

УДК 621.74.045

В.Ф. СОРОКИН¹, А.В. МАЛАХАТКО²¹ГП «Институт машин и систем», Харьков, Украина²ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕСС-ФОРМ ДЛЯ ЛИТЬЯ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрена методология компьютерного анализа литейных процессов, происходящих в пресс-формах для литья по выплавляемым моделям лопаток турбины. Анализ основан на применении при проектировании модельных и стержневых пресс-форм данных, полученных в результате расчета на прочность, а также гидродинамического и теплового расчетов.

формообразующая оснастка, выплавляемая модель, лопатка, компьютерное моделирование, аналитический эталон, заполнение пресс-формы, теплопередача, прочность

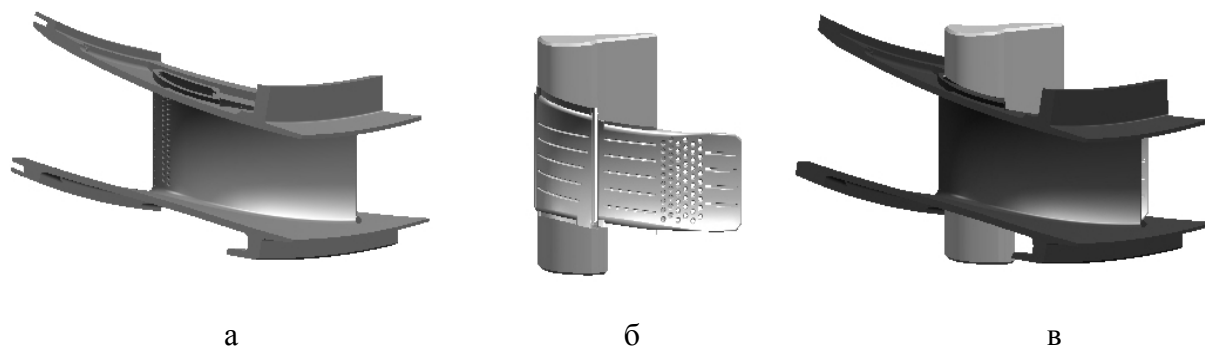


Рис. 1. Аналитические эталоны: а – лопатки соплового аппарата; б – керамического стержня; в – выплавляемой модели со стержнем

Повышение ресурса и надежности авиационных двигателей значительно усложнило конструкцию лопаток, особенно охлаждаемых, что привело к увеличению трудоемкости технологической подготовки производства. Заготовки охлаждаемых лопаток получают методом точного литья по выплавляемым моделям [1, 2]. Технологический процесс получения отливок этим методом включает в себя прессование выплавляемых восковых моделей (рис. 1, в) и керамических стержней, оформляющих внутренние поверхности лопаток (рис. 1, б).

Пресс-формы для изготовления выплавляемых моделей и стержней лопаток отличаются большим разнообразием конструкций, что обусловлено слож-

ной геометрией лопаток. Как правило, в пресс-формах имеется несколько направлений разъема и значительное количество отъемных частей, оформляющих поднутрения (рис. 2).

1. Формулирование проблемы

В настоящее время широкое развитие получили прогрессивные автоматизированные способы проектирования формообразующей оснастки для производства лопаток, основанные на применении компьютерных помощников инженера и CAD/CAM/CAE систем. Решение этой проблемы для турбинных лопаток авиационных двигателей рассмотрено в работах [3 – 6] и др.

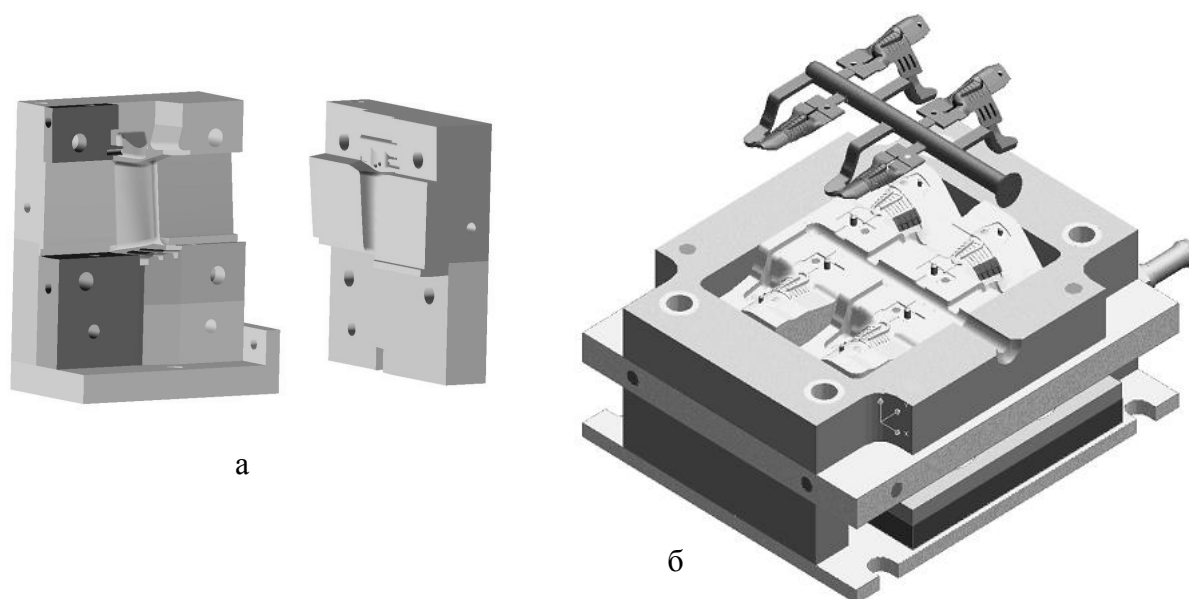


Рис. 2. Аналитические эталоны деталей:
а – съемной модельной пресс-формы; б – стационарной стержневой пресс-формы

В [4] представлена компьютерная технология подготовки производства лопаток (метод аналитических эталонов), обеспечивающая значительное сокращение сроков создания формообразующей оснастки при повышении ее качества. Данный метод предусматривает замену рабочих чертежей лопаток и оснастки аналитическими эталонами (объемными математическими моделями, построенными на языке аналитической геометрии) и комплексную автоматизацию всех этапов проектирования и изготовления оснастки.

В [5, 6] описаны прогрессивные способы проектирования и изготовления модельных и стержневых пресс-форм для производства лопаток, основанные на применении: трехмерного компьютерного моделирования; систем быстрого прототипирования (стереолитография, LOM-технология); деталей пресс-форм из композиционных материалов (эпоксипластов); станков с ЧПУ для высокоскоростной фрезерной и объемной электроэрозионной обработки.

В [3] представлены конструкции стационарных

стержневых пресс-форм, в которых полностью механизированы операции сборки-разборки формы.

В работах по данной проблеме отмечается, что наиболее ответственным и творческим этапом проектирования пресс-формы является формирование поверхностей и направлений разреза, а также геометрическая увязка формообразующих деталей. Из-за сложности геометрии лопаток минимизация количества поверхностей разреза зависит от квалификации конструктора и совершенства системы геометрического моделирования.

Однако процесс проектирования оснастки нельзя сводить только к построению ее геометрии без анализа процессов заполнения формы модельной массой и ее отвердевания, а также анализа температурного и напряженно-деформированного состояния пресс-формы.

В настоящее время на авиадвигателестроительных предприятиях такой анализ проводится по упрощенной методике [2], без учета особенностей геометрической формы лопаток. При этом практические результаты зачастую сильно отличаются от

расчетных, поэтому много времени тратится на доводку пресс-форм.

Целью данной статьи является разработка методологии компьютерного анализа литейных процессов, происходящих в пресс-формах для литья по выплавляемым моделям лопаток турбины, основанного на гидродинамическом, тепловом и прочностном расчетах.

2. Гидродинамический расчет

Правильно запроектированная пресс-форма должна обеспечивать выход воздуха из формообразующих полостей и свободную усадку моделей при прессовании. Для проверки этих возможностей необходимо при проектировании произвести гидродинамический расчет заполнения формы прессуемым составом и тепловой расчет затвердевания моделей и стержней.

Цель гидродинамического расчета – определение количества, размеров и местонахождения воздушных пробок, образующихся при перекрытии прессуемым составом зазоров между деталями пресс-формы.

Для этого расчета можно воспользоваться математической моделью нестационарного ламинарного течения вязкой жидкости, описываемой системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса и уравнением неразрывности.

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x(y, z)} + \nu \nabla^2 V_x(V_y, V_z) = \frac{\partial V_x(V_y, V_z)}{\partial t}; \\ \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{\partial V_z}{\partial t} = 0, \end{cases}$$

где ρ – плотность состава, кг/м³;

P – давление прессования, Па;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

V_x, V_y, V_z – проекции скорости движения состава, м/с;

t – время, сек.

Граничные условия на входе имеют вид:

$$P_0 = P_{\text{пресс}}; \quad V_0 = \frac{P_{\text{пресс}} d^2}{32 \mu l},$$

где $P_{\text{пресс}}$ – давление прессования, Па;

d – диаметр впускного отверстия, м;

l – длина впускного отверстия, м;

μ – динамическая вязкость состава, Па·сек.

Граничные условия на стенках пресс-формы:

$$V_x = V_y = V_z = 0.$$

Если гидродинамический расчет выявит наличие воздушной пористости, превышающей предельно допустимую величину, то в местах наиболее крупных воздушных пробок необходимо предусмотреть вентиляционные каналы или перепроектировать детали пресс-формы, изменив поверхности и направления разъема.

3. Тепловой расчет

Целью теплового расчета является определение тепловых нагрузок в деталях пресс-формы, так как для обеспечения свободной усадки прессуемых изделий и сокращения цикла работы пресс-формы необходимы равномерное затвердевание состава и отвод выделяющейся теплоты.

Для расчета применим математическую модель нестационарной теплопередачи по поперечным сечениям пресс-формы и свободной конвекцией по ее наружным поверхностям, которая описывается дифференциальным уравнением Фурье.

$$\rho C \frac{dT}{dt} + \nabla(K \nabla T) + q = 0,$$

где C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

T – температура, К;

K – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

q – плотность теплового потока, выделяющегося при отвердевании изделия, Вт/м².

В качестве начальных условий задается начальная температура застывания модельного или стержневого состава, а в качестве граничных условий – температура окружающей среды и коэффициент теплоотдачи.

При выявлении в результате теплового расчета критических мест, вызывающих увеличение времени застывания состава, конструктор пресс-формы должен предусмотреть в этих местах каналы охлаждения, заполненные хладагентом. Проверочный расчет, выполненный с учетом теплоты, отводимой хладагентом, должен подтвердить эффективность системы охлаждения пресс-формы.

На рис. 3 представлена схема распределения температурных полей стальной детали лопаточной пресс-формы. Анализ этих полей позволяет сделать вывод о достаточно равномерном затвердевании стержневого состава и хорошем отводе выделяющейся теплоты.

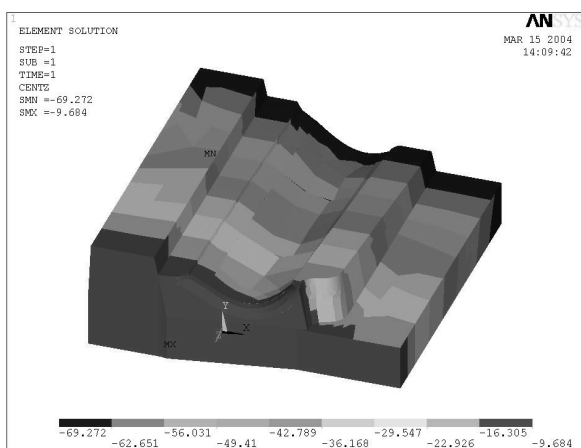


Рис. 3. Распределение температурных напряжений при тепловом расчете

Расчет подтвердил интуитивное представление о том, что позже всего затвердеет слой в районе запрессовочного канала, куда стержневой состав попадет в последнюю очередь. В это время наиболее удаленный от запрессовочного канала слой уже затвердеет. Поэтому можно констатировать, что для

съемной пресс-формы, которая разбирается вручную, принудительное охлаждение не требуется, так как время, затрачиваемое на съем и разборку пресс-формы, будет значительно больше времени впрыска состава. Если же пресс-форма стационарная (разбирается автоматически), то принятие решения о системе охлаждения будет зависеть от технических характеристик литейной машины.

В дополнение следует заметить, что если деталь пресс-формы будет не из металла, а, например, из эпоксипласта, то теплоотдача значительно замедлится и система охлаждения потребуется.

4. Расчет на прочность

Для прогнозирования надежности и долговечности работы пресс-формы необходим анализ характеристик напряженно-деформированного состояния, включающих: поле распределения напряжений в деталях пресс-формы; значения максимальных, средних и амплитудных напряжений и деформаций; коэффициенты концентрации напряжений и др.

Статистика поломок пресс-форм показывает, что разрушения носят в основном усталостный характер и начинаются в местах концентрации напряжений. Усталостная прочность в значительной степени зависит от величины и характера действующих нагрузок, формы и размеров деталей, структуры материала, конфигурации поверхностей разреза и др. Кроме того, усталостная прочность зависит от типа пресс-формы, поскольку у модельных и стержневых пресс-форм значительно отличаются свойства прессуемого состава и давление прессования.

Модельный состав на основе расплавленного воска прессуется при давлении менее 10^6 Па (10 ат). Поэтому для модельной пресс-формы достаточно выполнить только проверочный расчет на жесткость с определением максимальной стрелки прогиба.

Огнеупорный стержневой состав изготавливается

из абразивных материалов на основе мелкодисперсного электрокорунда и маршалита. Запрессовка стержневого состава в форму осуществляется при давлении $5 \dots 7 \cdot 10^7$ Па (50...70 ат) и значительных силах трения, что приводит к значительному износу стержневых пресс-форм в процессе эксплуатации. Особенно активному износу подвержены мелкие ажурные элементы формообразующих поверхностей (ребра, штырьки, канавки и т.п.), к точности изготовления которых предъявляются повышенные требования.

Поэтому детали стержневых пресс-форм необходимо проверить на: статическую прочность; жесткость с определением максимальной стрелки прогиба; циклическую выносливость и износостойкость.

После выполнения серии расчетов на прочность при различных исходных данных, отбираются варианты, обеспечивающие необходимый срок службы пресс-формы и заданную точность прессования, зависящую от стрелки прогиба.

На рис. 4 показано распределение напряжений стержневой пресс-формы при расчете на статическую прочность. Наибольшие коэффициенты концентрации напряжений, как и ожидалось, сосредоточены на кромках стержня и поверхностях разъема.

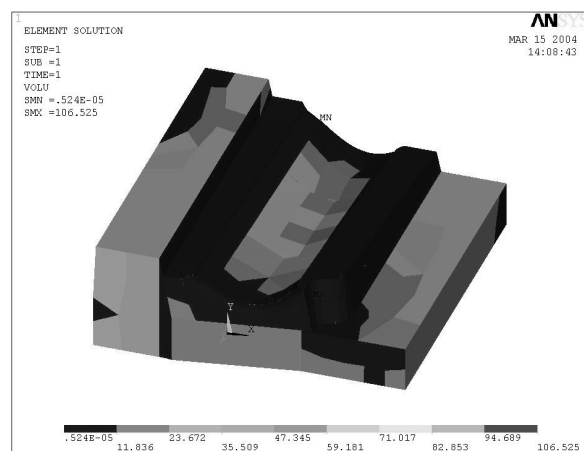


Рис. 4. Распределение напряжений при расчете на статическую прочность

Одним из эффективных способов снижения коэффициента концентрации напряжений является скругление острых кромок. Однако в пресс-формах скругление острых кромок, образованных линией разъема, приводит к искажению геометрии прессуемой детали. Поэтому, если требуется повысить ремонтпригодность и срок службы пресс-формы, то ее наиболее нагруженные элементы проектируются и изготавливаются как отдельные съемные детали.

5. Инструмент компьютерного анализа

Практическое выполнение гидродинамического, теплового и прочностного расчетов в вышеприведенной постановке невозможно без мощного компьютера и соответствующего программного обеспечения. В настоящее время существует несколько систем компьютерного моделирования процессов литья, например: LVMFlow, PROCast, MAGMA, Quick Fill, MOLDFlow, Star CD, ANSYS и др. Эти системы позволяют исследовать процесс заполнения формы, кинетику охлаждения отливки и ее кристаллизации, образование усадочных дефектов. Они обеспечивают автоматизацию рабочего места технолога-литейщика и применяются также для расчетов давления прессования, размеров литниковой системы, места подвода прессуемого состава.

Однако не все из перечисленных систем годятся для исследования процессов литья лопаток по выплавляемым моделям, так как специализируются на других видах литья. Например, система LVMFlow предназначена для моделирования литья металлических сплавов в песчано-глинистые формы; система Quick Fill для моделирования литья пластмасс под давлением.

По нашему мнению, наиболее универсальным инструментом для выполнения гидродинамических,

тепловых и прочностных расчетов лопаточных пресс-форм в настоящее время является система ANSYS. Она базируется на математическом методе конечных элементов и позволяет выполнять расчеты для сложных криволинейных поверхностей, из которых состоят лопатки авиационных двигателей.

Поля распределения напряжений, иллюстрирующие излагаемый материал (рис. 3, 4), рассчитаны в системе ANSYS.

Заключение

Разработанная методология оценки температурного и напряженно-деформированного состояния пресс-форм для литья лопаток, основанная на применении трехмерной конечно-элементной математической модели, обеспечивает переход на новый, более совершенный уровень производства формообразующей оснастки, отвечающий современным требованиям рынка.

Использование для принятия проектных решений не только геометрического, но и гидродинамического и теплового расчетов, а также расчета на прочность, позволяет повысить качество, надежность, износостойкость и долговечность конструкции пресс-формы, сократить трудоемкость ее доводки и срок ввода в эксплуатацию.

В данной статье рассмотрены в основном постановочные аспекты решения проблемы математического моделирования и анализа литейных процессов, происходящих в пресс-формах для литья лопаток авиационных двигателей. Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с разработкой методик и алгоритмов решения задач гидродинамического, теплового и прочностного расчетов, а также с проведением численных экспериментов для различных типов лопаток турбины и соплового аппарата.

Литература

1. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Мозговой В.Ф., Корневский Е.Я. Технология производства авиационных двигателей. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2000. – 930 с.
2. Литье по выплавляемым моделям. – Под ред. Н.И. Шкленника и В.А. Озерова. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 434 с.
3. Жеманюк П.Д., Малахатко А.В., Сорокин В.Ф. Стационарные пресс-формы для прессования стержней охлаждаемых лопаток авиационных двигателей // Вестник двигателестроения. – 2003. № 1. – С. 134 – 139.
4. Сорокин В.Ф. Компьютерная технология подготовки производства лопаток авиационных двигателей // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2003. – Вып. 17. – С. 57 – 63.
5. Липский Е.Р., Сорокин В.Ф. Прогрессивные способы проектирования и изготовления пресс-форм для выплавляемых моделей лопаток турбин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 14. – С. 15 – 24.
6. Сорокин В.Ф., Головатый А.Я. Проектирование и изготовление стержневых пресс-форм для охлаждаемых лопаток турбины методом аналитических эталонов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2003. – Вып. 16. – С. 50 – 58.
7. Wolfgang Maus, Hartmut Rockmann, Rudolf Seefeldt. Simulation as tool in high pressure die casting processes. MAGMA, 2002. – 23 p.

Поступила в редакцию 28.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.