

УДК 621.74.045

А.В. МАЛАХАТКО

Акционерное общество «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АДГЕЗИВ – СУБСТРАТ ПРИ ПРЕССОВАНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ

Приведено моделирование процесса формирования внутренней структуры необожжённых керамических стержней. Внутренняя структура стержня представляется как трехкомпонентная система: абсолютно твердый субстрат – адгезионный пограничный слой – жестко – пластичный наполнитель. Модель процесса задается как сжатие жестко – пластичного цилиндра малого диаметра двумя шероховатыми жесткими сферами большого диаметра, и при условии симметрии задача решается для одной плоскости. Полученные результаты позволяют представить образовавшийся пограничный слой как эллипсоид с анизотропными упруго-пластическими свойствами.

Ключевые слова: лопатка, керамические стержни, пластификатор, пограничный слой, граничные условия, анизотропный упруго - пластический эллипсоид.

Введение

Общепризнанные тенденции увеличения межремонтного ресурса, повышения требований к надежности авиационных двигателей, и рост рабочих температур в турбине привели к значительному усложнению конструкции охлаждаемых турбинных лопаток. В связи с этим возникают значительные технологические трудности в процессе производства керамических стержней, которые формируют внутренние полости лопаток при их литье методом выплавляемых моделей. Поэтому, исследование физических процессов изготовления керамических стержней с помощью компьютерного моделирования является очень актуальной задачей.

В предыдущих работах приведены прогрессивные способы проектирования литейной оснастки для лопаток авиадвигателей, которые базируются на применении метода аналитических эталонов и компьютерных инженерных расчетов [1]. Применение этого метода позволяет автоматизировать построение и расчеты сложной геометрии деталей литейных форм и технологического процесса их изготовления. Но помимо описанных методик необходимо наличие компьютерной специализированной системы, позволяющей моделировать на основе метода аналитических эталонов технологические процессы изготовления стержней.

Для получения корректных результатов необходимо представлять стержень как многокомпонентную систему и учитывать влияние физических процессов при формировании стержня на механические свойства. С учетом этих требований, в представленной работе рассмотрено моделирование

формирования пограничного слоя адгезива между двумя внедряющимися в него сферическими частицами субстрата.

1. Основная часть

Процесс формирования керамического стержня можно разбить на два этапа. Первый этап – заполнение полостей пресс-формы стержневым составом, второй – допрессовка стержневого состава и получение окончательных геометрических форм керамического стержня. При этом стержневой состав представляется в виде двухкомпонентной системы. Первый компонент - это частицы огнеупорного порошка и минерализатора, которые представляются как абсолютно твердые недеформируемые сферические частицы. Второй компонент - пластификатор, заполняющий промежутки между частицами первого компонента и обладающего в процессе заполнения пресс-формы свойствами идеально вязкой жидкости, а в процессе допрессовки – свойствами жестко пластичного тела.

Процесс формирования граничного слоя начинается в точке касания сферических частиц. Можно представить систему как жестко пластичный слой в форме цилиндра радиусом r сжимаемый шероховатыми сферами радиусом $R(\varphi)$. Принимаем, что одна сфера под воздействием осевой силы f перемещается в осевом направлении на величину u , вторая сфера остается неподвижной. Вводим цилиндрическую систему координат, ось Z которой направлена параллельно направлению силы f . Так как условия нагружения пограничного слоя в направлении оси Z идентичны, то рассмотрим плоское напряженно-

деформированное состояние образующей цилиндра пограничного слоя в плоскости RZ, пренебрегая напряжением $\sigma_{\theta\theta}$ и касательными напряжениями $\sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$. Если принять, что $\sigma_{rr} = \sigma_r; \sigma_{zz} = \sigma_z$, то уравнения равновесия принимают вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Если добавить условие пластичности:

$$\sigma_r^2 + \sigma_z^2 + 4B \cdot \sigma_{rz}^2 + 4C \cdot \sigma_r \cdot \sigma_z = 1,$$

то получаем статически определимую задачу расчета напряжений, которая позволяет решать систему уравнений для скоростей:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial r} = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2 \cdot \sigma_{rz}}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Принимая, что $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{\theta r} = \varepsilon_{\theta z} = 0$, $u_{zz} = v$, $u_{rr} = \omega$, выводим уравнения деформаций:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial \omega}{\partial r}; \varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z}; \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right).$$

Основные соотношения между компонентами напряжения и компонентами деформации имеют вид:

$$\varepsilon_r(z) = \frac{3}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} \cdot \sigma_r(z); \varepsilon_{rz} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} \cdot \sigma_{rz}.$$

Исходя из условия симметрии, сформулируем граничные условия для одной четвертой части образующей пограничного слоя. Так как частицы огнупорного порошка обладают значительной шероховатостью, то на контактной поверхности за счет прилипания образуется жесткий участок, перемещающийся с той же скоростью. Тогда на контуре сферы:

$$\sigma_z = -f; \sigma_{zr} = 0; v = -v_0 \cdot \cos \varphi,$$

а вдоль оси R компоненты $\sigma_z = \sigma_{zr} = 0; v = 0$, так что $\sigma_r = -k, V = \omega, \varphi = \pi/2$.

В рассматриваемой нами задаче требуется предварительное решение уравнений для скоростей и уже последующее решение уравнений для координат.

Исходя из условия, что участок пограничного слоя бесконечно мал по отношению к сфере субстрата ($r/R \rightarrow 0$), то уравнения полей напряжений принимают следующий вид [2]:

$$\sigma_r = p - \mu k \frac{r}{h} + 2k \sqrt{1 - \mu^2 \cdot z^2 / h^2},$$

$$\sigma_z = p - \mu k \frac{r}{h}, \sigma_{rz} = \mu k \frac{z}{h}.$$

Этому полю напряжений соответствует следующее поле скоростей:

$$v = v_0 + \omega_0 \frac{r}{h} - \frac{2}{\mu} v_0 \sqrt{1 - \mu^2 \frac{z^2}{h^2}}, \omega = -\omega_0 \frac{z}{h}.$$

Уравнения линий скольжения имеют следующий вид:

$$\mu \frac{r}{h} + \sqrt{1 - \mu^2 \frac{z^2}{h^2}} \pm \arcsin(\mu \frac{z}{h}) = \text{const}$$

и представляют собой дуги циклоид, изображенные на рис. 1.

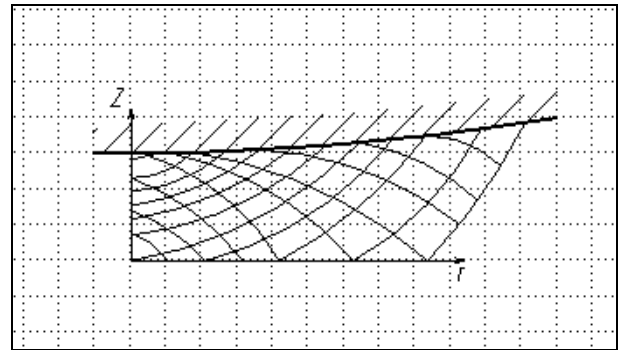


Рис. 1. Линии скольжения в основном элементе пограничного слоя

Начальные координаты частицы пограничного слоя при толщине равной h_0 обозначим r_0 и z_0 , а координаты той же частицы при толщине h – r и z . Обозначим компоненты скорости v и ω как отношение к величине h , используя h как шкалу времени, начальную величину h_0 принимаем равной 1:

$$v = -\frac{\partial r}{\partial h}, \omega = -\frac{\partial z}{\partial h}, u_0 = 1.$$

Уравнения движения частиц принимает вид:

$$\frac{\partial r}{\partial h} + \frac{r}{h} = \frac{2}{\mu} \sqrt{1 - \mu^2 \frac{z^2}{h^2}} - u_0(h), \frac{\partial z}{\partial h} = \frac{z}{h}.$$

Второе уравнение может быть проинтегрировано с учетом начального условия $z=z_0$ при $h=h_0$:

$$\frac{z}{h} = \frac{z_0}{h_0} = \eta.$$

Таким образом, прямые параллельные оси r не меняют своего положения, а их относительное расположение сохраняется.

Первое уравнение после введения соотношения $\zeta = x(h,1) - x(h,\zeta)$ и соответствующего выбора функции $u_0(h)$ принимает вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial h} + \frac{\zeta}{h} = 2\sqrt{1 - \eta^2}.$$

Уравнение может быть проинтегрировано с учетом предыдущего соотношения и при $h=h_0$:

$$h\zeta - h_0\zeta_0(\eta) = -2\sqrt{1 - \eta^2}$$

Для вертикальной прямой при $r = r_0$ и $h = h_0$ $\zeta_0(\eta) = 0$, так что:

$$h\zeta = (h_0^2 - h^2)\sqrt{1 - \eta^2}$$

или

$$\frac{h^2\zeta^2}{(h_0^2 - h^2)^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1.$$

Таким образом, отрезок прямой параллельный оси z преобразуется в дугу эллипса с полуосями $(h_0^2 - h^2)/h$ и h .

Заключение

Исходя из вычисленного характера движения частиц вдоль осей r и z , можно утверждать об образовании в пограничном слое полимерных цепочек в форме эллипсов и вытеснении аморфных органи-

ческих компонентов, что позволяет применить гипотезу об анизотропном пограничном слое [3]. Т.е. пограничный слой может быть представлен в форме эллипсоида с анизотропными упруго - пластическими свойствами.

Литература

1. Липский, Е.Р. Прогрессивные способы проектирования и изготовления пресс-форм для выплавляемых моделей лопаток турбин [Текст] / Е.Р. Липский, В.Ф. Сорокин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2002. – Вып.14. – С. 15 – 24.
2. Соколовский, В.В. Теория пластичности [Текст] / В.В. Соколовский. – М.: Наука, 1975. – 608 с.
3. Фрейдлин, А.С. Свойства и расчет адгезионных соединений [Текст] / А.С. Фрейдлин, Р.А. Турусов. – М.: Химия, 1990. – 256 с.

Поступила в редакцию 25.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой А.Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ГРАНИЧНОГО ШАРУ АДГЕЗИВ – СУБСТРАТ ПРИ ПРЕСУВАННІ КЕРАМІЧНИХ СТРИЖНІВ

А.В. Малахатко

Наведено моделювання процесу утворення внутрішньої структури невипалених керамічних стрижнів. Внутрішня структура стрижня уявляється як трикомпонентна система: абсолютно твердий субстрат – адгезійний граничний шар – жорстко-пластичний наповнювач. Модель процесу утворення граничного шару задається як стиснення жорстко-пластичного циліндру малого діаметра двома твердими шорсткими сферами великого діаметра, і беручи умову симетрії задача вирішується для однієї площини. Отримані результати дозволяють уявити утворений граничний шар як еліпсоїд з анізотропними пружньо-пластичними якостями.

Ключові слова: лопатка, керамічні стрижні, пластифікатор, граничний шар, граничні умови, анізотропний пружньо-пластичний еліпсоїд.

SIMULATION TO CREATE INTERFACE ADHESIVE-SUBSTRATE PROCESS AT CERAMIC CORES PRESSING

A. V. Malahatko

There is submitted simulation to create of unannealed ceramic cores internal structure. Core internal structure is represented as three-component system which includes perfectly fast substrate, adhesion interface and stiff-plastic filler. Simulation to create interface is presented as pressing rigid-plastic little cylinder by two rigid rough big spheres, and to use symmetry condition the problem are solved for plane. Interface is represented as elastic-plastic ellipsoid as a result of finding data.

Key words: blade, ceramic cores, plasticizer, interface, boundary conditions, anisotropic elastic-plastic ellipsoid.

Малахатко Андрей Васильевич – начальник бюро управления главного технолога Акционерного общества «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: ugt@motorsich.com.