

ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИЗОСТАТИЧЕСКОЙ ПРОПИТКИ ИХ ВЯЗКИМИ СРЕДАМИ

На основе математической модели фильтрации вязкоупругих сред в пористых телах под высоким давлением с нагревом и ньютоновского метода определения касательных напряжений рассмотрен способ определения касательных напряжений, возникающих на поверхности пор тела при движении по ним вязкоупругой среды под высоким давлением с нагревом, на различной глубине, при различных условиях нагружения. Для определения величин касательных напряжений предложено использование нелинейного закона Дарси. Рассмотрена задача о влиянии структурной неоднородности пористых тел на величину касательных напряжений, создаваемых течением вязкоупругой среды в порах, и описан механизм разрушения пористых тел в процессе их пропитки под высоким давлением с нагревом.

Ключевые слова: пропитка, керамика, математическая модель, вязкая среда, изостат, разрушение.

Введение

В настоящее время с развитием и появлением новой техники и технологий в различных областях промышленности (авиация, машиностроение, атомная энергетика) возрастают потребности в новых видах материалов со специальными свойствами [1]. В основном это композиционные материалы (компози́ты).

В ряде технологий для придания изделиям (заготовкам) особых свойств пористую основу пропитывают полностью (по всей глубине) либо частично (на определенную глубину), при этом если пропитывающая среда (инфильтрат) незначительной вязкости ($\mu < 1$ Па·с), то, как правило, необходимое давление пропитки находится в пределах ~ 10 МПа. Если же возникает необходимость в пропитке пористого тела вязкоупругой ($\mu > 10$ Па·с) средой (этиленоксиды, полиформальдегиды, полипропилен, полиамиды, полиуретаны, различные смолы т.д.), то необходимое технологическое давление может выражаться в сотнях МПа. Особенно если учесть, что размер пор пропитываемых тел может колебаться от десятых долей миллиметра до десятых долей микрометра [2].

Анализ достижений

Как правило, пропитка пористых тел вязкоупругими средами под давлением осуществляется в изостатах (давление среды – до 1000 МПа). При такой пропитке необходимо учитывать тот фактор, что все текущие среды под давлением изменяют свои физические характеристики: вязкость, плотность, объемный модуль упругости. Поэтому при анализе процес-

сов пропитки под высоким давлением необходимо заранее знать и учитывать изменения физических свойств используемых инфильтратов от давления и температуры, а также физику процессов течения этих инфильтратов по микроканалам пористых тел. Такие данные необходимы для правильной оценки величин давления пропитывающей среды (чтобы не разрушить основу пористой матрицы и полностью, по всей глубине провести пропитку), для определения скоростей протекания вязких сред по каналам пор, какие напряжения сдвига при этом возникают (особенно это важно при пропитке коллоидными суспензиями и растворами полимеров со значительными молекулярными массами) и как будет изменяться давление среды по глубине пористого тела, а также оптимальное время процессов полного заполнения пор.

Задачи по определению касательных напряжений при движении вязких сред под давлением решены только для случаев поверхностного течения. Для течения вязкоупругих сред в пористых телах под высоким давлением задача по определению касательных напряжений (напряжений сдвига) на настоящее время не решена.

Постановка задачи

В рассматриваемой работе на основе уравнения пропитки пористых тел вязкими, сжимаемыми средами под высоким давлением с учетом температуры, предлагается метод определения касательных напряжений как в самих средах, так и на поверхности пор тела при их течении в теле на различной глубине с учетом различных краевых условий. Достоверность результатов любых решений можно проверить экспе-

риментально – по глубине зоны разрушения при быстром ($\sim 0,1$ с) сбросе давления в процессах изостатики [3].

Поэтому в данной работе по пропитке пористых тел вязкими сжимаемыми средами под высоким давлением с нагревом ставились и решались 2 основные задачи:

1. Определение степени применимости различных моделей вязкоупругих сред в задачах пропитки пористых тел под высоким давлением.

2. Определение касательных напряжений на поверхности пор при течении по ним вязкоупругих сред и установление взаимосвязи с прочностью этих пористых оснований.

При рассмотрении различных моделей вязких, сжимаемых сред, можно утверждать, что в процессе пропитки ими пористых тел под высоким давлением с нагревом все они (среды) ведут себя одинаково.

Пропитка пористых тел бингамовскими средами: вязкими пластиками, псевдопластиками и дилатантными жидкостями – осуществляется по тем же законам, что и пропитка вязкими средами, как указывалось выше. Если при течении бингамовских сред в зависимости от скорости и продолжительности сдвига изменяется вязкость, то в рассматриваемой модели пропитки под высоким давлением с нагревом (1) все эти факторы учтены. Обобщенно говоря, «вязкоупругие» среды под высоким давлением можно считать вязкоупругопластичными в зависимости от величины давления в изостате и стадии технологического процесса (при подъеме давления, выдержке под давлением или при сбросе давления).

Под высоким давлением все среды сжимаемы. Любое изменение (уменьшение) объема среды от давления ведет к изменению внутренней ее энергии [4], что сказывается на физических характеристиках: жидкие среды могут увеличивать вязкость на $3 \div 4$ и более порядка, и их уже проблематично называть «жидкими». Поэтому говорить об использовании в расчетах пропитки пористых тел вязкоупругими средами при высоких давлениях различных моделей (Фойгта, Максвелла, Сен-Венана, Кельвина-Фойгта и т.д.) нет смысла.

Способы решения поставленной задачи

Для анализа течения сжимаемых вязкоупругих сред в пористых телах при высоких давлениях с нагревом, используем уравнение пропитки (фильтрации), в котором учтены классические зависимости изменения: вязкости, сжимаемости (обратная величина объемного модуля упругости $\chi = 1/E$), плотности, используемых сред от величины давления и температуры (1) [5, 6]. В процессе пропитки распределение давления вязкоупругой среды по глубине пропитываемого пористого тела определяется из решений уравнения (1), в соответствии с заданными начальными (НУ) и граничными (ГУ) условиями:

$$\left\{ \frac{\frac{a}{b+P}}{1-a \cdot \ln \frac{b+P}{b}} \cdot \left(1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right) \right\} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b}}{e^{CP-\gamma T}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (1)$$

В уравнениях 2, 3 и 4 показано, в какой математической форме учтены законы изменения вязкости, плотности и сжимаемости жидкостей от величины давления (P) и температуры:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{CP-\gamma T}; \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right); \quad (3)$$

$$\chi = \frac{\frac{a}{b+P}}{1-a \cdot \ln \frac{b+P}{b}} \quad (4)$$

где x, t – координаты длины (мм) и времени (с);

μ – динамическая вязкость (Па·с);

γ – температурный коэффициент вязкости (T^{-1});

T – температура процесса пропитки ($^{\circ}C$);

ρ – плотность ($г/см^3$);

k – коэффициент проницаемости ($м^2$);

χ – сжимаемость ($МПа^{-1}$);

a, b – коэффициенты сжимаемости среды Тэйта;

C – пьезокоэффициент вязкости ($МПа^{-1}$);

μ_0 и ρ_0 – вязкость и плотность при обычных условиях ($T = 20^{\circ}C$).

Пористые образцы, используемые для исследования течения различных вязкоупругих сред под давлением, представляли собой в сечении прямоугольник длиной $L = 150$ мм со свободными торцами и экранированной металлом боковой поверхностью. Вследствие этого вязкоупругая среда могла проникать в тело только со стороны открытых торцов. Основной параметр – давление (P) изменяется и определяется только по координате (x), поэтому поставленная задача и носит одномерный характер.

Граничные условия для данного случая примут вид:

$$P(0, t) = v_{yг} \cdot t + 0,1;$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{L}{2}, t \right) = 0.$$

Первое условие отражает закон изменения давления на границе входа среды в тело. Это изменение

носит линейный характер и определяется произведением скорости увеличения давления (v_{yg}) (МПа/с) на время t (с). Второе условие определяется симметрией, т.е. в среднем сечении образца поток отсутствует.

Начальное условие задается исходя из того, что в начальный момент времени давление среды равно атмосферному (0,1 МПа):

$$P(x,0) = 0,1.$$

Математическая модель фильтрации различных сжимаемых сред в пористые тела (1) представляет собой нелинейное параболическое дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка и точного аналитического решения не имеет. Решение задачи осуществлялось с использованием конечно-разностной аппроксимации по неявной схеме, не требующей проверки на устойчивость [7, 8].

Согласно Ньютону, касательные напряжения при ламинарном течении жидких сред определяются [9]:

$$\tau = \mu \cdot \gamma^*, \quad (5)$$

где τ – касательные напряжения (МПа);

γ^* – скорость деформации сдвига (1/с).

Если учесть, что $\gamma^* = \frac{\partial v_x}{\partial y}$, то касательные напряжения запишутся в виде:

$$\tau = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad \text{или} \quad \tau = \mu \frac{\partial v_x}{\partial r}, \quad (6)$$

где v_x – линейная скорость течения вязкой среды в порах тела;

r – текущий радиус поры.

При определении касательных напряжений в моменты нахождения вязкоупругой среды в пористом теле под высоким давлением с нагревом (при подъеме, сбросе или выдержке) в уравнении (5) уже необходимо будет учитывать изменение вязкости как от величины давления, так и температуры (2). Тогда уравнение (5) примет вид:

$$\tau = \mu^* \frac{\partial v_x}{\partial r}, \quad (7)$$

где μ^* должно определяться согласно (2). В работе [10] при исследовании течений вязких, сжимаемых сред в пористых телах под высоким давлением было выявлено, что у сред с начальной вязкостью $\mu_0 \geq 0,5$ Па·с при давлениях $P \geq 10$ МПа течение в порах тела будет носить ламинарный характер. В дальнейшем рассматриваться будет среда с начальной вязкостью $\mu_0 \sim 100$ Па·с, т.е., течение в порах тела однозначно ламинарное.

Для задач пропитки, когда вязкоупругая среда на границе с пористым телом находится под всесторонним давлением сжатия, определение ее скорости про-

питки по каналам пористого тела, а также напряжений сдвига не представляется возможным. Все эти данные можно получить только в результате решения уравнения (1).

Скорость течения жидкости в пористом теле определяется исходя из закона Дарси [11]:

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L}, \quad (8)$$

где $\Delta P/\Delta L$ – изменение давления жидкости в пористом теле на единицу длины (МПа/мм).

В данном случае k – величина постоянная, является геометрической характеристикой пористого тела, и при его пропитке различными по физическим свойствам жидкостями считается неизменной, величины значений (P и $\Delta P/\Delta L$) на любой глубине пористого тела определяются из решения уравнения (4), в соответствии с заданными граничными и начальными условиями (рис. 1, 2), вязкость $\mu = f(P, T)$ – зависит от величины давления и температуры и определяется по зависимости (5). Тогда закон Дарси становится нелинейным, и будет выглядеть:

$$v = -\frac{k}{\mu^*} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L}. \quad (9)$$

Рассматривая равновесие сил, действующих на цилиндрический элемент среды в поре тела на любой его глубине, в первом приближении получим:

$$\pi \cdot r^2 \Delta P = 2\pi \cdot r \cdot \Delta L \cdot \tau, \quad (10)$$

где r – радиус цилиндрического элемента (поры) (мм);

ΔP – изменение давления в цилиндрическом элементе среды на длине ΔL (МПа/мм).

Тогда величина касательных напряжений на стенках поры будет определяться:

$$\tau = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L}. \quad (11)$$

Анализируя физические величины, входящие в выражение 11 (r – величина постоянная, характеризующая структуру пористого тела, $\Delta P/\Delta L$ – определяется из решения (1)), можно отметить: независимо от физических характеристик среды, пропитываемой пористое тело, величина касательных напряжений на стенках пор будет зависеть от двух характеристик: величины ($\Delta P/\Delta L$) и габаритов пор (r).

Методику определения напряжений сдвига среды в различные моменты времени технологического процесса (при подъеме давления, выдержке и сбросе) и выявления наиболее значимых из них рассмотрим на примере пропитки пористого тела одной из разновидностей битумных смол с учетом нагрева.

Пористое тело: керамика, применяемая на заводах МАП для изготовления сложных пустотелых от-

ливков по выплавляемым моделям (основа SiO_2 – кварц искусственный) с коэффициентом проницаемости $k = 1,42 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ и средним размером пор $D_{cp} \sim 0,01 \text{ мм}$. Основа инертна – в процессе пропитки химически не взаимодействует с пропитывающей средой, максимальный размер частиц, формирующих керамику – 160 мкм, минимальный – 14 мкм. Выгорающие пластичные добавки – 16 % от общей прессовочной массы. Общая пористость партии исследуемой керамики составляла 42 %, открытая пористость – 22 % (данные ЗМКБ «Ивченко-Прогресс»), где $\sigma_p = 4,9 \text{ МПа}$ – предел прочности пористой керамики на растяжение;

$\sigma_{сж} = 13,6 \text{ МПа}$ – предел прочности пористой керамики на сжатие;

$E_M = 2,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости монолитной керамики на основе SiO_2 ;

$E_{II} = E_M (1 - 1,9\Pi - 0,9\Pi^2) = 0,095 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости пористой керамики;

$\nu = 0,2$ – коэффициент Пуассона.

Особой потребности в исследовании пористых оснований с размером пор $\sim 1 \text{ мм}$ нет по причине простоты их пропитки.

Вязкая среда: одна из разновидностей электроизоляционных битумных смол – вязкость $\mu_0 = 120 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициенты сжимаемости (Тэйта) $a = 0,154$ и $b = 629 \text{ МПа}$; пьезокоэффициент вязкости $C = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$, показывающий изменение

вязкости используемой среды от величины давления, температурный коэффициент вязкости γ , показывающий изменение вязкости среды от температуры. В работе [12] показано, что зависимость значений (C) от величины давления при конкретной температуре – незначительна – 2,5 %.

Данные по значению коэффициентов C с учетом температуры (γ) приведены в таблице 1.

Для используемой вязкоупругой (изоляционной смолы) температура, характерная для начала размягчения, находится в пределах $25 \div 28 \text{ }^\circ\text{C}$ и по пластичности соответствует строительным замазкам или пластилину.

Технологические параметры процесса: максимальное изостатическое давление $P = 500 \text{ МПа}$, скорость увеличения давления (исследуемой среды) в изостате $v_{ув} = 25 \text{ МПа/с}$, выдержка под максимальным давлением – 30 с.

Изменение вязкости жидкости при различных высоких давлениях и температуре можно определить (если нет в литературных источниках) по предложенной автором методике [12].

По расположению кривых 1÷4 (рис. 1), отражающих степень пропитки пористого тела вязкоупругой средой (смолой) под давлением с нагревом, видно, что на 75 мм глубины тела разница в величинах давлений составит: между кривой 1 ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) и кривой 2 ($T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$) – 22 МПа; между кривой 2 и 3 ($T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$) – 123 МПа; и между кривой 3 и 4 ($T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$) – 192 МПа.

Таблица 1 – Изменение пьезокоэффициента вязкости C от величины давления

$T(^\circ\text{C})$ $P(\text{МПа})$	25 °C	40 °C	60 °C	80 °C
	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа^{-1})	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа^{-1})	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа^{-1})	$C \cdot 10^{-2}$ (МПа^{-1})
100÷500	0,55	0,46	0,38	0,32

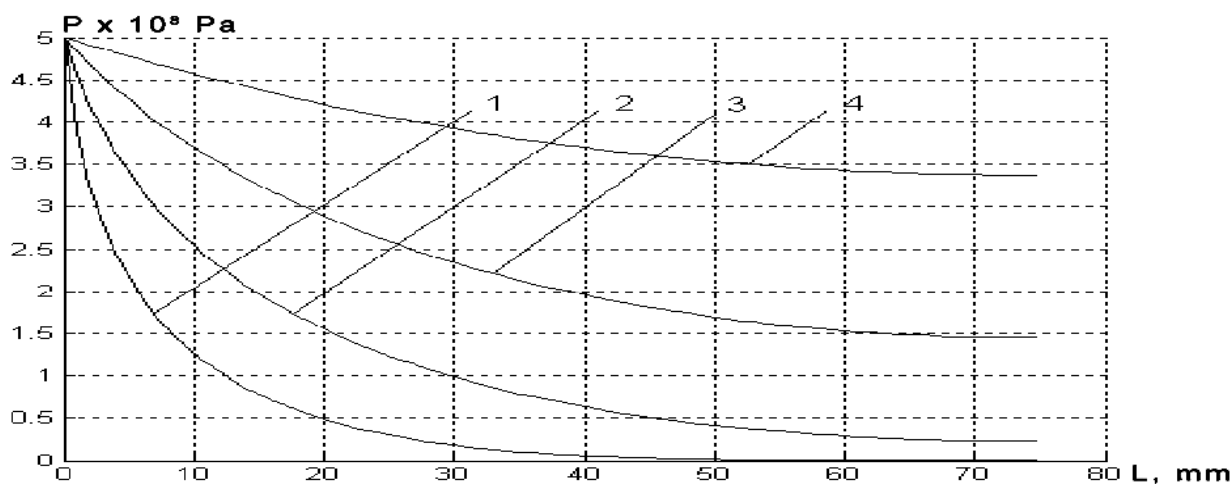


Рис. 1. Кривые распределения давления битумной смолы по глубине пористого тела под давлением при различных температурах:

1 – $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

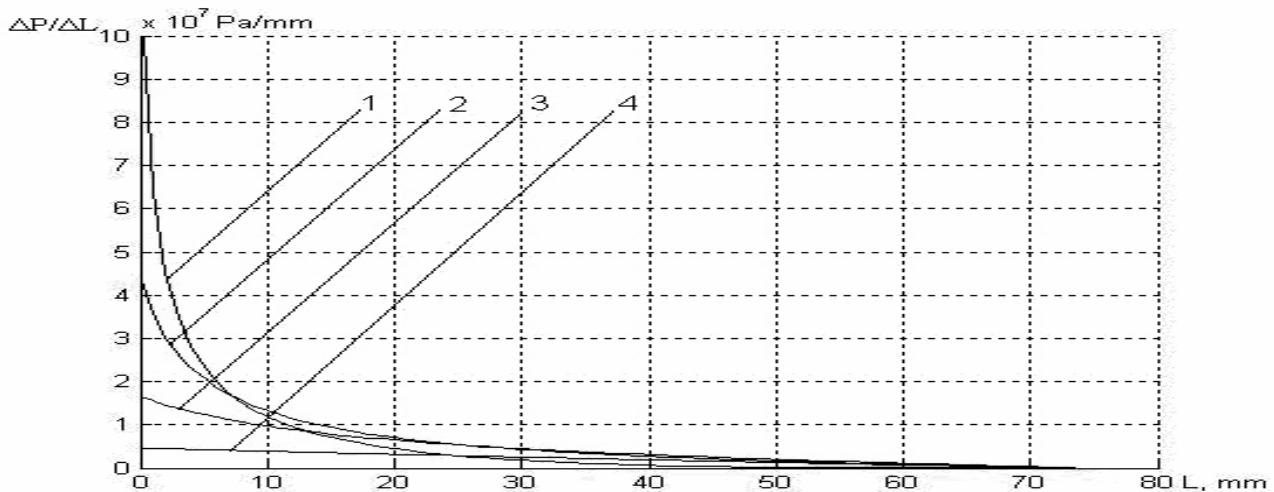


Рис. 2. Кривые распределения $\Delta P/\Delta L$ вязкой ($\mu_0 = 120$ Па·с) вязкоупругой среды по глубине пористого тела при различных температурах:

1 – $T = 20$ °C; 2 – $T = 40$ °C; 3 – $T = 60$ °C; 4 – $T = 80$ °C

На рис. 2 показаны графики значений ($\Delta P/\Delta L$) среды, соответствующие распределениям давления, отображенных на рис. 1. Отмечаем, что максимальные значения ($\Delta P/\Delta L$) будут определяться: кривая 1 ($T = 25$ °C) – 111 МПа/мм; кривая 2 ($T = 40$ °C) – 44 МПа/мм; кривая 3 ($T = 60$ °C) – 17 МПа/мм; и кривая 4 ($T = 80$ °C) – $\Delta P/\Delta L = 4,6$ МПа/мм.

Ранее в работе [13] был проведен анализ напряженного состояния пористых тел, пропитанных жидкостью под высоким давлением, выявлены причины разрушения и обоснован критерий прочности для оценки степени разрушения.

На ряде проведенных экспериментов (по методике, указанной в работе 19) было выявлено, что у используемой в данной работе пористой керамики на основе SiO_2 – искусственного кварца, разрушение начиналось при пе-

репаде давления жидкости в порах тела при быстром (0,1 с) сбросе давления в изостате, не менее 50 МПа/мм, т. е., выполняется условие $(\Delta P/\Delta L_{кр}) \geq 50$ МПа/мм.

В табл. 2 даны основные расчетные характеристики вязкоупругой среды на различной глубине пористого тела при вышеуказанных технологических параметрах процесса. По данным таблицы 2 отмечаем, что при пропитке смолой, только при $T = 25$ °C, на первых миллиметрах пористого тела $\Delta P/\Delta L = 111$ МПа/мм будет превышать значение $\Delta P/\Delta L_{кр} = 50$ МПа/мм, т.е. в этой зоне тело подвержено разрушению. При тех же технологических параметрах пропитки, но при температурах более 40° разрушение происходить не будет. Согласно уравнению (11), определяем значения касательных напряжений, соответствующих различным значениям ($\Delta P/\Delta L$).

Таблица 2 – Основные расчетные характеристики пропитывающей вязкоупругой среды на различной глубине пропитываемого пористого тела после подъема давления и выдержки в 30 с

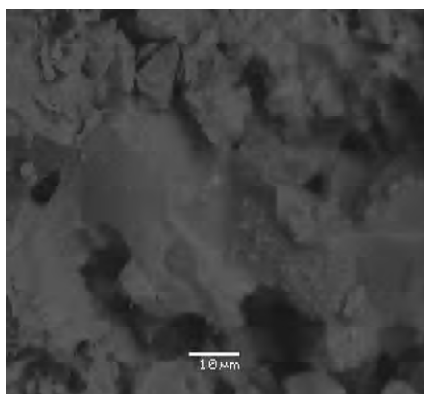
Глубина точки определения (мм)	Давление P (МПа)				$\Delta P/\Delta L$ (МПа/мм)				Вязкость μ^* (Па·с)			
	Температура (°C)				Температура (°C)				Температура (°C)			
	25	40	60	80	25	40	60	80	25	40	60	80
1	500	500	500	500	111	43	16,5	4,6	1880	272	55	15
10	141	265	381	461	13,4	14,3	10,2	3,97	261	92	35	13,5
20	53,4	163	296	425	4,9	7,45	6,74	3,27	161	58	26	12
50	1,7	43	172	355	0,22	1,74	2,13	1,38	121	33	16	10
Глубина точки определения (мм)	Скорость движения среды $v_x \cdot 10^{-2}$ (мм/с)				Касательные напряжения τ (МПа)							
	Температура (°C)				Температура (°C)							
	25	40	60	80	25	40	60	80				
1	0,74	2,0	3,8	3,86	0,33	0,129	0,05	0,014				
10	0,65	1,96	3,67	3,73	0,04	0,043	0,031	0,012				
20	0,38	1,63	3,2	3,47	0,015	0,022	0,020	0,01				
50	0,02	0,65	1,65	1,76	0,0007	0,005	0,0064	0,0041				

Определение среднего (r_{cp}) и максимального (r_{max}) радиусов пор имеет свои недостатки: 1 – размеры пор в теле, состоящем из частиц фракций от 160 до 14 мкм (с учетом выгорания органического связующего) могут отличаться более чем на порядок; 2 – нет оптимального способа определения среднего размера пор; 3 – во многих методах определения среднего размера пор используют жидкости, т.е. они являются не прямыми, а косвенными (погрешность до 25 %); наиболее точным является метод микрофотографий, но для его использования необходимо иметь соответствующее оборудование [14].

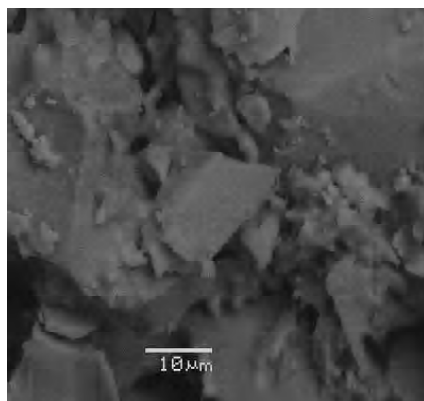
В рассматриваемой работе уточнение среднего и максимального размеров пор используемой керамики осуществляли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM 63-60-LA с увеличением 1500. По фотографиям (рис. 3) поверхности изломов керамики был проведен анализ среднего ($\sim 1,2$ мкм) и максимального (~ 20 мкм) типоразмеров пор.

Анализ результатов

Значения касательных напряжений, образующихся на поверхности пор, при течении смолы, с учетом коррекции среднего размера пор, на различных по глу-



а



б

Рис. 3. Структура пористой керамики, показывающая размерность габаритов пор и отражающая их распределение по объему:

а – на 5 мм глубины; б – на 15 мм глубины

бине участках тела представлены в продолжении таблицы 2.

Далее рассматривалось поведение вязкой среды нагретой до $T = 40$ °С при различных скоростях сброса давления в гидростате от P_{max} до атмосферного. Технологические параметры пропитки (величина максимального давления, скорость подъема и выдержка) указаны выше.

На рисунке 4 приведены кривые распределения ($\Delta P/\Delta L$) смолы, нагретой до $T = 40$ °С при различных скоростях сброса давления от максимального значения ($P = 500$ МПа) до атмосферного. Время сброса давления соответствовало 0,5 с ($v_{сб} = 1 \cdot 10^3$ МПа/с); 1 с. ($v_{сб} = 0,5 \cdot 10^3$ МПа/с); 2 с. ($v_{сб} = 0,25 \cdot 10^3$ МПа/с) и 3 с ($v_{сб} = 0,167 \cdot 10^3$ МПа/с).

Прямая (рис. 4) соответствует значению $\Delta P/\Delta L_{кр} = 50$ МПа/мм и определяет начало разрушения пористого тела. По пересечению кривых перепада давления с этой прямой можно судить, при каких скоростях сброса давления разрушение произойдет, а при каких пористое тело останется не разрушенным. Так, при скоростях сброса $v_{сб} = 1 \cdot 10^3$; $0,5 \cdot 10^3$ и $0,25 \cdot 10^3$ МПа/с – пористое тело однозначно будет разрушено на глубину 2–3 мм. При скорости сброса $v_{сб} = 0,167 \cdot 10^3$ МПа/с (кривая 4) и менее, пористое тело с соответствующими прочностными характеристиками останется целым.

Переходим к анализу величин касательных напряжений на стенках пор тела, образующихся при течении смолы на различной глубине. Время сброса давления в гидростате выбиралось: минимальное – 0,5 с, при котором разрушение наступало; и максимальное – 3 с, при котором пористое тело оставалось целостным. Величины касательных напряжений на стенках пор, образованных течением смолы при различных значениях $\Delta P/\Delta L$, в моменты сброса давления в гидростате за 0,5 с и 3 с, представлены в таблице 3.

Далее анализировались условия начала разрушения пористого тела. Согласно экспериментальным данным $\Delta P/\Delta L_{кр} = 50$ МПа/мм (начало разрушения пористого тела) и в соответствии с выражением 11, максимальные касательные напряжения на стенках пор при $r_{cp} = 6 \cdot 10^{-3}$ мм составят $\tau = 0,15$ МПа.

В рассматриваемом случае с учетом прочности на разрыв используемой пористой керамики $\tau_n = \sigma_p / 2 = 2,45$ МПа можно утверждать, что максимальные габариты единичных пор будут составлять (согласно выражению 11) $r_{max} = 0,098$ мм или $D_{max} \sim 0,2$ мм, что и подтверждается анализом микрофотографий изломов используемой керамики (рис. 3).

Как указано в работе [14], содержание пор со средним размером $r_{cp} = 6 \cdot 10^{-3}$ мм в общей массе тела ~ 80 %, остальное количество пор имеют габариты, превыша-

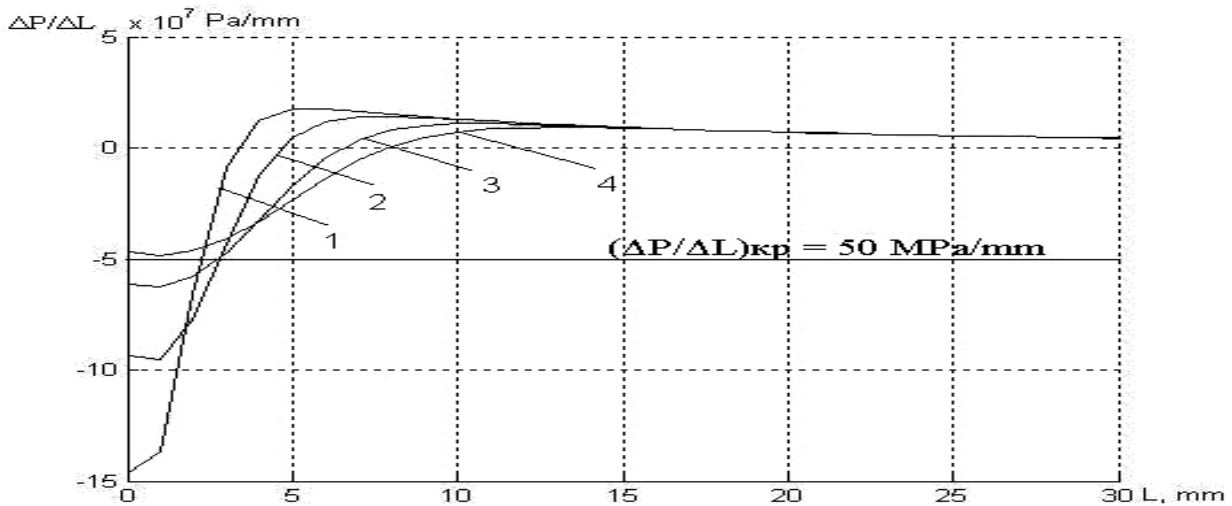


Рис. 4. Кривые распределения $\Delta P/\Delta L$ вязкой среды по глубине пористого тела при $T = 40$ °С при различных скоростях сброса давления:

1 – $v_{c\delta} = 1 \cdot 10^3$ МПа/с; 2 – $v_{c\delta} = 0,5 \cdot 10^3$ МПа/с; 3 – $v_{c\delta} = 0,25 \cdot 10^3$ МПа/с; 4 – $v_{c\delta} = 0,167 \cdot 10^3$ МПа/с

Таблица 3 – Основные расчетные характеристики пропитывающей среды на различной глубине пропитываемого пористого тела при сбросе давления за 0,5 и 3 с

Факторы	Глубина зоны анализа (мм), при времени сброса 0,5 и 3 с							
	1		10		20		50	
	0,5	3	0,5	3	0,5	3	0,5	3
$\Delta P/\Delta L$ (МПа/мм)	146	46,9	14,1	4,78	7,46	7,4	1,82	1,85
Напряжения сдвига τ (МПа)	0,438	0,141	0,042	0,014	0,0224	0,0222	0,0054	0,0055

ющие значения r_{cp} в несколько раз, а некоторые и на порядок. Объясняется это тем, что на некоторых участках при спекании (выгорании связующего) происходит объединение нескольких пор в единую. При анализе фотографий изломов исследуемой керамики такие «поры» фиксировались и замерялись. Поры по своей природе имеют очень разнообразную по периметру форму, и, естественно, говорить о «радиусах» пор можно только в первом приближении. Имея одинаковый средний радиус вписанной окружности, две поры могут значительно отличаться длиной периметра, что очень важно при определении момента разрушения пористого тела от движения по нему вязкой сжимаемой среды под высоким давлением. В связи с этим, можно сделать основной вывод о природе разрушения пористых тел при пропитке их вязкими сжимаемыми средами под высоким давлением.

Начало разрушения начинается при течении среды в наибольших из пор, содержащихся в теле, по мере разрушения наибольших из пор и уменьшения прочности тела, разрушаться начинают и поры с меньшими габаритами, и так до полного разрушения. Анализ разрушенных частиц показал, что они составные и по габаритам многие из них превышают максимальные

размеры исходных, что и подтверждает высказанный механизм разрушения.

Обобщение данных по всей работе позволяет сделать ряд выводов

1. Обоснован и сделан вывод о неприменимости различных «классических» моделей вязкоупругих сред при расчетах их течения в пористых телах под высоким давлением с нагревом в процессах фильтрации и пропитки.

2. Предложена методика расчета касательных напряжений, образующихся в пористых телах, при течения по ним различных по физическим свойствам вязких сред под высоким давлением с нагревом, на различной глубине.

3. Для определения скорости течения вязких сред под высоким давлением с нагревом в пористых телах, предложено и обосновано применение нелинейного закона Дарси.

4. На основе закона Ньютона (о величинах касательных напряжений в пористых телах при пропитке их вязкой средой под высоким давлением) выявлены основные характеристики, влияющие на величину касательных напряжений: габариты пор (r) и величина

перепада давления пропитывающей среды – $(\Delta P/\Delta L)$.

5. Предложен способ определения основных технологических параметров вязких сред, протекающих в пористом теле на различной глубине, под высоким давлением с нагревом: скорости движения среды (v_x), изменения вязкости (μ), величины давления среды на различной глубине (P), перепада давления ($\Delta P/\Delta L$) и касательных напряжений (τ), образующихся на поверхности пор при течении среды.

6. На основе структурной неоднородности рассмотрена задача по определению величин касательных напряжений, создаваемых течением жидкой среды в пористых телах под высоким давлением с нагревом, в зависимости от типоразмера пор и описан механизм разрушения.

Перечень ссылок

1. Композиционные материалы : справочник / [под ред. В. В. Васильева]. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. Косинский В. В. Определение коэффициента проницаемости пористых тел при пропитке вязкими жидкостями под давлением / Косинский В. В. // *Металлургия*. – 2006. – Вып. 13. – С. 55–59.
3. Совместные работы по созданию и освоению технологии и оснастки для гидродинамического удаления пористых стержней турбинных лопаток : отчет о НИР (заключительный). – М. : ВНИИМетМаш, 1985. – № IP 01870007295 ; Инв. № В 269236. – 92 с.
4. Косинский В. В. Энергетические составляющие сжимаемых жидкостей при течении их в пористых средах под высоким давлением : сб. науч. тр. / В. В. Косинский // *Прикладная гидромеханика*. – 2009. – Т. 11(83). – № 3. – С. 21–27.

5. Косинский В. В. Математическое обоснование влияния основных технологических факторов на процессы пропитки недеформируемых пористых оснований вязкими средами под высоким давлением / В. В. Косинский // *Порошковая металлургия*. – 2009. – № 1/2. – С. 18–28.
6. Косинский В. В. Влияние температуры на свойства вязких сжимаемых жидкостей в процессе пропитки ими пористых тел под высоким давлением / В. В. Косинский // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2008. – С. 52–56.
7. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 736 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
9. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – М. : Мир, 1964. – 216 с.
10. Косинский В. В. Нелинейные законы Дарси и критерий Рейнольдса при течении сжимаемых жидкостей под высоким давлением в пористых телах / В. В. Косинский // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2007. – № 1. – С. 60–69.
11. Бер Я. Физико-математические основы фильтрации воды / Бер Я., Заславский Д., Ирней С. – М. : Мир, 1972. – 384 с.
12. Косинский В. В. Определение пьезокоэффициента вязкости различных жидкостей и их смесей при высоких давлениях : сб. науч. тр. НАНУ / В. В. Косинский // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – Т. 18. – № 1. – С. 93–100.
13. Косинский В. В. Разрушение пористых тел жидкостью под высоким давлением / В. В. Косинский // *Проблемы прочности*. – 1991. – № 4. – С. 69–73.
14. Пористые проницаемые материалы : справочник / [под ред. Белова С. В.]. – М. : Металлургия, 1987. – 336 с.

Одержано 22.04.2010

V. V. Kosinskiy

THE DESTRUCTION SOURCES OF POROUS BODIES AT COMPOSITE MATERIALS PRODUCTION BY ISOSTATIC VISCOUS ENVIRONMENT IMPREGNATION METHOD

На основі математичної моделі фільтрації в'язких середовищ у пористих тілах під високим тиском і ньютонівського методу визначення дотичних напружень - запропонований і розглянутий спосіб визначення дотичних напружень на різній глибині, що виникають на поверхні пор тіла при рухові по них в'язкого середовища під високим тиском за різних умов навантаження. Для визначення величин дотичних напружень запропоновано використання нелінійного закону Дарсі. Розглянуто задачу про вплив структурної неоднорідності пористих тіл на величину дотичних напружень, створюваних плинном рідкого середовища в порах та описано механізм руйнування пористих тіл у процесі їхнього просочення в'язкими середовищами під високим тиском.

Ключові слова: просочення, кераміка, математична модель, в'язке середовище, ізостат, руйнування.

On the basis of viscous environments filtration in porous bodies under high pressure mathematical model and Njuton's stress tangents definition method the definition way of stress tangents on the various depth that appears on the bodies pores surface during viscous environment under high pressure movement and various loading conditions is offered and considered. For the stress tangents values definition the nonlinear Darsi's law is offered. The problem of porous bodies structural heterogeneity influence stress tangents values created by pores liquid environment flow is considered. The mechanism of porous bodies destruction during its impregnation by viscous environments under high pressure is described.

Keywords: pressure treatment, ceramics, mathematical model, viscous environment, isostatic equipment, distruction.