определенную отливку заданы, они сохраняются в файле. Для каждого типа отливки существует отдельный файл под заданным шифром.

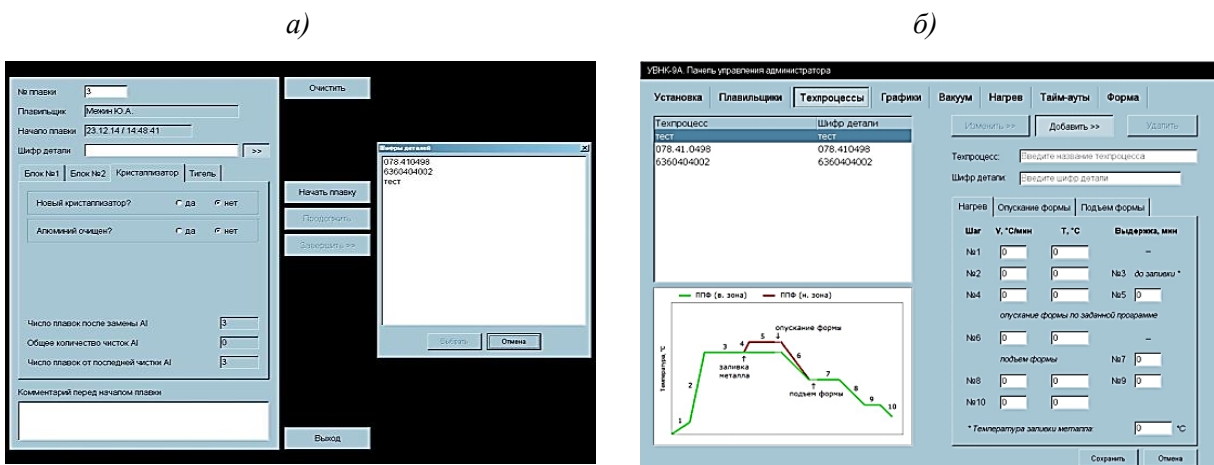


Рис. 3. Окно оператора (а) и технолога (б)

В окне оператора (рис. 3, а) плавильщик-оператор выбирает шифр детали, соответствующий сменному заданию, и запускает технический процесс (кнопка «Пуск»). Система управления в автоматическом режиме загрузит формы через технологический затвор, закроет дверь печи подогрева форм и опустит формы в положение под заливку, создаст вакуум, включит нагрев. При выходе температуры печи подогрева форм на технологический режим плавильщик должен включить индукционную печь, расплавить мерную шихтовую заготовку и при заданной температуре залить расплавленный металл в форму. Далее на управляющем компьютере необходимо подтвердить заливку металла, после чего программа продолжит выполнение технологического процесса

(протяжка форм в жидкометаллическом охладителе с заданной скоростью, охлаждение, выключение нагревателей, подъем формы и т. д.).

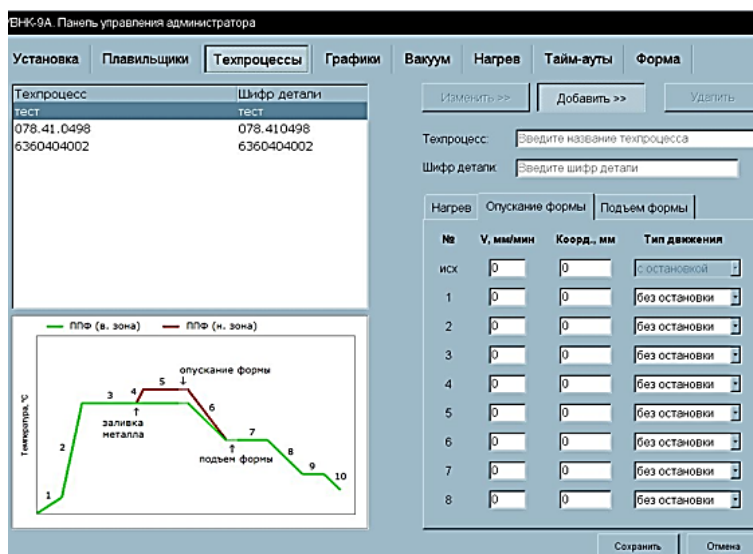


Рис. 4. Программа кристаллизации

Система управления позволяет в любой момент времени перейти на ручной режим для внесения корректировок технологического процесса или устранения нештатной ситуации.

Благодаря точному соблюдению технологических параметров процесса получаемые отливки имеют качественную монокристаллическую структуру от плавки к плавке и высокий выход годного литья. На рис. 5 представлена макроструктура одной из отливок, полученных при проведении плавки в автоматическом режиме.

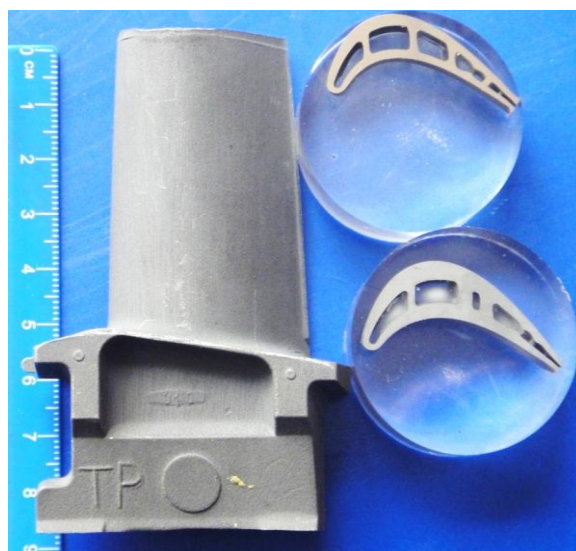


Рис. 5. Лопатка из жаропрочного никелевого сплава с монокристаллической структурой, полученная на установке УВНК-9А с автоматизированной системой управления (справа приведены поперечные сечения верхнего и нижнего сечения пера)

Автоматизированной системой управления оснащены также литейные установки для направленной кристаллизации крупногабаритного литья УВНК-14 и УВНК-15 (до 600 мм), УВНК-10 (до 800 мм).

Обсуждение и заключения

Автоматизация технологического процесса обеспечивает воспроизводимость технологического процесса и сводит к минимуму влияние человеческого фактора в литейном производстве, что позволяет повысить качество получаемых отливок, выход годного, производительность, обеспечить необходимый уровень механических свойств, надежности и долговечности деталей и удовлетворить требования, предъявляемые конструкторами к ГТУ и ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М., Орехов Н.Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 60–70.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 3–8.
4. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 105–117.
5. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.07.2015).
6. 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-4У // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 13–18.
7. 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. 33–38.
8. Герасимов В.В., Висик Е.М. Технологический аспекты литья деталей горячего тракта ГТД из интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА с монокристаллической структурой // *Литейщик России*. 2012. №2. С. 19–23.
9. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. Влияние условий направленной кристаллизации на структуру деталей типа лопатки ГТД // *Литейное производство*. 2012. №7. С. 14–16.
10. Бондаренко Ю.А., Базылева О.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. Высокоградиентная направленная кристаллизация деталей из сплава ВКНА-1В // *Литейное производство*. 2012. №6. С. 12–16.
11. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сулова В.А., Нарский А.Р. О направленной кристаллизации жаропрочных сплавов с использованием охладителя // *Литейное производство*. 2011. №5. С. 36–39.
12. Колядов Е.В., Герасимов В.В. Влияние приведенного размера отливки на осевой градиент температуры и макроструктуру отливок при направленной кристаллизации на установке УВНК-15 // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 3–9.
13. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М. О специфических дефектах отливок после направленной кристаллизации // *Литейное производство*. 2015. №7. С. 11–13.
14. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М. Влияние осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации на макро- и микроструктуру сплава ЖС32 // *Литейное производство*. 2014. №6. С. 28–31.
15. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МиТОМ*. 2002. №7. С. 20–23.
16. Каблов Е.Н., Спиваков Д.Д., Гриц В.В., Демонис И.М., Герасимов В.В. Компьютерная система управления технологическими процессами выплавки сплавов и литья монокристаллических лопаток ГТД / В сб. *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2004. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток». С. 132–137.