

УДК 519.252

А.А. ЖУКОВ¹, Ю.Ю. МАЛЬЦЕВА²

¹*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва «РГАТА», Россия*

²*ОАО «НПО»Сатурн», Рыбинск, Россия*

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ГТУ

Рассмотрен способ получения крупногабаритных протяженных отливок типа «лопатка» методом направленного затвердевания с использованием прямого электронагрева металла в литейной форме. Приведена математическая модель затвердевания отливки с учетом внутренних источников теплоты от воздействия электрического тока

литые лопатки из жаропрочных сплавов, прямой электронагрев, макроструктура отливки, температурный градиент, теплоотвод, направленное затвердевание, усталостные испытания

Производство литых лопаток для авиационных газотурбинных двигателей, а также энергетических установок связано с проблемой оптимального расхода дорогостоящих жаропрочных сплавов. В соответствии с требованиями международных стандартов системы качества в отливках не допускается использование в составе шихты металла вторичного переплава (возврата). Эти же требования распространяются и на технические условия литья лопаток для двигателей с повышенным ресурсом. Так для энергетической турбины двигателя ГТД 110 требуется ресурс 25 тыс. часов до капитального ремонта. Возврат сплава (забракованные отливки, литниковые системы, прибыли и т.п.), остающегося на предприятии отправляют на металлургические заводы по цене на 70% ниже стоимости исходных свежих материалов. Так, например, для литья турбинной лопатки 4-й ступени ГТД 110 весом 10 кг высотой 700 мм в серийном технологическом процессе вес литниковой системы составляет 50 кг при традиционной технологии (применение стояка с боковым подводом питания в перо лопатки). При использовании керамического войлока с неравномерным утеплением различных по высоте зон лопатки

удается сократить вес прибыли до 16 кг, не более. Методы направленной кристаллизации, которые обеспечивают получение плотных отливок практически без литейной прибыли и литниковой системы неэкономичны для лопаток, к которым не предъявляются требования по обеспечению столбчатой структуры. Поэтому задача создания технологий литья лопаток с равноосной структурой и минимальной литниковой системой является весьма актуальной. Решение данной проблемы позволит существенно сократить издержки производства в части расходования материальных ресурсов, снизить цену двигателя и обеспечить предприятиям отрасли соответствующую нишу рынка газотурбинных двигателей.

Эффективный способ [1] направленного затвердевания лопаток газовых турбин реализуется с помощью устройства [2]. Литейная П-образная форма с открытым дном, устанавливается на двухсекционный кристаллизатор, каждая из секций которого является электродом цепи постоянного или переменного электрического тока. В соответствии с общепризнанной технологией литья сталей и жаропрочных сплавов по выплавляемым моделям форма

нагревается в печи до 800...1000 град. С. После заливки формы замыкается цепь между электродами, и по отливке течет ток. Вблизи кристаллизатора образуется зона твердого металла. Так как удельное электросопротивление жидкого металла примерно в 1,5...2,5 раза больше твердого, то жидкий металл разогревается интенсивнее чем твердый. Для надежного обеспечения жидкой зоны в прибыльной части отливки во время кристаллизации предусмотрен индуктор, который охватывает верхнюю литниковую систему и поддерживает металл в жидком состоянии. Так как температура печи подогрева форм ниже температуры плавления металла, то в области затвердевания происходит постоянный отвод теплоты от отливки к поверхности печи. Это приводит к образованию положительного температурного градиента в области фронта затвердевания и созданию условий для направленного затвердевания.

Принцип управления таким процессом основан на поддержании постоянной температуры жидкого сплава в верхней части отливки. В зависимости от значения данного параметра возможны три состояния – плавление, затвердевание и динамическое равновесие, когда скорость затвердевания равна скорости плавления (нулевая скорость). Электрическими параметрами процесса являются плотность тока и напряжение, подаваемое на отливку. По мере нарастания твердого слоя электросопротивление всей отливки уменьшается, вследствие чего повышается плотность тока. Если процессом не управлять, то повышение плотности тока, а значит и температуры жидкого сплава в верхней части отливки приведет к прекращению процесса затвердевания. Возможное повышение температуры можно компенсировать двумя способами: во-первых, уменьшением напряжения с целью поддержания постоянной плотности тока при условии постоянства температуры внутренней поверхности печи подогрева; во-вторых, путем уменьшения температуры печи по-

догрева при постоянном напряжении на отливке. Во втором случае по мере нарастания твердого слоя происходит повышение плотности тока, однако повышение температуры жидкого сплава компенсируется уменьшением температуры печи подогрева.

Преимуществом нового способа направленного затвердевания по сравнению с известными является возможность обеспечения процесса без вытягивания формы с отливкой из зоны нагрева, отсутствие графитовой нагревательной оснастки, короткий технологический цикл, что особенно важно при литье в вакуумных установках, габариты которых ограничены.

Для реализации рассмотренного способа в производстве был выполнен расчет технологических параметров процесса, важнейшими из которых являются сила электрического тока, температура печи подогрева, время затвердевания, которые обеспечивают последовательное затвердевание отливки. Задачу расчета параметров литья применительно к лопатке газовой турбины ГТД 110 решали с помощью программы моделирования литейных процессов САМ ЛП «ПОЛИГОН» на PC Pentium-2.

Дифференциальное уравнение температурного поля отливки (1) учитывает тепловыделение в результате влияния электрического потенциала во всем объеме отливки согласно уравнению (2).

$$\alpha(\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + L\gamma(\partial \psi(T) / \partial \tau) + (\chi \partial \varphi_i / \partial n)^2 \rho(T) / (c\gamma) = \partial T / \partial \tau; \quad (1)$$

$$\chi(\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 + \partial^2 \varphi / \partial z^2) = 0. \quad (2)$$

Температурное поле в литейной форме представлено в виде дифференциального уравнения

$$\alpha(\partial^2 T_\phi / \partial x^2 + \partial^2 T_\phi / \partial y^2 + \partial^2 T_\phi / \partial z^2) = \partial T_\phi / \partial \tau, \quad (3)$$

где T – температура отливки, °С;

T_ϕ – температура формы, °С;

ρ – удельное электрическое сопротивление отливки, Ом·м;

c – удельная теплоемкость отливки, Дж/(кг*К);

α – температуропроводность сплава, м²/с;

x, y, z – координаты в области пространства,

ограниченного поверхностью S , м;

n – нормаль к поверхности;

τ – время, с;

α_{ϕ} – температуропроводность формы, м²/с;

γ – плотность отливки, кг/м³;

ψ – относительное количество твердой фазы в объеме двухфазной зоны отливки;

L – удельная теплота кристаллизации сплава, Дж/кг;

χ – удельная электрическая проводимость, Ом⁻¹*м⁻¹;

I – сила тока, А;

ϕ – электрический потенциал, В.

Расчет проводили для отливки лопатки высотой 500 мм с поперечными габаритами 202 × 342 мм, затвердевающей в электрокорундовой форме с толщиной стенки 20 мм. Время затвердевания отливки при температуре печи подогрева 900 °С составило 70 мин в диапазоне изменения силы тока от 5000 до 500 А.

В замке и пера лопатки 3-й ступени двигателя ГТД 110 из сплава ЧС88-УВИ длиной 500 мм с пропусканием через отливку электрического тока силой 5000 – 500 А преимущественно величина зерна составляет не более 1...2 мм. Особенно важным является наличие мелкозернистой структуры на входной кромке пера лопатки, где, как правило, возникает очаг усталостного разрушения. Известно, что с уменьшением величины зерна повышаются усталостные характеристики сплавов.

Мелкозернистое строение отливки, полученной под действием электрического тока объясняется наличием электромагнитной конвекции в результате электросилового воздействия на затвердевающий металл. Конвекция приводит к разрушению дендритных ветвей, которые становятся дополнитель-

ными центрами кристаллизации. С другой стороны, наложение магнитного поля, которое возникает от взаимодействия электрических полей двух близко расположенных лопаток, приводит к уменьшению переохлаждения и препятствует развитию дендритной структуры [3]. При этом увеличивается скорость зарождения центров кристаллизации, уменьшается скорость их роста, что и обуславливает образование более мелкого зерна с плотной структурой отливки. Главной упрочняющей фазой в сплаве ЧС88УВИ является γ^1 -фаза на основе интерметаллида Ni₃Al. Образцы, закристаллизованные под действием электрического тока имеют более тонкую и упорядоченную структуру γ^1 -фазы. Благодаря мелкодисперсной структуре упрочняющей фазы увеличивается время ее коагуляции и неблагоприятного укрупнения в процессе эксплуатации лопатки, что способствует повышению ресурса работы двигателя.

По результатам спектрального анализа химического состава элементов образцов, вырезанных из пера лопатки в направлении ее последовательного затвердевания, все основные элементы находятся в пределах технических условий на данный сплав и практически равномерно распределены по телу пера лопатки. Несмотря на последовательное затвердевание лопатки в течение относительно длительного времени отсутствует зональная ликвация химических элементов. Это объясняется непрерывным перемешиванием жидкой фазы сплава в процессе кристаллизации под действием электромагнитной конвекции.

По результатам усталостных испытаний турбинных лопаток 3-й ступени ГТД 110 одна из лопаток, отлитая из 100% возврата сплава (вторичного переplava) ЧС88УВИ, выстояла при усталостных испытаниях на собственных частотах колебаний 178-190 Гц последовательные нагрузки при максимальных напряжениях 140 МПа, 160 МПа, 180 МПа при 20 млн. циклах для каждого нагружения и сло-

малась при напряжении 220 МПа после наработки 14,7 млн циклов. Суммарная наработка при напряжениях от 140 до 220 МПа составила 74,7 млн. циклов.

Вес литниково-питающей системы крупногабаритных лопаток турбины двигателя ГТД 110, отличных на установке УПВ 6-НК, составил 6 кг на две лопатки весом 10 кг каждая. В традиционных методах литья вес прибыли составляет не менее 30 кг на две лопатки при требовании технических условий – только 100% свежего сплава. Учитывая тот факт, что при переплаве свежего сплава его цена при возврате на металлургические заводы существенно снижается, процесс направленного затвердевания методом прямого электронагрева следует отнести к разряду ресурсосберегающих технологий.

На ОАО НПО «Сатурн» была спроектирована и изготовлена установка для крупногабаритного литья УПВ6-НК, которая обеспечивает реализацию данного способа затвердевания лопаток. В отличие от известных вакуумных плавно-заливочных установок данная печь содержит кристаллизаторы-электроды, через которые осуществляется электроподвод и интенсивное охлаждение отливки. Печь подогрева форм имеет шесть автономных зон нагрева, которые позволяют создать в отливке дополнительный температурный градиент, обеспечивающий повышенную фильтрацию сплава в процессе его направленного затвердевания. Для обеспечения стабильности поддержания температуры в верхней части отливки печь содержит дополнительный индуктор, охватывающий прибыльную часть отливки. Новый технологический процесс обеспечивает получение плотной структуры металла, которая достигается не только путем создания тепловых условий, но и благодаря электросиловому воздействию на металл в процессе его кристаллизации.

При этом наблюдается измельчение дендритного строения отливки, которое положительным образом влияет на эксплуатационные свойства сплавов.

Результаты испытаний механических свойств и усталостных характеристик крупногабаритных лопаток, а также минимальный расход дорогостоящего жаропрочного сплава позволяют сделать вывод, что метод литья направленного затвердевания крупногабаритных лопаток под действием электрического тока позволит достичь наибольших технико-экономических показателей и обеспечить высокую рентабельность производства при изготовлении крупногабаритных протяженных, тонкостенных отливок типа створок авиационных двигателей и турбинных лопаток мощных энергетических установок мощностью 110 и более Мвт, к которым предъявляются особые требования по ресурсу.

Литература

1. Калюкин Ю.Н., Мальцева Ю.Ю., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Высокоэффективная технология литья крупногабаритных лопаток ГТД // Литейное производство. – 2001. – 11. – С. 7–9.
2. А.с. 104615 СССР. Устройство для получения отливок направленной кристаллизацией / Ю.Н. Калюкин, П.В. Лебедев // Открытия. Изобретения. – 1983. – № 37. – С. 43.
3. Ефимов В.А., Эльдаханов А.С.. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.

Поступила в редакцию 25.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Шатульский, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва «РГАТА», Рыбинск.