

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ГТД ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ «ПОЛИГОН» И PROCAST

Монастырский В.П., Монастырский А.В., Левитан Е.М.
ФГУП ММПП «Салют»

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО 2007, № 9, стр.29-34

Разработана методика применения компьютерного моделирования при отработке технологии литья сложных и ответственных деталей газотурбинных двигателей.

С помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон» проведен анализ существующей технологии и установлены причины возникновения брака по усадочной пористости при литье рабочих лопаток силовой турбины энергетической установки СТ-20.

На основании полученных результатов разработана конструкция литейного блока с питанием в перо лопатки и выбраны температурно-временные параметры технологического процесса, обеспечивающие получение годных отливок.

Изготовление опытной партии отливок дало положительные результаты.

В современном литейном производстве вопросы освоения новых отливок, повышения выхода годного, снижения трудоемкости и материальных затрат решаются с применением программных комплексов, предназначенных для моделирования литейных процессов. Это позволяет снизить затраты на проектирование и доводку литейной технологии поскольку отработка конструкции литниково-питающей системы (ЛПС) и температурно-временных параметров технологического процесса ведется не на реальных дорогостоящих плавках, а в виртуальном пространстве математической модели.

Низкая стоимость и короткие сроки выполнения компьютерного эксперимента, а также большой объем и наглядность полученной информации о ходе технологического процесса и качестве будущей отливки делают компьютерное моделирование важнейшим инструментом опытного производства.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии литья крупногабаритных рабочих лопаток силовой турбины наземной энергетической установки СТ-20 из никелевого жаропрочного высококоррозионного сплава ЧС70 в литейной установке УППФ-3М.

По требованиям, предъявляемым к литой заготовке, рабочая лопатка является наиболее сложной деталью газовой турбины. Геометрия рабочей лопатки такова, что в отливке практически всегда образуются тепловые узлы в местах перехода от пера к бандажной полке и замку. В крупногабаритных лопатках зоной формирования усадочных дефектов является также центральная часть пера.

Отливки проходят люминесцентный и рентгенографический контроль, выявляющий наличие как макро- так и микропористости с размером одиночных пор более 0.2 мм. Опытным путем было установлено, что дефекты, видимые на рентгенографическом контроле соответствуют объемной доле пор, начиная от 0.1% - 0.2% по шкале модуля пористости СКМ «Полигон». Получение реалистического прогноза качества отливки при столь малой объемной доле пор (т.е. в зоне микропористости) требует тщательного учета условий технологического процесса, правильного выбора параметров модели пористости и задания реальных теплофизических свойств сплава в твердо-жидком состоянии. Для

проверки адекватности исходных условий привлекаются результаты рентгенографического контроля и металлографических исследований отливок из данного сплава, полученных ранее.

На рис.1 показана макро и микроструктура рабочей лопатки 3 ступени силовой турбины СТ-20, отлитой по серийной технологии. Исследования проводились в центральной части замка, в пере лопатки вблизи радиуса перехода в замок и в центральной зоне пера. Выбор сечений для исследований был сделан на основании предварительных расчетов и результатов рентгенографического контроля. Методом количественной металлографии с применением программы SIAMS была сделана оценка объемной доли пор и размера пор в исследованных сечениях (таблица 1). Исследования показали наличие в указанных сечениях дефектов усадочного происхождения, расположенных в основном по границам зерен. Поры образовались после механического контакта дендритов соседних зерен вследствие недостаточного питания расплавом.

Технологический процесс литья рабочих лопаток. Теплоизолированная керамическая форма, предварительно нагретая в печи подогрева форм до температуры 1050°С, переносится в печь УППФ-3М и устанавливается в стальную обечайку под заливку. После этого печь вакуумируется, заранее приготовленный металл сливается в форму. После напуска воздуха, форма выставляется на плац.

При отработке технологии литья могут изменяться температура сливаемого металла, конструкция литейного блока и схема его утепления. Целью настоящей работы являлась разработка литниково-питающей системы (ЛПС), обеспечивающей получение плотной отливки

Таблица 1. Объемная доля и размеры пор в сечениях отливки, полученной по серийной технологии.

Параметр	Замок	Замок-перо	Перо
Площадь анализа, кв.мкм	3818713.03	3813539.94	3822802.69
Общая пористость P, %	0.73	0.09	1.27
Минимальная пористость по полю, %	0.37	0.03	0.76
Максимальная пористость по полю, %	1.07	0.25	2.05
Число пор	119	48	196
Среднее квадратичное отклонение P	0.34	0.08	0.45
Минимальный диаметр поры D _{мин} , мкм	3.37	3.37	3.37
Максимальный диаметр поры D _{макс} , мкм	61.11	31.56	71.99
Средний диаметр поры D _{ср} , мкм	12.98	8.50	14.58
Среднее квадратичное отклонение D	11.49	4.88	-

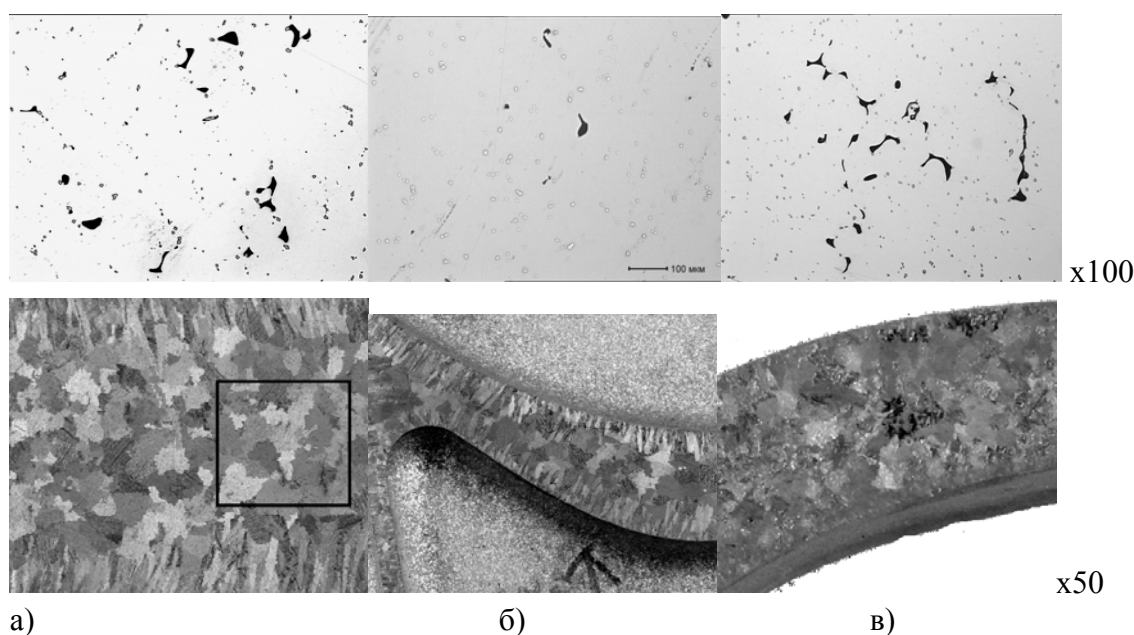


Рисунок 1. Результаты металлографического исследования лопатки 3 ступени энергетической установки СТ-20. а) – центральная часть замка; б) – сечение пера вблизи радиуса перехода в замок; в) центральная зона пера.

Методика моделирования

В литейном производстве ФГУП ММПП «Салют» проектирование литейной технологии ведется с применением систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон» (Россия) [1] и ProCAST (Франция) [2]. Подготовка к моделированию литейного процесса с использованием этого программного обеспечения включает следующие этапы:

- Создание геометрической модели.
- Формулировка модели технологического процесса (выбор граничных условий)
- Выбор теплофизических свойств сплава и параметров модели пористости.

В настоящей работе моделирование литейного процесса проводилось в системе «Полигон». Система ProCAST была использована при подготовке геометрической модели, для расчета свойств сплава и для уточненного расчете окончательного варианта технологического процесса.

Подготовка геометрической модели. Системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон» и ProCAST решают дифференциальные уравнения тепло и массопереноса в кристаллизующейся отливке методом конечных элементов (КЭ), для реализации которого необходимо построение сеточной модели расчетной области, узлы которой являются вершинами тетраэдров. Под расчетной областью понимается совокупность всех тел, находящихся в тепловом взаимодействии с кристаллизующимся металлом. В данном случае расчетная область состоит из металла, керамической оболочки и теплоизоляции. Таким образом, требуется получить КЭ модель, состоящую из трех сопряженных между собой сеток.

Построение 3D модели и создание сетки для отливки осуществлялось в САД-системе UNIGRAPHICS. После этого КЭ-сетка отливки переносилась в генератор сеток MeshCAST, поставляемый как модуль системы ProCAST. КЭ-сетки керамической оболочки и теплоизоляции создавались непосредственно в генераторе MeshCAST, минуя стадию создания 3D-моделей этих тел. Следует отметить, построение 3D-модели керамической оболочки в САД-системе является трудоемким процессом, а построенная

таким образом оболочка чаще всего далека от реальности. Генератор MeshCAST позволяет в автоматическом режиме быстро построить реалистичную геометрию керамической оболочки и получить в оболочке сетку, гарантированно сопряженную с сеткой отливки.

Основные этапы подготовки геометрической модели схематически представлены на рисунке 2.

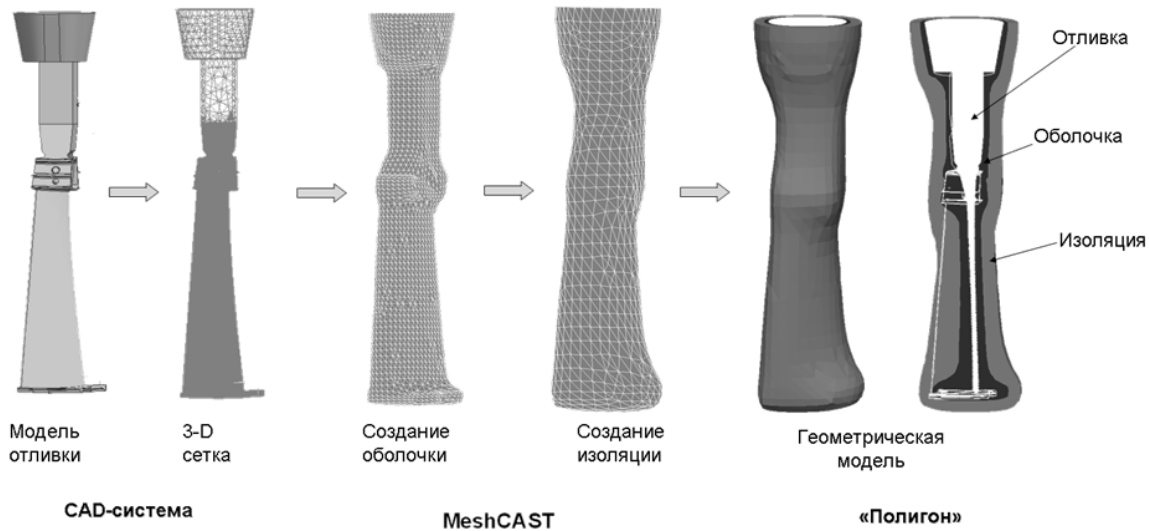


Рисунок 2. Подготовка геометрической модели с применением CAD- системы UNIGRAPHICS и генератора сеток MeshCAST.

Модель технологического процесса (последовательность расчета).

Предполагалось, что существенную роль в формировании отливки играет распределение температуры в форме в момент заливки металла и время нахождения залитой формы в печи под вакуумом.

Во время перемещения литейного блока из печи подогрева форм в литейную установку и ожидания заливки происходит неравномерное охлаждение формы. Наиболее сильно охлаждается внутренняя поверхность чаши. Поскольку металл в чаше служит открытой прибылью, температура чаши оказывает существенное влияние на качество отливки, а время от выемки блока из печи подогрева до заливки металла является важным технологическим параметром, который контролируется.

Заполнение формы металлом происходит в течение несколько секунд. Как показали предварительные оценки, продолжительность заливки металла значительно меньше времени до начала кристаллизации проблемных мест отливки. Это означает, что до начала кристаллизации успевает пройти некоторое выравнивание распределения температуры, сформировавшегося при заполнении формы. В связи с этим предполагалось, что гидродинамика заполнения формы может оказывать существенно меньшее влияние на качество отливки, чем такие параметры процесса, как температура формы и температура заливаемого металла.

Остывание залитого металла в литейной установке в условиях вакуума происходит за счет лучистого теплообмена с поверхности теплоизоляции и с открытой поверхности металла в чаше. После напуска воздуха в камеру и при охлаждении на плацу цеха существенный вклад в охлаждение литейного блока вносит конвективный теплообмен. После выноса формы в цех, открытая поверхность металла утепляется теплоизоляционным материалом.

На основании этих соображений была сформулирована модель технологического процесса, реализованная в следующей последовательности расчетов:

1. Расчет остывания пустой формы с момента выемки из печи подогрева форм до заливки металла.
2. Моделирование процесса кристаллизации с момента заполнения формы до напуска воздуха.
3. Моделирование процесса кристаллизации с момента напуска воздуха до полного затвердевания на открытом воздухе в цехе.

Расчет свойств материала отливки

В виду трудностей экспериментального определения, теплофизические свойства сплава в твердожидком состоянии были рассчитаны с помощью термодинамической базы данных CompuTherm, входящей в состав системы ProCAST.

Термодинамическая база данных CompuTherm системы ProCAST 2006 позволяет определить по химическому составу сплава теплофизические свойства, необходимые для моделирования процессов затвердевания, такие как плотность, теплопроводность, доля твердой фазы, энтальпия, вязкость в зависимости от температуры сплава.

Непосредственное использование этих данных в системе «Полигон» невозможно, поскольку форматы свойств сплава в этих двух программах различны. Для конвертации данных разработан модуль CastMan, совместимый с системой ProCAST на уровне файлов. Модуль позволяет рассчитать теплоемкость сплава при температуре солидус и теплоту кристаллизации сплава по зависимости энтальпии от температуры, а также относительное изменение объема сплава при кристаллизации по зависимости плотности от температуры.

Как известно, в процессе кристаллизации происходит перераспределение легирующих элементов между твердой и жидкой фазой. Возникающие при этом градиенты концентрации в расплаве приводят к возникновению диффузионных потоков на границе раздела твердой и жидкой фазы. Полнота протекания диффузионных процессов будет определять химический состав и температуру фактического ликвидуса расплава вблизи поверхности раздела. В программных комплексах «Полигон» и ProCAST степень неравновесности процесса кристаллизации может быть учтена путем задания соответствующей кривой распределения твердой фазы в интервале кристаллизации. Термодинамическая база данных CompuTherm предлагает две модели кристаллизации расплава – в соответствии с равновесной диаграммой состояния (правило рычага) и по уравнению Шайла [3]. На рисунке 3 представлены кривые объемной доли твердой фазы в интервале кристаллизации для сплава ЧС70, рассчитанные по модели Шайла и по правилу рычага при изменении химического состава в пределах паспорта.

В таблице 2 представлены значения интервала кристаллизации, рассчитанные по уравнению Шайла и правилу рычага.

Форма кривой $f_s(T)$ существенно влияет на прогноз пористости в отливке. Усадка, возникающая вблизи ликвидуса, может быть довольно легко компенсирована притоком расплава, усадка, возникающая вблизи солидуса, уже ничем не может быть компенсирована и превращается в пористость. Опытным путем было установлено, что влияние формы кривой $f_s(T)$ на микропористость в отливке хорошо коррелирует с параметром, характеризующим величину усадки на градус снижения температуры.

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \beta(1 - f_{ml}) \frac{\Delta T_{SL}}{T_{ml} - T_S} \quad (1)$$

где θ - безразмерная температура; f_{ml} , T_{ml} - объемная доля твердой фазы, при которой она образует неподвижный каркас и соответствующая этому состоянию температура; ΔT_{SL} - интервал кристаллизации; β - относительное изменение объема при кристаллизации (см. (6)). Чем больше $\Delta P/\Delta \theta$, тем меньше микропористость.

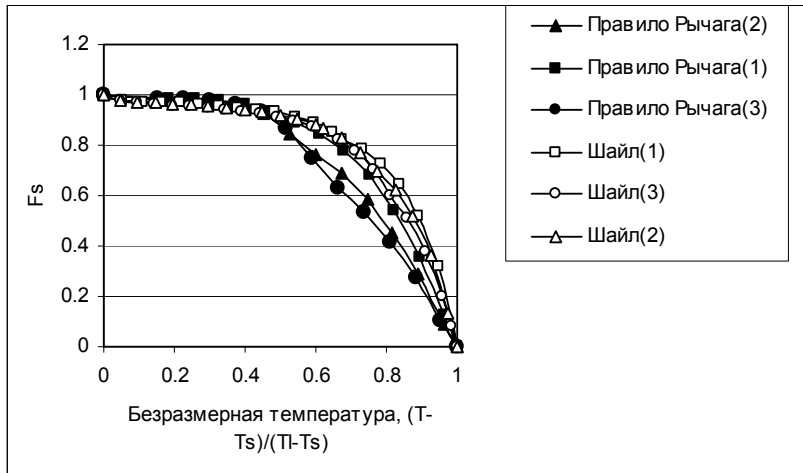


Рис.3 Кривые распределения доли твердой фазы в интервале кристаллизации сплава ЧС70 в зависимости от химического состава в пределах паспорта, рассчитанные по правилу рычага и по уравнению Шайла [3].

1 – нижний предел легирования, 2 – средний состав; 3 – верхний предел легирования. T - температура; T_S - температура солидуса; T_L - температура ликвидуса.

Таблица 2. Интервал кристаллизации сплава ЧС70.

Состав сплава	Интервал кристаллизации, С	
	Правило рычага	Уравнение Шайла
нижний предел	113	222
средний состав	110	239
верхний предел	110	243

Настройка модели пористости

Для получения адекватной картины микропористости в отливке важно правильно определить усадочные свойства. Кинематическая вязкость, коэффициент термического расширения расплава и изменение объема при плавлении могут быть определены по расчетным зависимостям вязкости и плотности сплава, полученным с помощью термодинамической базы данных CompuTherm. Все остальные параметры модели определяют условия формирования усадочной пористости, зависящие как от свойств, так и от особенностей технологического процесса.

Проницаемость дендритного каркаса. Формирование микропористости в отливке происходит в условиях затрудненного течения расплава сквозь дендритный каркас, формирующийся в двухфазной зоне отливки. Проницаемость дендритного каркаса по Карману-Козени (Carman-Kozeny) определяется выражением [4]:

$$K = \frac{(1 - f_s)^3 d^2}{180 f_s^2} \quad (2)$$

Здесь – d – характерных размер междендритных каналов, в которых протекает расплав; f_s - доля твердой фазы. Обычно в качестве d принимают расстояние между вторичными осями дендритов λ_{II} .

В САМ ЛП «Полигон» принято выражение для проницаемости дендритного каркаса виде:

$$K = K_0 \cdot \left(\frac{1 - f_s}{f_s} \right)^2, \text{ где } K_0 = const \quad (3)$$

Из сравнения выражений (2) и (3) видно, что

$$K_0 = \lambda_{II}^2 \frac{f_L}{180} \quad (4)$$

Как известно, расстояние между вторичными осями дендритов зависит от скорости охлаждения расплава [5]. На основании известных экспериментальных данных было получено уравнение, описывающее эту зависимость для никелевых жаропрочных сплавов [6].

$$\lambda_{II} = 43.7 \cdot T^{-0.437}, \text{ мкм} \quad (5)$$

В этом выражении T - скорость охлаждения расплав в К/сек. Кроме того, K_0 меняется и в зависимости от доли жидкой фазы, т.е. по высоте двухфазной (твёрдо-жидкой) зоны. Удовлетворительное совпадение значений проницаемости дендритного каркаса по (2) и (3) всей высоте двухфазной зоны достигается при выборе K_0 по номограмме, представленной на рисунке 4.

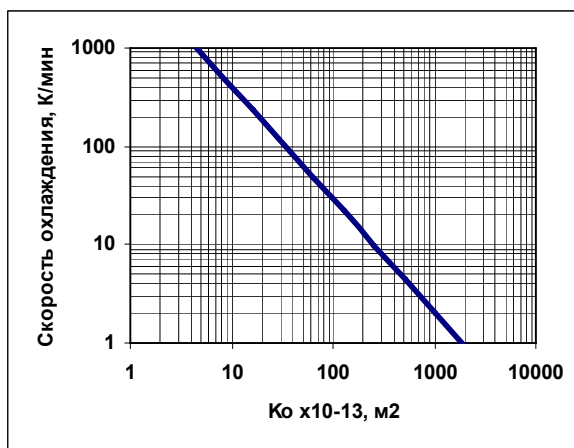


Рис.4. Выбор параметра K_0 для никелевых жаропрочных сплавов в зависимости от скорости охлаждения расплава.

Относительное изменение объема сплава при кристаллизации. Относительное изменение объема при переходе из жидкого состояния в твердое определяется выражением

$$\beta(f_L) = \frac{\rho_s(f_L)}{\rho_L(f_L)} - 1 \quad (6)$$

В этом выражении $\rho_S(f_L), \rho_L(f_L)$ - плотность твердой и жидкой фазы, соответственно; f_L - доля жидкой фазы в данный момент кристаллизации

Эта величина характеризует усадку сплава при данном значении доли жидкой фазы в данной точке границы раздела фаз. Для определения $\beta(f_L)$, с помощью термодинамической базы данных CompuTherm была рассчитана плотность твердой и жидкой фазы сплава ЧС70 в пределах интервала кристаллизации. Рассчитанная по этим данным кривая относительного изменения объема $\beta(f_L)$ сплава ЧС70 показана на рисунке 5. Расчет химического состава твердой и жидкой фаз проводился по правилу рычага. В справочной литературе приводится средняя величина усадки, рассчитываемая по разности плотности металла при температурах ликвидус и солидус. Для сплава ЧС70 эта величина равна $\bar{\beta} = (\rho_S(0)/\rho_L(1) - 1) \cdot 100\% = 4.4\%$. Как видно рисунка 5, фактическое изменение объема расплава существенно меньше этой величины и зависит от доли жидкой фазы.

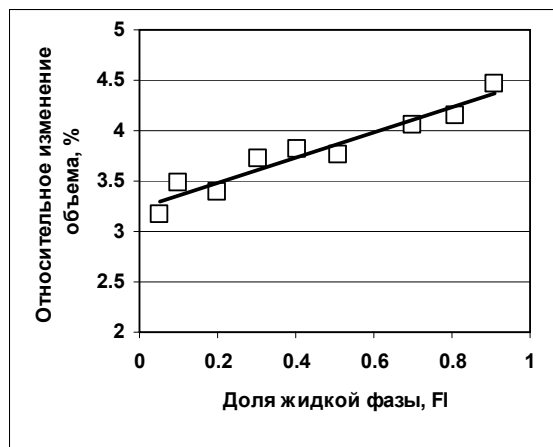


Рис.5 Относительное изменение объема сплава ЧС70 при кристаллизации в зависимости от доли жидкой фазы.

Спектр реализации усадки. Прогноз пористости в отливке зависит от того, как происходит усадка сплава в интервале кристаллизации.

Если основная усадка сплава происходит в области больших значений f_L (f_L - объемная доля жидкой фазы), где проницаемость дендритного каркаса велика, то возникающие усадочные дефекты будут ликвидироваться за счет притока расплава, т.е. будет формироваться усадочная раковина. Если основная усадка сплава происходит в области малых значений f_L , когда дендритный каркас уже малопроницаем, то возникающие усадочные дефекты будут формировать усадочную пористость.

Особенности кристаллизации сплава могут быть описаны функцией, называемой спектр реализации усадки. Спектр реализации усадки – отношение усадки по достижении данной величины доли жидкой фазы к полной усадке, получаемой при кристаллизации объема расплава.

$$\omega(f_L) = \frac{\int_{f_L}^1 \frac{\beta}{1+\beta} df_L}{\int_0^1 \frac{\beta}{1+\beta} df_L} \quad (7)$$

Из этого выражения видно, что, при $\beta(f_L) = const$ спектр реализации усадки – прямая линия $\omega = (1 - f_L) = (1 + \beta)f_S$. Поскольку $f_L + f_S + f_P = 1$, доля твердой фазы изменяется в пределах $f_S \in [0, f_S + f_P = 1]$. Объемная доля пор определяется выражением $f_P = \beta f_S$, пользуясь которым получаем $f_S \in [0, 1/1 + \beta]$.

Критические доли жидкой фазы при усадке. Из этой группы параметров модели пористости САМ ЛП «Полигон» только первый (P_{ln} , см. справочное руководство модуля «Сплав» САМ ЛП «Полигон») имеет физический смысл и поддается априорной оценке. Остальные параметры этой группы имеют отношение скорее к алгоритмам модели пористости и должны быть определены методом подбора на основе имеющихся экспериментальных данных. Параметр P_{ln} определяет значение доли жидкой фазы, при котором возникает неподвижный каркас твердой фазы. Там, где такого каркаса нет, возникающая усадка приводит к понижению уровня расплава в форме и формированию усадочной раковины. Значение P_{ln} зависит от типа формирующейся макроструктуры. Глобулярные зерна зарождаются и растут в твердо-жидкой зоне отливки. По разным оценкам, в случае глобулярных равноосных зерен формирование непрерывного каркаса происходит при доле жидкой фазы от 0.5 [7] до 0.8. Столчатых зерна берут начало за пределами двухфазной зоны и поэтому образуют неподвижный каркас твердой фазы во всем диапазоне значений f_L . В этом случае критическая доля P_{ln} равна 0.

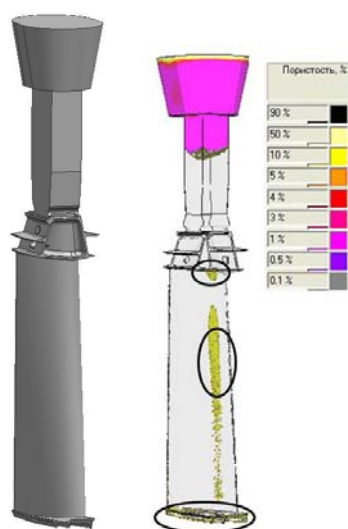
Значения остальных параметров этой группы выбирается на основании экспериментальных данных по пористости отливок и данного сплава.

Разработка технологии литья

На основании вышеизложенной методики были подготовлены исходные данные и проведено моделирование процесса литья рабочих лопаток 3 ступени силовой турбины СТ-20 по существующей технологии. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами рентгенографического контроля, что подтверждает адекватность исходных данных и обоснованность выбранных настроек модели пористости. На рисунке 6 показана область сосредоточения в отливке усадочных дефектов с объемной долей $P \geq 0.1\%$.

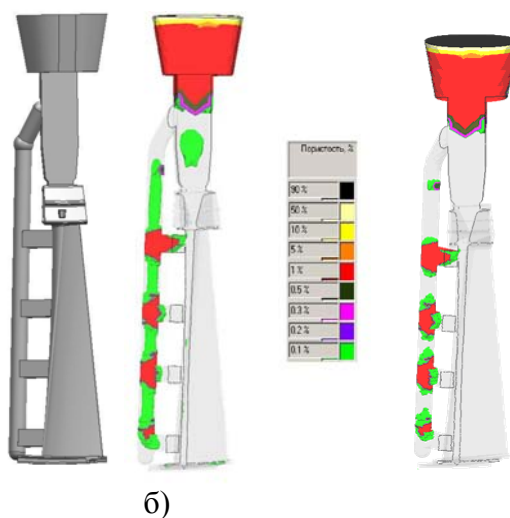
С целью устранения этих дефектов было поведено моделирование в СКМ «Полигон» процесса затвердевания отливок с различными размерами прибыльной части. В качестве критерия принималось, что отливка считается годной, если по результатам моделирования пористость в отливке в целом отсутствует, а в проблемных сечениях $P \leq 0.1\%$. На основании расчетов был сделан вывод о невозможности устранения пористости в перо путем наращивания массы прибыли или изменения схемы утепления литейного блока. В связи с этим было решено провести проектирование ЛПС, допустив установку питателей на перо лопатки.

На рисунке 7а показана 3D-модель литейного блока с четырьмя щелевыми питателями шириной 25 мм, расположенными вдоль спинки пера у входной кромки (питание примерно в S_{max}). Питатели соединены стояком $\varnothing 25$ мм, который в свою очередь соединяется с ножкой чаши. По результатам моделирования, такая конструкция литейного блока обеспечивает получение плотного пера лопатки. В радиусах перехода из пера в бандажную полку и в замке лопатки возможна пористость не более 0.1% по шкале СКМ «Полигон» (рис.7б).



а) б)

Рис.6. Геометрическая модель отливки (а) и прогноз пористости в отливке, получаемой по исходной технологии (б). Показана пористость, объемная доля которой равна 0.1% и выше.



а) б) в)

Рисунок 7. 3D-модель (а) и результат моделирования усадочных дефектов в отливке со щелевыми питателями (б, в). Показана пористость, объемная доля которой равна 0.1% и выше (б) и 0.2% и выше (в) (по шкале СМК «Полигон»).

Рентгенографический контроль пяти опытных блоков предложенной конструкции подтвердил отсутствие пористости в пере лопатки. При капиллярно-люминесцентном контроле (КЛК) в месте среза прибыли, на радиусе перехода и между питателями, т.е. в местах, соответствующих рисунку 7б, была обнаружена микропористость.

На основании результатов опытных заливок был ужесточен критерий оценки качества отливок при моделировании. Было принято, что в отливке допускается пористость $P < 0.1\%$. На рисунке 8а показана 3D-модель литейного блока с четырьмя щелевыми питателями и диаметром стояка 38 мм, удовлетворяющая этому критерию при моделировании в СМК «Полигон» (рис.8б).

Для окончательной проверки разработанной конструкции литейного блока было проведено уточненное моделирование процесса в системе ProCAST с учетом заполнения литейной формы (рис 8в), подтвердившее результаты, полученные в СКМ «Полигон».

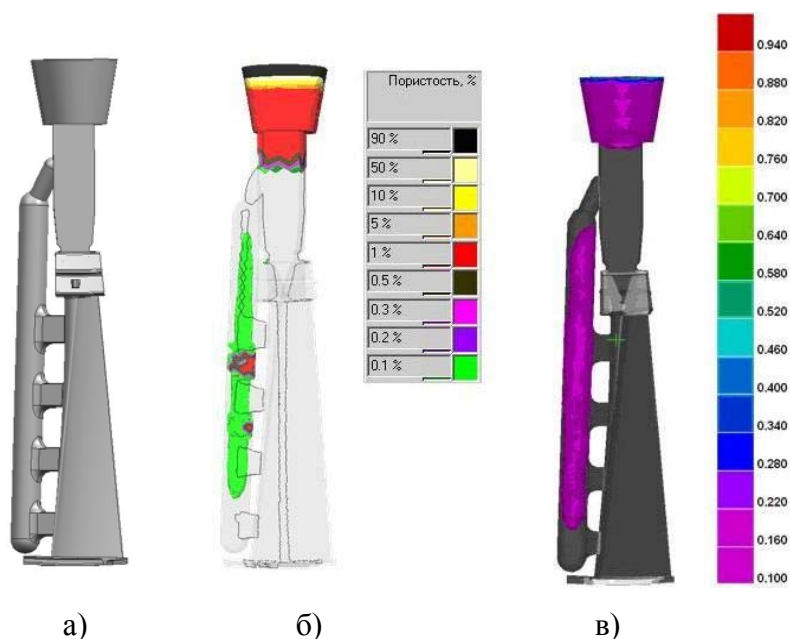


Рисунок 8. Окончательный вариант конструкции литейного блока (а) и результаты моделирования усадочных дефектов в СКМ ЛП «Полигон» (б) и ProCAST (в).

По электронной модели литейного блока был изготовлен комплект оснастки для сборки модельных блоков. Заливка опытной партии лопаток полностью подтвердила результаты моделирования. Положительный опыт заливки рабочих лопаток 3 ступени по предложенной технологии дал основание для разработки аналогичных литниково-питающих систем для рабочих лопаток 1 и 2 ступени силовой турбины СТ-20.

Выводы

1. Разработана методика подготовки данных для моделирования технологии литья крупногабаритных рабочих лопаток газовых турбин.
2. На опыте литейного производства ФГУП ММП «Салют» показана возможность применения методов компьютерного моделирования для разработки технологии литья сложных и ответственных отливок.
3. С помощью СКМ «Полигон» разработаны температурно-временные параметры технологического процесса и конструкция литейного блока для литой заготовки рабочих лопаток 1, 2 и 3 ступени силовой турбины наземной энергетической установки СТ-20, обеспечивающие получение плотной отливки, удовлетворяющей техническим условиям.

Литература

1. Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон». ООО.Фокад, С.-Петербург, www.focad.ru.
2. ProCAST, ESI Group, France, www.esi-group.com.
3. М.Флемингс. Процессы затвердевания. Пер с англ. «Мир», Москва, 1977, с.46-48.
4. A.J.Duncan, Q.Han, S.Viswanathan. Measurement of Liquid Permeability in the Mushy Zones of Aluminium-Copper Alloys. Metallurgical and materials transactions, v.30B, August 1999, pp.745-750.
5. М.Флемингс. Процессы затвердевания. Пер с англ. «Мир», Москва, 1977, с.177-181.
6. Светлов И.Л., Кулешова Е.А., Монастырский В.П. и др. Влияние направленной кристаллизации на фазовый состав и дисперсность структуры никелевых сплавов Известия АН СССР, Металлы, №1, 1990, с.86-93.
7. J.D. Hunt. Mater. Sci. Eng., 1984, vol. 65, pp. 75-83