

УДК 621.746.62

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ

И.Л. Никулин, А.И. Цаплин

*ГОУ ВПО «Пермский государственный технический
университет», г. Пермь*

Рецензент В.Ф. Першин

Ключевые слова и фразы: затвердевание; монокристалл; технологические параметры; фронт кристаллизации.

Аннотация: Предложена макроскопическая математическая модель теплофизики затвердевания монокристаллической отливки. Приведены уравнение переноса тепловой энергии и краевые условия процесса затвердевания. Приведена оценка вычислительной погрешности. Показана возможность прогнозирования режимов затвердевания, позволяющих повысить выход годной продукции.

Развитие авиационного двигателестроения требует постоянного повышения эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для создания лопаток газотурбинных двигателей, совершенствования и создания новых технологий для их производства [1]. Наиболее перспективными считаются лопатки с монокристаллической структурой, обладающие высокой длительной прочностью, получаемые из жаропрочных никелевых сплавов прецизионным литьем в оболочковые формы, которые изготавливают по выплавляемым моделям.

Практика изготовления лопаток показала, что в отливках, получаемых данным способом, обнаруживается более десятка различных дефектов. Так, например, при неудачно выбранных параметрах процесса кристалли-

Никулин И.Л. – аспирант, ассистент кафедры общей физики ПГТУ; Цаплин А.И. – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕН, заведующий кафедрой общей физики ПГТУ, г. Пермь.

зации возникают дефекты кристаллической решетки, приводящие к снижению выхода годной продукции, который на настоящий момент составляет всего 50...60 %.

Решение проблемы повышения качества лопаток, сокращение сроков и стоимости подготовки технологического процесса в значительной мере зависит от достоверности и эффективности автоматизированных методов проектирования технологических процессов литья и термической обработки.

Целью настоящей работы является повышение выхода годной продукции на основе вычислительного эксперимента, моделирующего теплофизику затвердевания монокристаллической отливки.

Монокристаллической отливкой называют изделие, «выросшее» из одного зародыша и не имеющее границ зерен. При этом в монокристаллическом изделии имеются включения различных фаз, когерентно связанных с матрицей.

Основными параметрами, характеризующими процесс направленной кристаллизации, являются осевой температурный градиент на фронте кристаллизации G , [К/см] и скорость перемещения фронта кристаллизации u , [мм/мин]. Произведение величин Gu определяет тип формирующейся структуры монокристалла. Кроме того, оптимальные условия для получения монокристаллической отливки создаются в том случае, когда в установке обеспечивается плоский в макроскопическом масштабе фронт роста монокристалла, и его положение относительно нагревателя остается неизменным при кристаллизации [2].

Изгиб фронта роста приводит к отклонению кристаллографической оси [100] монокристалла от вертикальной оси отливки и характеризуется углом разориентации θ (рис. 1). Допустимый интервал значений угла θ составляет от 0 до 3°.

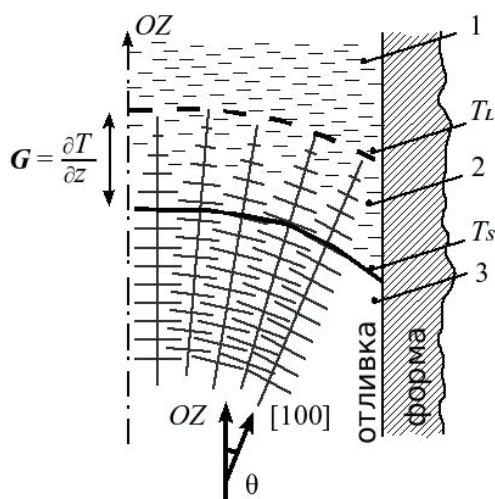


Рис. 1. Определение угла разориентации θ и градиента температуры G на фронте кристаллизации:

1 – расплав; 2 – двухфазная зона;
3 – затвердевший монокристалл

Для ускоренной оценки влияния макроскопических факторов на параметры формирования монокристаллической отливки, такие, как градиент температуры на фронте роста и угол отклонения осей дендритов первого порядка от оси отливки, разработана математическая модель теплофизику формирования монокристаллической отливки [3], учитывающая следующие факторы: 1) неоднородность теплофизических характеристик материалов жаропрочного сплава, керамической формы и жидкометаллического охладителя; 2) анизотропию коэффициента теплопроводности в затвердевшем монокристалле; 3) кон-

векцию в жидкой фазе отливки, захватывающей часть двухфазной зоны, а также в расплавленном охладителе; 4) радиационный механизм теплопередачи между оболочковой формой и печью подогрева формы, а также в усадочном зазоре.

Уравнение переноса тепловой энергии в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$\rho c_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda^{(r)} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^{(z)} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; $c_{\text{эфф}}$ – эффективная теплоемкость; $\lambda^{(r)}$ и $\lambda^{(z)}$ – коэффициенты теплопроводности в радиальном и аксиальном направлениях соответственно в затвердевшем монокристалле. Краевые условия для получения единственного решения уравнения (1) приведены в работе [3].

По предложенной математической модели разработан пакет прикладных программ, в котором реализовано решение краевой задачи. В работе [4] показано, что модель адекватно описывает процесс роста монокристалла в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации, для установившегося теплообмена погрешность расчетов не превышает 3 %.

Технологические параметры, к которым наиболее чувствительны градиент температуры и угол разориентации, можно условно разделить на две группы: 1) определяемые из технического задания и определяющие исходную структуру монокристалла (температура печи и толщина стенки формы); 2) доступные для варьирования во время подготовки процесса кристаллизации (скорость выдвигания формы из печи).

Расчетный анализ процесса кристаллизации проводился для образцов сплава ЖС36 при погружении электрокорундовой формы в жидкометаллический охладитель при исходных данных для базового режима (табл. 1).

Таблица 1

Технологические параметры базового режима

Название параметра	Численное значение
Радиус образца, мм	7
Высота образца, мм	140
Толщина стенки формы, мм	$8,0 \pm 0,5$
Высота прибыльной части, мм	20
Высота дна формы, мм	60
Высота графитового экрана, мм	20
Расстояние от печи до графитового экрана, мм	40
Высота зазора, мм	10
Температура печи, К	1723 ± 5
Скорость выдвигания формы из печи, мм/мин	3,5
Температура жидкометаллического охладителя, К	963

Проведенный расчет показал, что угол разориентации при базовом режиме равен $2,9^\circ$ и лежит вблизи верхней границы допустимых значений $0^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$. В технологическом процессе имеются отклонения параметров, которые можно описать нормальным законом распределения. С учетом отклонений в интервалах допуска для температуры печи подогрева формы $T_{\text{печи}} = (1723 \pm 5)$ К и для толщины стенки формы $\delta_{\text{ф}} = (8,0 \pm 0,5)$ мм угол разориентации принимает значения от $2,8$ до $3,5^\circ$.

При известном законе распределения отклонений возможна оценка вероятности возникновения брака. Так, для базового режима заданная температура печи составляет $\bar{T} = 1723$ К, этой температуре соответствует значение угла разориентации $\theta = 2,9^\circ$. Понижение температуры до $T_{\text{Б}} = 1721$ К приводит к росту угла разориентации до предельного допустимого значения $\theta_{\text{max}} = 3^\circ$.

При дальнейшем понижении угол разориентации становится больше 3° , что приводит к браку. Отклонения в большую сторону от заданного значения температуры в широком диапазоне (более 100 К) не выводят угол θ из интервала допустимых значений. Если принять полуширину интервала допуска $3\sigma_T$, то в 99,7 % случаев отклонения температуры печи от заданного не превышают 5 К, а дисперсия температуры $\sigma_T = 2$ К. Вероятность $P_{\Delta T}$ того, что температура печи подогрева формы не отклонится от \bar{T} на столько, что это приведет к браку, можно оценить по следующей формуле [5]:

$$P_{\Delta T} = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \int_{T_{\text{Б}}}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma_T^2}\right\} dt, \quad (2)$$

в которой верхний предел интегрирования выбран $+\infty$, так как случайные отклонения $+100$ К от \bar{T} не приводят к браку и на практике невозможны.

Расчет по соотношению (2) дает $P_{\Delta T} = 95\%$, это значит, что в 5 % случаев отклонения температуры приведут к появлению брака.

Упомянутый интервал допуска толщины стенки формы в базовом процессе $\delta_{\text{ф}} = (8,0 \pm 0,5)$ мм, тогда при надежности $\alpha = 0,997$ вероятность $P_{\Delta \delta}$ того, что отклонение толщины стенки формы от среднего значения $\bar{\delta}$ не превысит допустимое значение $P_{\Delta \delta} = 0,99$.

Отклонения температуры печи и толщины стенки формы независимы, поэтому вероятность появления брака $P_{\text{Б}}$ вычисляется из соотношения

$$P_{\text{Б}} = 1 - P_{\Delta T} P_{\Delta \delta}, \quad (3)$$

и составляет 6 %.

Для увеличения выхода годной продукции необходимо уменьшать угол разориентации до значения, при котором случайные отклонения не приведут к возникновению брака. Были предложены два варианта технологии. Первый вариант отличается от базового режима увеличением температуры печи от 1723 до 1733 К и увеличением скорости выдвижения формы в жидкометаллический охладитель с 3,5 до 5 мм/мин. Угол разори-

ентации при этом режиме с учетом отклонений, вызванных неточностью параметров процесса, находится в пределах $2,1...2,3^\circ$, градиент температуры – $58...65$ К/см.

Второй вариант отличается от базового режима изменением толщины стенки формы с 8 до 12 мм и увеличением температуры печи от 1723 до 1733 К. В этом варианте интервалы значений угла разориентации и градиента температуры составляют соответственно $1,9...2,2^\circ$ и $49...56$ К/см.

Предложенные варианты процесса кристаллизации монокристаллических лопаток позволяют уменьшить брак, вызванный отклонениями температуры печи и толщины стенки формы, и тем самым увеличить выход годной продукции на 6 %.

Таким образом, разработанная математическая модель оказывается полезной для ускоренного прогнозирования технологических режимов затвердевания монокристаллических лопаток, позволяющих увеличить выход годной продукции.

Список литературы

1. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е.Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.

2. Константинов, В.В. Естественные композиционные материалы для газотурбинных двигателей / В.В. Константинов, Г.В. Купченко, А.В. Симонов, Ю.А. Соколов // *Литейное производство*. – 2004. – № 11. – С. 13–19.

3. Никулин, И.Л. Анализ теплофизики формирования монокристаллической отливки методом вычислительного эксперимента / И.Л. Никулин // *Молодежь Сибири– науке России : сб. материалов Межрегион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Красноярск, 2004. – С. 252–255.

4. Никулин, И.Л. Математическое моделирование роста монокристалла в промышленных условиях / И.Л. Никулин, А.И. Цаплин, А.С. Коряковцев // *Прикладная математика и механика : Вестн. Перм. гос. тех. ун-та*. – 2005. – №1. – С. 3–8.

5. Бочкарев, С.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем : учеб. пособие / С.В. Бочкарев, А.И. Цаплин. – Пермь : Пермский ЦНТИ, 2006. – 262 с.

The Numerical Modeling of Temperature-Velocity Factors Influence on Single Crystal Ingot Formation

I. L. Nikulin, A. I. Tsaplin

Perm State Technical University, Perm

Key words and phrases: solidification; single crystal; production parameters; crystallization front.

Abstract: A macroscopic mathematical model of thermo-physical solidification of single crystal casting is proposed. The equation of thermal energy transfer and boundary conditions are formulated. The computational error estimation is given. The possibility of forecasting solidification modes enabling to increase productivity is shown.

© И.Л. Никулин, А.И. Цаплин, 2007