

4. Левия А.В., Боришанский К.Н., Консон Е.Д. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин. - Л.: Машиностроение, 1981. - 710 с.

УДК 621.762.4

Г.В.Лазуткин, К.И.Суханов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

Материал МР обладает пористой металлической структурой, образованной путем прессования взаимно перекрещивающихся спиралей. Поэтому процесс прессования во многом определяет физико-механические характеристики изделий из материала МР.

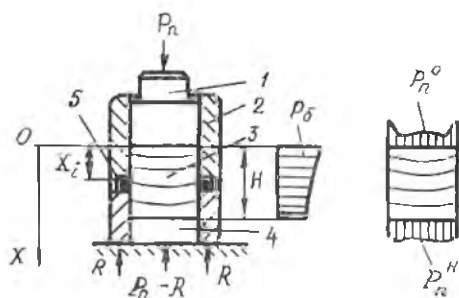
Несмотря на некоторые структурные отличия материала МР от волоконных и порошковых материалов, их объединяют общие признаки - пористость и наличие упругофрикционных связей между структурными элементами (волокнами, гранулами, витками спиралей). Следовательно, при изучении особенностей процесса прессования изделий из МР можно воспользоваться результатами существующей теории прессования пористых тел.

Рассмотрим основные силовые факторы /1/, сопутствующие процессу одностороннего прессования изделий втулочного типа из упругодемпфирующего пористого материала МР (рис. 1). Усилие прессования P_n складывается из усилия, необходимого для уплотнения материала МР, и внешнего сопротивления R^* проволоочных спиралей при взаимодействии со стенками пресс-формы. Указанное сопротивление возникает из-за бокового давления P_b , связанного с давлением прессования P_n (см. рис. 1) линейной зависимостью, коэффициент пропорциональности которой получил название коэффициента бокового давления /1/:

$$K_b = \frac{P_b}{P_n} = \frac{\mu}{1-\mu}, \quad (1)$$

где μ - коэффициент Пуассона материала МР.

Следует полагать, что, как и в системах конструкционного демпфирования, силы сопротивления, возникающие между спиралами и стенками пресс-формы, носят упругофрикционный характер. Снижая осе-



Р и с. 1. Схема одностороннего прессования материала МР: 1 - подвижный пуансон; 2 - гильза; 3 - образец из МР; 4 - вкладыш; 5 - тензометрическое кольцо

вое усилие P_n , они уменьшают и боковое давление по высоте прессовки, что создает неравномерность структуры материала МР в готовом изделии. На рис. 1 показано сечение спрессованной втулки, состоящей в начале прессования из пяти одинаковых частей. Как видно из рис. 1, в конце прессования слои имеют разную форму, причем каждый верхний слой плотнее нижнего. Плотность углов самого верхнего слоя может быть в несколько раз выше, чем самого нижнего. Количественные данные по неравномерности плотности МР приведены в работе /2/. Неравномерность структуры материала МР вызывает большие остаточные напряжения в витках спиралей, приводящие к искажению плоскости торцов готовых втулок (2...3% от диаметра). Вместе с тем материал МР обнаруживает релаксационные свойства: при извлечении образца из пресс-формы его высота увеличивается в течение суток на 2...3%, при скачкообразном нагружении в пределах упругих возможностей изделия происходит релаксация напряжений в нем и т.п.

Очевидно, полное и достоверное описание указанных явлений тесно связано с изучением коэффициента бокового давления и сил сопротивления спиралей при их взаимодействии со стенками пресс-формы. Определение указанных величин осуществлялось на установке, позволяющей одновременно измерять усилие прессования P_n подвижного пуансона 1, реакцию R гильзы 2 и боковое давление в i -м сечении (см. рис. 1). Для этого тензометрическое кольцо 5 устанавливалось с небольшим зазором (0,05 мм) в кольцевой проточке составной

гильзы пресс-формы. Варьирование i -й координаты, относительно которой измерялось боковое давление, обеспечивалось вкладышем 4. Реакция гильзы R , вероятно, прямо связана с результирующей сил сопротивления спиралей R^* по всей высоте образца H . На базе данных, полученных в работах /1, 3/, можно предположить, что R^* по i -й координате изменяется практически линейно:

$$R_i^* = R \frac{x_i}{H}$$

С помощью данной зависимости легко вычислить давление прессования в i -м сечении и найти i -й коэффициент бокового давления

$$K_{\delta i} = \frac{P_{\delta i} D_n}{4(P_n - R \frac{x_i}{H} h)} \quad (2)$$

где $P_{\delta i}$ - боковая нагрузка в i -м сечении;

$D_n = 30$ мм - внутренний диаметр гильзы пресс-формы;

$h = 6$ мм - высота тензометрического кольца.

Правомерность этого выражения может быть доказана косвенно на основе изучения влияния высоты заготовок изделий H_3 на R .

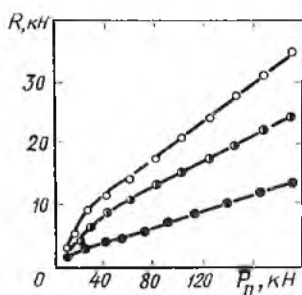
Данные по исследованию реакции R гильзы пресс-формы для различных высот H_3 приведены на рис. 2. Как видно из графиков, внешнее сопротивление спиралей с увеличением усилия прессования P_n непрерывно возрастает. С увеличением высоты заготовки H_3 сила R возрастает пропорционально площади боковой поверхности, что подтверждает выдвинутую ранее гипотезу (2). Установлено, что для аналитического описания полученных зависимостей можно воспользоваться известным выражением для внешнего трения при прессовании порошковых тел /3/

$$R = P_n (1 - e^{-\varphi \frac{H}{D_n}}) \quad (3)$$

где φ - коэффициент, зависящий от параметров материала МР и коэффициента трения спиралей о гильзу пресс-формы. Погрешность описания зависимостей R с помощью этой формулы составляет $\pm 10\%$.

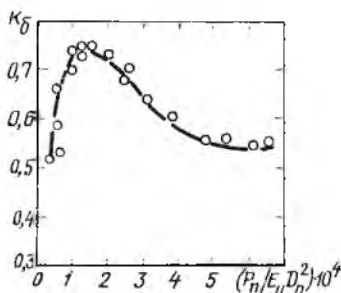
Результаты обработки экспериментальных данных по коэффициенту бокового давления K_{δ} у торцев подвижного пуансона и вкладыша, а также в разных сечениях представлены на рис. 3. Как видно из графика, K_{δ} не зависит от номера сечения. Воспользовавшись найден-

ными значениями K_{δ} , можно с помощью формулы (I) вычислить коэффициент Пуассона материала МР в пресс-форме ($\mu \in [0,29; 0,43]$).



Р и с. 2. Зависимость результирующей сил сопротивления спиралей от нагрузки прессования

($\rho_3 = 6,25 \cdot 10^{-2}$; $\bar{d} = 5 \cdot 10^{-3}$; $\bar{d} = 6 \cdot 10^{-2}$; $\varepsilon_{\mu} = 5,25 \cdot 10^{-3}$): $\circ - \Phi = 6$; $\bullet - \Phi = 4$; $\bullet - \Phi = 2$



Р и с. 3. Зависимость коэффициента бокового давления втулки из материала МР от давления прессования: $\rho_3 = 6,25 \cdot 10^{-2}$; $\Phi = 4$; $\bar{d} = 5 \cdot 10^{-3}$; $\bar{d} = 5 \cdot 10^{-2}$; $\varepsilon_{\mu} = 5,25 \cdot 10^{-3}$

Одним из центральных вопросов прессования изделий из МР является определение функциональной связи средней по объему плотности материала с давлением прессования. Наиболее общее уравнение прессования пористых тел было предложено в работе [1]:

$$P_n = A \bar{\rho}_K^m, \quad (4)$$

где A - константа, определяющая критическое давление;

$\bar{\rho}_K = \rho_K / \rho_{\mu}$ - относительная плотность МР (ρ_K - плотность пористого материала, ρ_{μ} - плотность металла);

m - показатель, характеризующий интенсивность процесса прессования.

Известно также, что процесс прессования пористых тел имеет три характерных этапа, связанных с контактными напряжениями и геометрической интерпретацией заполнения пустот. Указанные обстоятельства послужили справными точками для экспериментального определения уравнения прессования изделий из материала МР втулочного типа.

Исходя из проведенного анализа силовых факторов и результатов работ [4, 5], уравнение прессования материала МР можно записать в виде

$$P_n = \varphi(\rho_K, \rho_3, \rho_u, H_3, D_n, d, \bar{\sigma}, \sigma_m, E_u), \quad (5)$$

где ρ_K, ρ_3, ρ_u — соответственно плотности материала МР, заготовки, металла;

H_3, D_n — высота и диаметр заготовки;

$d, \bar{\sigma}$ — диаметры спирали и проволоки;

σ_m, E_u — предел текучести и модуль упругости проволоки.

В это уравнение не включены коэффициент трения, высота микронеровностей рабочей поверхности гильзы пресс-формы, так как их значения в процессе эксперимента не изменялись. Уравнение (5) можно преобразовать к безразмерному виду

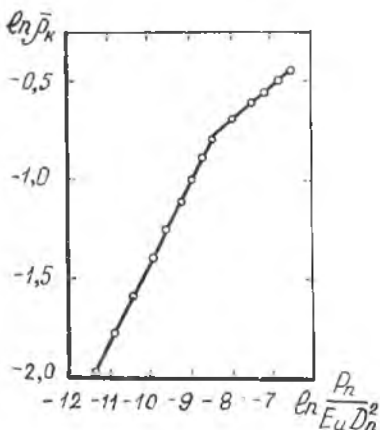
$$\bar{P}_n = \varphi(\bar{\rho}_K, \bar{\rho}_3, \Phi, \bar{d}, \bar{\sigma}, \varepsilon_u),$$

где $\bar{P}_n = \frac{P_n}{E_u D_n^2}$ — определяемый критерий;

$$\bar{\rho}_3 = \rho_3 / \rho_u; \quad \Phi = \frac{H_3}{D_n}, \quad \bar{d} = \frac{d}{D_n}, \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{D_n}, \quad \varepsilon_u = \frac{\sigma_m}{E_u} -$$

— определяющие критерии.

На рис. 4 в логарифмических координатах представлена зависимость безразмерного давления прессования от средней плотности МР в упругодемпфирующем элементе (УДЭ). Эта зависимость имеет два явно выраженных прямолинейных участка (два этапа). Причем для практически важных параметров материала МР ($\bar{\rho}_3 \in [0,04; 0,1]$, $\Phi \in [3; 6]$, $\bar{\sigma} \in [0,003; 0,01]$, $d/D_n \in [0,03; 0,1]$, $\varepsilon_u \in [4 \cdot 10^{-2}; 1 \cdot 10^{-2}]$) указанные участки с прочностью до 25% по нагрузке могут быть представлены в виде



Р и с. 4. Процесс прессования втулок из материала МР

$$\bar{P}_n = \left(\frac{\sigma_m}{E_u} \right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_u} \right)^{0,22} \begin{cases} 0,8 \bar{\rho}_k^{2,68} & \forall \bar{\rho}_k \in [0,15; 0,35] \\ 2,1 \bar{\rho}_k^{3,59} & \forall \bar{\rho}_k \in [0,35; 0,60]. \end{cases} \quad (6)$$

Для удобства расчетов по формуле (6) приведем значения параметра E_u для марок проволок, наиболее часто применяемых при изготовлении изделий из материала МР:

Марка проволоки	Диаметр проволоки σ , мм	$E_u \cdot 10^3$	Модуль упругости E_u , ГПа
ЭИ-708А-ВИ	0,09	6,70	180
ЭИ-708А-ВИ	0,15	5,25	180
ЭИ-708А-ВИ	0,20	5,10	180
12Х18Н10Т	0,30	6,90	150
12Х18Н10Т	0,20	6,10	170
ЭП-322	0,15	6,40	190

Отметим, что в процессе исследования прессования изделий из МР третий этап, характерный для прессования порошковых тел, не был обнаружен, вероятно, по причине недостаточно большого изменения $\bar{\rho}_k$.

Проведенные исследования особенностей процесса прессования изделий из МР имеют важное значение для создания более достоверных методов расчета механических характеристик изделий из МР. Вместе с тем эти исследования могут оказаться полезными при создании противоударных устройств разрушающегося типа. Эффективность таких устройств оценивается их способностью поглощать мощные ударные нагрузки за счет подпрессовки УДЭ, близкой к условиям прессования образца в пресс-форме.

Для оценки энергопоглощающей способности УДЭ при его прессовании или допрессовки введем следующие критерии:

отношение фактически поглощенной энергии W к максимально возможной при заданном усилии прессования P_n

$$\psi = \frac{W}{P_n x_0},$$

где x_0 - деформация образца при прессовании усилием P_n ; энергия, поглощенная единицей объема УДЭ

$$\bar{W}_0 = \frac{4W}{\pi D_n^2 H_c}$$

или единицей его массы

$$\bar{W}_m = \frac{4W}{\rho_c \pi D_n^2 H_c},$$

где H_c - высота УДЭ до прессования;

ρ_c - плотность МР до прессования.

В процессе проведения исследования образцы УДЭ с варьируемыми значениями ρ_c (минимально возможное значение $\rho_c = \rho_3$) подвергались допрессовке до фиксированного уровня переменной ρ_k . При этом в координатах "нагрузка P - перемещение X " строили график процесса прессования, обработкой которого находили соответствующие критерии ψ , \bar{W}_0 , \bar{W}_m . На рис. 5 в качестве примера представлены зависимости \bar{W}_0 от начальной плотности ρ_c для различных конечных плотностей ρ_k . На каждом уровне переменной ρ_k зависимость $\bar{W}_0(\rho_c)$ имеет явно выраженный максимум, соответствующий значению ρ_c^* . Причем для максимальных значений \bar{W}_0^* (см. рис. 5, пунктирная линия) можно записать выражение для степени допрессовки УДЭ

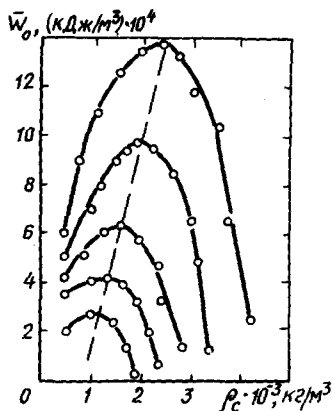
$$\frac{\rho_k}{\rho_c} = 2,2.$$

Следовательно, при степени допрессовки УДЭ, равной 2,2, обеспечивается максимально возможное поглощение энергии единицей объема материала МР.

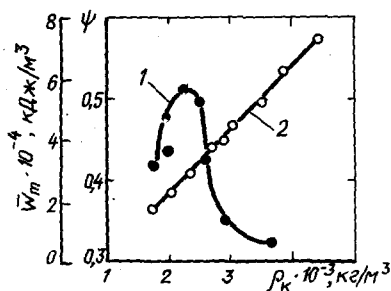
На рис. 6 приведена зависимость критерия ψ (кривая I) от параметра ρ_k , соответствующая оптимальным значениям ρ_c^* . Наибольшая степень совершенства УДЭ с точки зрения энергопоглощающей способности ($\psi \approx 0,5$) достигается при $\rho_k = 2,3 \text{ г/см}^3$. На том же рисунке приведена зависимость критерия \bar{W}_m от ρ_k , найденная, как и выше, для оптимальных ρ_c^* .

Выводы. При прессовании материала МР в диапазоне относительных плотностей от 0,1 до 0,7 можно выделить два характерных этапа, причем уравнение прессования, связывающее давление прессования с плотностью материала МР, описывается кусочно-степенными функциями.

Распределение плотности материала МР весьма неравномерно как по радиусу, так и по высоте образца.



Р и с. 5. Зависимость критерия W_0 от плотности УДЭ в исходном состоянии



Р и с. 6. Зависимость критериев $\psi-1$ и W_m-2 от плотности УДЭ при допрессовке

Коэффициенты бокового давления K_D и Пуассона μ при прессовании МР зависят от его плотности и изменяются от 0,40 до 0,75 для K_D и от 0,29 до 0,43 для μ соответственно.

При степени допрессовки УДЭ, равной 2,2, обеспечивается максимальное поглощение энергии единицей объема МР.

Результаты исследования особенностей прессования изделий из МР хорошо согласуются с имеющимися данными по прессованию пористых тел из порошков и волокон.

Библиографический список

1. Б а л ь ш и н М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. - М.: Металлургия, 1972. - 336 с.
2. П и ч у г и н Д.Ф., Ш а й м о р д а н о в Л.Г. Влияние формы и объема изделия из МР на его упругодемпфирующие характеристики //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб.науч.тр. - Куйбышев: КуАИ, 1977. - Вып. 4. - С. 20-24.
3. Ж д а н о в и ч Г.М. Теория прессования металлических порошков. - М.: Металлургия, 1969. - 262 с.

4. Л а з у т к и н Г.В., Т р у б и н В.Н. Экспериментальные статические и динамические характеристики амортизаторов типа ДК //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб.науч.тр. - Куйбышев: КуАИ, 1976. - Вып. 3. - С. 32-37.

5. Т р о й н и к о в А.А., Т р у б и н В.Н., Л а з у т к и н Г.В. К вопросу об упругодемпфирующих свойствах материала МР//Там же, 1975. - Вып. 2. - С. 60-65.

УДК 539:374:534.24

Г.В.М е л ь н и к о в а

ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК С ДЕМПФЕРОМ СУХОГО ТРЕНИЯ

Для исследования нестационарных динамических процессов, возникающих при изгибных колебаниях лопаток турбомашин, может быть успешно применен метод прямого математического моделирования на ЭВМ процесса распространения механических возмущений /1-3/.

Применение указанного метода к изгибным колебаниям осложняется наличием двух типов волн (от продольного растяжения-сжатия и сдвига), распространяющихся с различными скоростями.

В настоящей работе в соответствии с основными принципами метода прямого математического моделирования выбрана модель структурного элемента изгиба. Эта модель на каждом временном интервале точно удовлетворяет законам сохранения импульса, момента импульса и механической энергии, что обеспечивает хорошую устойчивость вычислительного процесса при большом числе временных этапов.

С использованием указанной модели структурного элемента изгиба проведено исследование нелинейных нестационарных вынужденных колебаний лопаток турбин, имеющих демпфирующие элементы сухого трения под нижней полкой лопатки. Численный анализ проводился как при постоянной, так и при меняющейся частоте возбуждения.

1. Основные уравнения

Приведем основные уравнения для плоского изгиба лопатки турбины, рассматриваемой как балка постоянного сечения.