

О.О. Жиганкова¹, К.А. Донгаузер²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет

² ОАО «Авиадвигатель», Пермь

ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОПЛОВОЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Изучена технология изготовления монокристаллических лопаток методом направленной кристаллизации, применяемая на ОАО «Авиадвигатель». В пакете ProCAST 2009.0 смоделирован процесс изготовления монокристаллической лопатки по технологии, применяемой на производстве. Проведена температурно-скоростная оптимизация в области на стартовом конусе. Оптимизирована конструкция литниково-питающей системы: вместо двухстороннего стартового конуса использован трехсторонний. Смоделированная микроструктура сплава показала соответствие разработанной технологии требованиям, предъявляемым к изделию при монокристаллическом литье. В данной работе был полностью смоделирован процесс изготовления монокристаллической лопатки. Требуется дополнительные натурные эксперименты для подтверждения пригодности разработанной технологии.

Ключевые слова: математическое моделирование, литье, направленная кристаллизация, лопатка, микроструктура, технология, монокристалл, оптимизация, фронт.

Ресурс и надежность сопловых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) в основном зависят от совершенства внутренней структуры материала. Изготовление лопаток с повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как длительная прочность и термостойкость и без дефектов структуры, представляется важной задачей. Последнее позволяет обеспечить монокристаллическая структура отливок, во-первых, за счет отсутствия границ зерен, которые являются очагами зарождения микротрещин, во-вторых, за счет оптимальной кристаллографической ориентации монокристаллической структуры относительно действующих в лопатке механических и термических напряжений, в-третьих, за счет повышения характеристик самого сплава.

Монокристаллической лопаткой или отливкой называют изделие, «выросшее» из одного зародыша и не имеющее границ зерен на протравленной поверхности. При этом в матрице монокристаллического изделия имеются включения первичных фаз с другим параметром или

типом кристаллической решетки (карбиды, бориды и др.) и вторичные выделения γ' -фазы. Иными словами, монокристалл жаропрочного сплава не отвечает классическому определению монокристалла как объекта с непрерывной кристаллической решеткой [1].

На современном этапе развития промышленности процесс производства отливок лопаток ГТД автоматизирован. Разработаны и успешно используются технологии по изготовлению формы, ее сборке и разборке, установке стержней. Однако возникает масса проблем, связанных именно с качеством отливок, определяемым правильным учетом закономерностей их формирования. Изучение влияния различных технологических факторов, а также свойств материалов и в конечном счете совершенствование технологии получения лопаток высокого качества обуславливает необходимость моделирования процесса литья. В данной работе моделирование теплофизических процессов проводится в пакете ProCAST 2009.0.

Пакет ProCAST позволяет проводить расчеты всех физических процессов при изготовлении отливок: течение потока расплава (в самом полном соответствии уравнениям течения Навье–Стокса), расчет теплоизлучения в процессе кристаллизации группы отливок (например, в печи Бриджмена с использованием современных методов «числотой радиации серого тела», сеточных методов с учетом отражения, затенения и расчетов «факторов видимости»), любых других видов переноса тепла, кристаллизации с выделением скрытой теплоты энтальпийным методом с учетом задаваемого спектра выделения твердой фазы [2].

В данной работе выделяются следующие цели:

- Численное моделирование процесса изготовления лопатки турбины – прогрева форм и кристаллизации отливки.
- Проведение экспериментов по определению свойств интерметаллидного сплава для монокристаллического литья турбинных лопаток.
- Температурно-скоростная оптимизация процесса кристаллизации.
- Моделирование микроструктуры сплава с использованием стохастических методов анализа.
- Оптимизация конструкции литейного блока.

1. Описание технологии изготовления лопатки

Для получения лопаток ГТД из жаропрочных сплавов используется технология направленной кристаллизации (НК). Лопатки получают в вакуумной установке без жидкометаллического охладителя. Применяется метод Бриджмена. По этому методу НК осуществляется путем перемещения керамической формы с жаропрочным расплавом из зоны нагрева в зону охлаждения. Метод предполагает отвод теплового потока от поверхности выдвигаемых литейных форм в окружающую среду путем радиационного охлаждения (рис. 1). Критериями правильно выбранных параметров технологического процесса являются макроструктура, микроструктура и уровень механических свойств отливок.

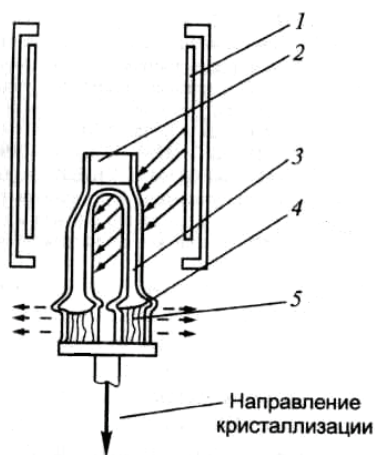


Рис. 1. Схема НК методом Бриджмена:
1 – нагреватель; 2 – керамическая форма;
3 – жидкий расплав; 4 – фронт кристаллизации; 5 – твердый сплав

2. Проведение экспериментов по определению свойств сплава

Любое численное моделирование литейных процессов невозможно при отсутствии данных по теплофизическим свойствам сплава. Целью экспериментов является определение температур солидус и ликвидус, температурных зависимостей теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости и доли содержания твердой фазы в интервале температур кристаллизации. Определение свойств проводится методами дифференциальной сканирующей калориметрии и лазерной вспышки на сертифицированных приборах.

3. Постановка задачи направленной кристаллизации

Исследуемая охлаждаемая лопатка является сложным геометрическим объектом, поэтому при проведении расчетов сделаны следующие упрощения:

– Не проводится расчет заливки расплава в литейные формы (температура в металле после заливки выравнивается в соответствии с первоначальными тепловыми полями на керамической форме).

– В процессе расчета не учитываются конвективные потоки в не-закристаллизовавшемся сплаве (тепломассоперенос в тонкостенных отливках незначителен).

В расчетную область входят: стальной корпус вакуумной камеры, печь подогрева форм, далее ППФ (стальной корпус, графитовые плиты и войлочный утеплитель), две литейные формы с выравнивающей керамикой ШОУ, отливки с двухсторонним стартовым конусом, керамическими стержнями и затравками, боковые и торцевые графитовые нагреватели, теплозащитные экраны.

4. Математическая постановка задачи теплопроводности

Для описания процессов теплообмена в ProCAST используется однофазный подход – уравнения сохранения энергии записываются для всей области в целом, содержащей как жидкую, так и твердую фазы. В этом случае положение границы раздела определяется по изолиниям температур солидус и ликвидус, а выделение теплоты кристаллизации учитывается автоматически. В однофазном подходе обычно предполагается, что существует функциональная зависимость количества твердой фазы (в процентном соотношении) от температуры. Этого предположения достаточно, чтобы описывать макрохарактеристики процесса, например температурное поле.

Дифференциальное уравнение нестационарной задачи нелинейной теплопроводности имеет вид

$$\rho \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) - q(\bar{x}, t) = 0, \quad (1)$$

где $\rho = \rho(T)$ – плотность (константа или функция температуры);

$k = k(T)$ – коэффициент теплопроводности (константа или функция температуры);

H – энтальпия (функция температуры), которая включает в себя эффекты от удельной теплоемкости и скрытой теплоты, т.е. в общем случае нелинейная функция

$$H(T) = \int_0^T c_p(T) dT + L(1 - f_s(T)), \quad (2)$$

где $c_p(T)$ – удельная теплоемкость;

L – скрытая теплота кристаллизации;

$f_s(T)$ – коэффициент содержания твердой фракции;

T – температура;

t – время,

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Гамильтона в декартовых координатах;

таж;

$q(\bar{x}, t)$ – пространственный, изменяющийся объемный источник тепла, зависящий от времени.

Поскольку материалы формы для литья, печи подогрева форм и оболочки не испытывают фазовых переходов в течение всего времени расчета, т.е. перечисленные конструкции остаются твердыми, энтальпию можно представить в виде

$$H(T) = \int_0^T c_p(T) dT. \quad (3)$$

И тогда уравнение (1) для этих тел становится дифференциальным уравнением нестационарной задачи линейной теплопроводности

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) - q(\bar{x}, t) = 0. \quad (4)$$

Начальные условия

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}), \quad (5)$$

т.е. каждому материалу в начальный момент времени соответствует свое значение начальной температуры.

Условие равенства тепловых потоков на границе раздела «форма–отливка»

$$k_1(T) \nabla T_1 \cdot \bar{n}_1 = k_2(T) \nabla T_2 \cdot \bar{n}_2, \quad \bar{n}_1 = -\bar{n}_2, \quad \text{на } \Gamma_c, \quad (6)$$

где $k_1(T)$ и $k_2(T)$ – коэффициенты теплопроводности материалов, из которых выполнены форма и отливка соответственно,

T_1 и T_2 – температуры формы и отливки соответственно в точке на границе раздела «форма–отливка»,

\bar{n}_1 и \bar{n}_2 – внешние нормали к поверхностям формы и отливки соответственно на границе раздела «форма-отливка»;

Γ_c – поверхность контакта.

Граничные условия

$$-k\nabla T \cdot \bar{n} = q_n(t) \text{ на } \Gamma_1, \quad (7)$$

где \bar{n} – нормаль к поверхности;

$q_n(t)$ – тепловой поток, проходящий через границу Γ_1 , которая является частью границы расчетной области. Для его подсчета используется радиационная модель фактора видимости.

Таким образом, для расчетной области отливки справедливы формулы (1), (2), (5), (6) и (7). Для расчетных областей формы для литья, печи подогрева формы и оболочки справедливы формулы (4), (3), (5), (6) и (7).

Моделирование процесса литья проводится поэтапно. Первый этап – прогрев форм. Результатом является определение начального распределения температуры во всех элементах, участвующих в радиационном теплообмене. В качестве граничных условий, обеспечивающих поступление тепла в ППФ, используются условия постоянной температуры нагревателей. Решается задача лучистого теплообмена. Условия теплопередачи между керамикой ШОУ и керамикой формы считаются идеальными. Второй этап – кристаллизация сплава в процессе выдвижения форм. Основным результатом расчетов является определение теплового состояния формы и отливок, а также определение положения, скорости перемещения, высоты и кривизны фронта кристаллизации в зависимости от времени. В качестве начальных тепловых условий используются температурные поля, полученные на первом этапе. Скорость выдвижения форм из нагревательного узла принимается постоянной и равной 3 мм/мин.

В результате выяснилось, что в процессе протяжки отливки фронт кристаллизации находится на уровне нижней поверхности теплозащитного экрана. Высота фронта относительно небольшая, максимальные значения достигаются при прохождении полок. Однако наблюдаются значительные искривления изотерм ликвидус и солидус в области на стартовом конусе и на полках лопатки (рис. 2).

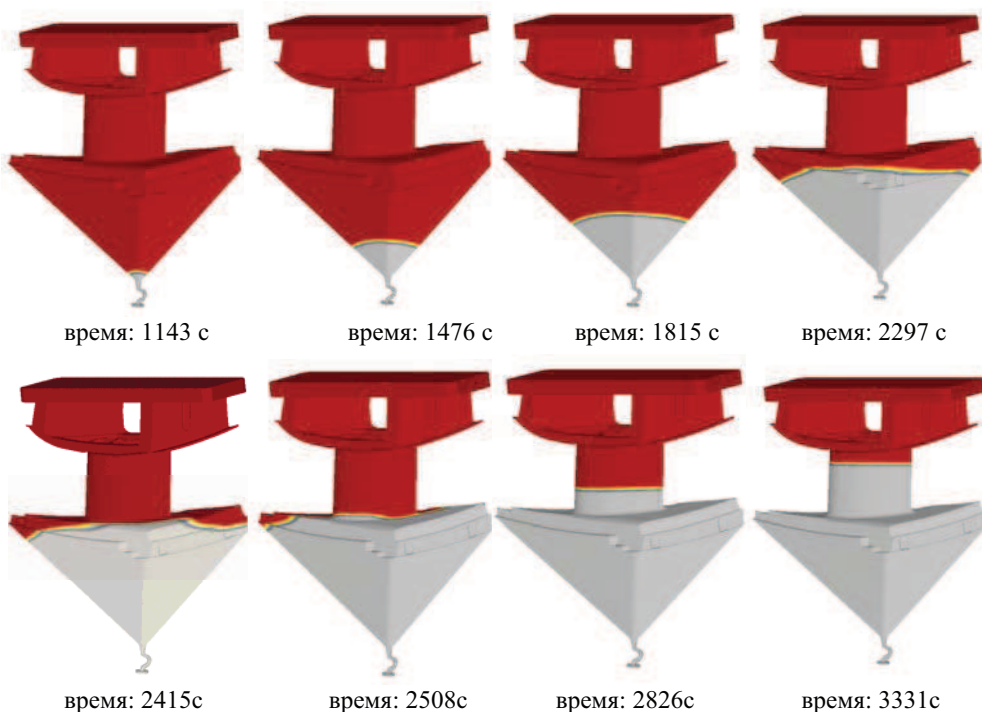


Рис. 2. Фронт кристаллизации на отливке в процессе выдвигания из ППФ (серый – абсолютно твердый сплав, красный – абсолютно жидкий)

Выпуклость или вогнутость фронта, его неравномерность в продольном и поперечном направлениях, разрывность могут привести к образованию дефектов структуры, что неприемлемо. Необходима регулировка скорости кристаллизации.

5. Температурно-скоростная оптимизация процесса кристаллизации

Требуется подобрать такую скорость протяжки отливки, чтобы фронт кристаллизации был макроскопически плоским, т.е. чтобы его кривизна была минимальной. Поскольку в области верхней и нижней полок процесс кристаллизации недостаточно изучен и протекает непредсказуемо, кроме того, фронт разрывается и оценка его кривизны усложняется, то на данном этапе представляется возможным и технологически оправданным проводить оптимизацию только на стартовом конусе. Стартовый конус (или стартовое основание) является основным элементом литниково-питающих систем, его назначение – обеспечить получение монокристаллической структуры. Численная опти-

мизация скорости ведется методом градиентного спуска с постоянным шагом.

В результате проделанной процедуры удалось уменьшить кривизну фронта на стартовом конусе (рис. 3), теперь она составляет примерно 1 мм, кроме того, подобран скоростной режим выдвигания формы (рис. 4).

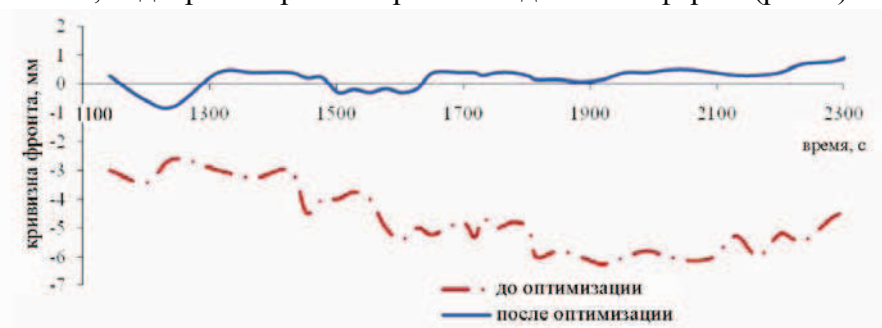


Рис. 3. Зависимость кривизны фронта кристаллизации от времени

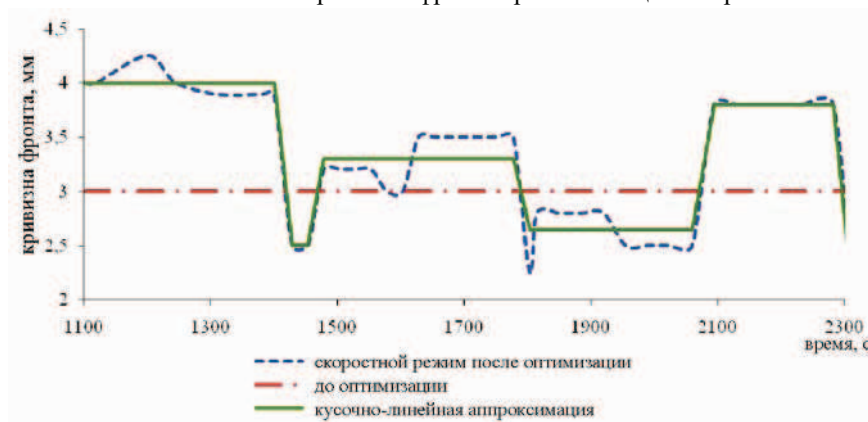


Рис. 4. Скоростной режим выдвигания формы

6. Моделирование микроструктуры лопатки

Ведется с применением стохастических методов анализа, в основе которых метод клеточных автоматов. Учитываются кинетика и предпочтительное направление роста дендритов. Распределение центров кристаллизации в расплаве металла описывается законом Гаусса. Моделирование формирования микроструктуры лопатки с двухсторонним стартовым конусом выявило нарушение монокристалльности отливки (рис. 5). На стартовом основании зарождается второе зерно, а на нижней полке лопатки из-за резкого уменьшения толщины керамики ШОУ и, следовательно, увеличившегося теплоотвода образуются паразитные зерна, часть которых прорастает далее в перо.

Разработанная технология процесса кристаллизации лопатки не удовлетворяет требованиям к качеству отливки.

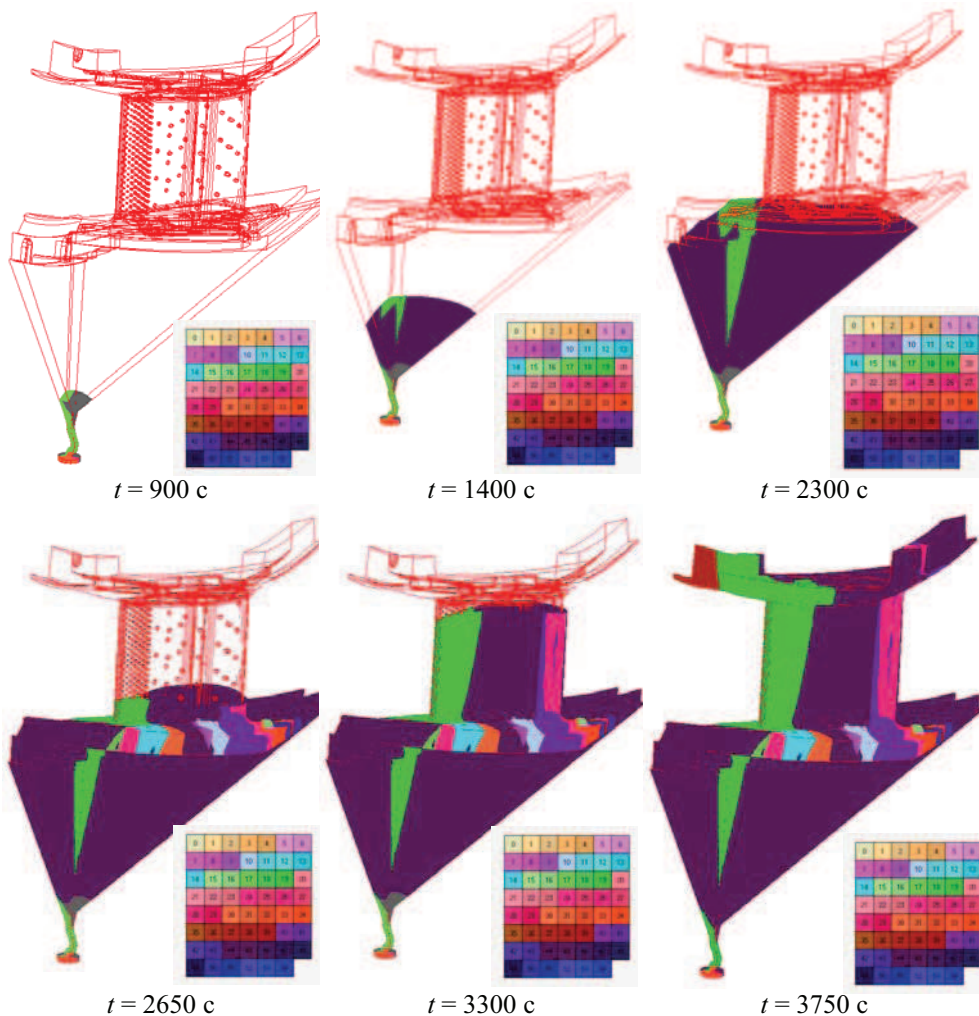


Рис. 5. Формирование микроструктуры лопатки с двухсторонним конусом после температурно-скоростной оптимизации (цвет соответствует углу между направлением роста кристалла и направлением кристаллизации)

7. Оптимизация конструкции литниково-питающей системы лопатки

Было предложено изменить конструкцию литниково-питающей системы лопатки: вместо двухстороннего стартового конуса использовать трёхсторонний. Эта методика обеспечивает более равномерное прохождение фронта по стартовому основанию и позволяет передавать КГО трём сторонам нижней (по расположению при заливке) полки лопатки. Для

этого дополнительно используются кристалловоды, выполненные в виде перемычек по входной и выходной сторонам полок лопатки. В данном варианте выравнивающая керамика ШОУ представляет собой конструкцию с постоянным по высоте сечением. Кристаллизация лопатки осуществляется при вертикальном перемещении формы через неподвижный экран с отверстием, соответствующим контуру керамики ШОУ.

Моделирование проводится по аналогичной схеме: вначале решается задача нагрева ППФ и находятся температурные поля на всей расчетной области после выхода на стационар, затем, принимая найденное распределение температур за начальное состояние, решается задача кристаллизации отливки лопатки при выдвигании керамической формы с расплавом металла из горячей зоны в холодную с постоянной скоростью. На рис. 6 представлен фронт кристаллизации в течение времени. Высота фронта для лопатки с трехсторонним конусом меньше, чем для предыдущего варианта лопатки, особенно в области

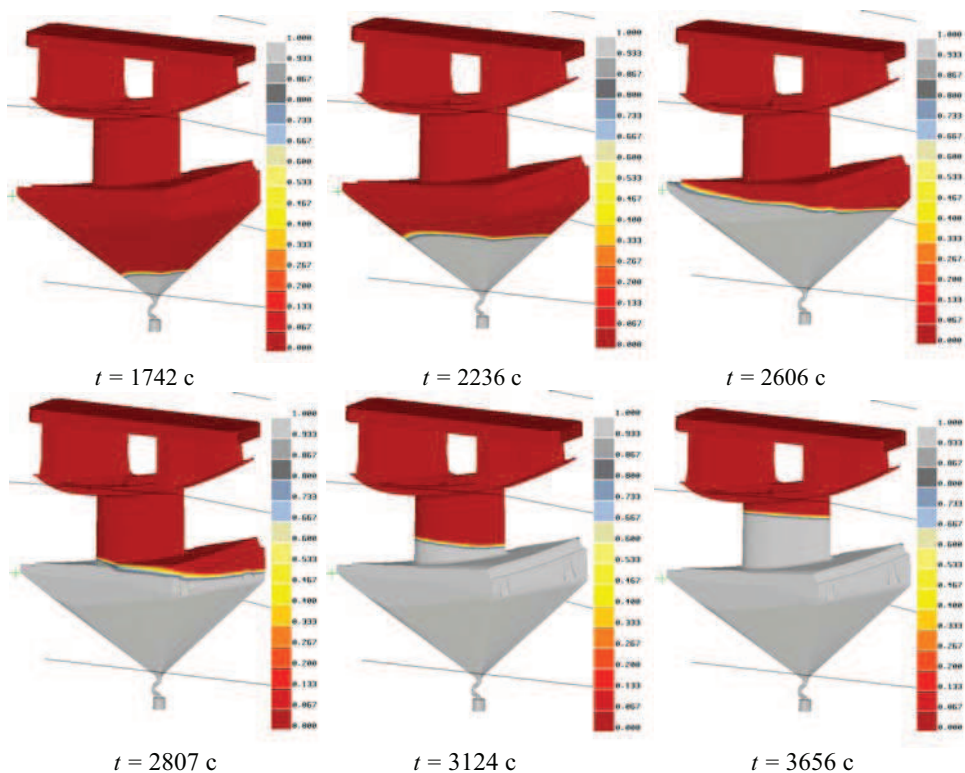


Рис. 6. Фронт кристаллизации на отливке с трехсторонним конусом в процессе выдвигания из ППФ (серый – абсолютно твердый сплав, красный – абсолютно жидкий)

верхней и нижней полок. Его кривизна в данном варианте лопатки меньше. Наблюдается небольшое искривление фронта до нижней полки, в целом же фронт относительно плоский и перпендикулярный направлению теплоотвода. Благодаря наклонному расположению лопатки кристаллизация на полках проходит постепенно, начинаясь со стороны входной и заканчиваясь со стороны выходной кромки пера лопатки.

Моделирование микроструктуры показало соответствие разработанной технологии требованиям, предъявляемым к изделию при литье. Из десяти зерен, зародившихся в сечении на уровне затравки, после прохождения кристаллоотборника остается только одно с ориентацией 270.

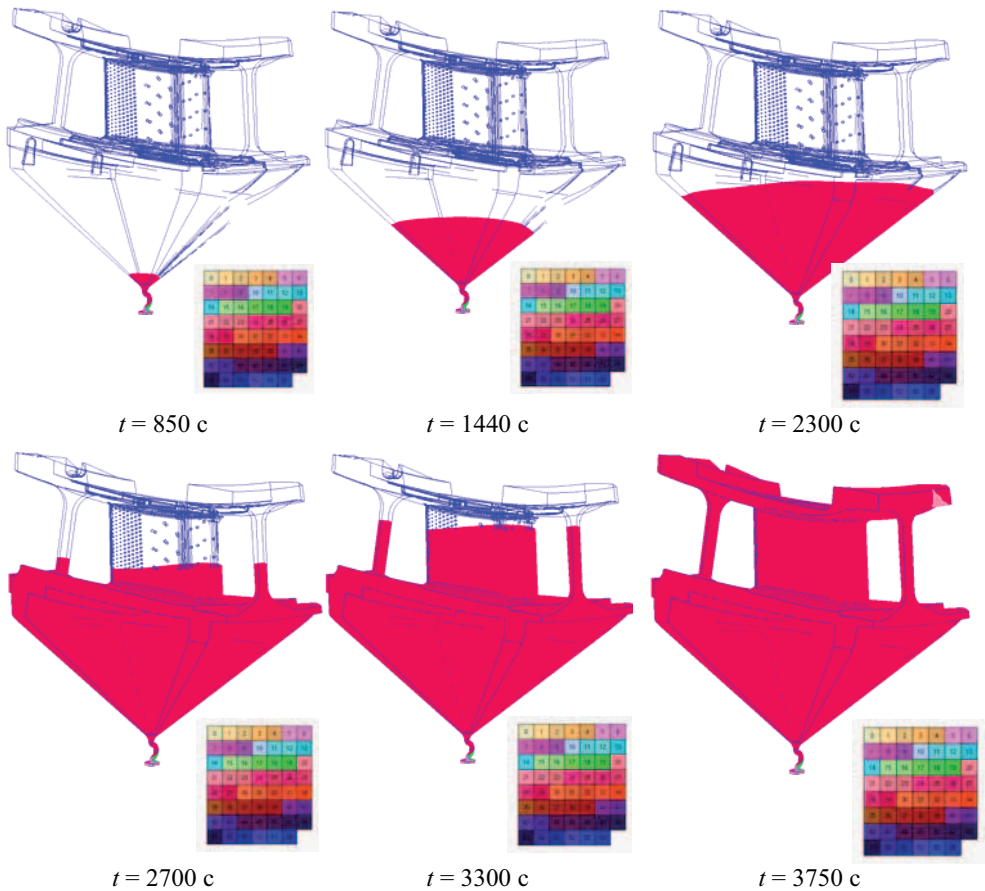


Рис. 7. Образование микроструктуры в процессе кристаллизации лопатки с трехсторонним стартовым конусом (цвет соответствует углу между направлением роста кристалла и направлением кристаллизации)

Заключение

Была изучена технология изготовления монокристаллических лопаток методом направленной кристаллизации, применяемая на ОАО «Авиадвигатель».

В ходе исследований было обнаружено, что некорректные свойства материалов значительно влияют на результаты численного расчета. Поэтому были проведены эксперименты по определению теплофизических свойств интерметаллидного сплава для монокристаллического литья турбинных лопаток. Найдены температурные зависимости теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости, содержания твердой фазы, а также температуры ликвидус и солидус сплава.

В пакете ProCAST 2009.0 был смоделирован процесс изготовления монокристаллической лопатки по технологии, применяемой на производстве. Поскольку на этапе моделирования направленной кристаллизации было выявлено искривление температурного фронта на отливке в интервале температур солидус – ликвидус, приводящее к ухудшению микро- и макроструктуры лопатки и образованию дефектов, было принято решение оптимизировать скорость кристаллизации в области на стартовом конусе.

Температурно-скоростная оптимизация позволила существенно уменьшить кривизну фронта, в среднем от 5 мм до 0,1 мм, тем самым уменьшив междендритные расстояния и улучшив микроструктуру. Однако макроструктура лопатки не соответствовала требованиям технологии монокристалльного литья: на нижней полке лопатки из-за неравномерного охлаждения образовались паразитные зерна, которые прорастали далее в перо.

Было предложено изменить конструкцию литниково-питающей системы: вместо двухстороннего стартового конуса использовать трехсторонний. В этом случае благодаря постоянной по сечению керамической форме не требуется подвижный теплозащитный экран. Теплоотвод в области полок становится более равномерным за счет плавного изменения толщины керамики ШОУ.

Моделирование микроструктуры сплава в модуле SAFE, основанного на стохастических методах анализа, показало соответствие разработанной технологии требованиям, предъявляемым к изделию при монокристаллическом литье. Моноструктура достигается в обоих

вариантах моделей лопатки: с кристалловодами и без них. Следовательно, от их использования можно отказаться.

Требуются дополнительные натурные эксперименты для подтверждения пригодности разработанной технологии.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. ProCAST User's Manual & Technical Reference. (Based on ProCAST Version 2008.0) Copyright © 2008 by ESI Group.

Получено 02.07.2011

O.O. Zhigankova, K.A. Dongauser

The Perm national research polytechnic university

NUMERICAL OPTIMIZATION THE PROCESS OF MANUFACTURING SINGLE-CRYSTAL TURBIN BLADE

The technology of manufacturing single-crystal blades by directional solidification used at OJSC "Aviadvigatel" is studied. The process of manufacturing blades based on the production technology is modeled in ProCAST 2009.0. Temperature and speed optimization is held at the starting cone. The design of gating-feeding system is optimized. Simulated microstructure of the alloy showed the correspondence of the technology to the requirements. The process of manufacturing single-crystal blades has been completely modeled in this paper. Additional experiments are required to confirm the suitability of the technology.

Keywords: mathematical modeling, simulation, cast, directional solidification, turbine blade, microstructure, technology, single-crystal, optimization, front.