

наличии сильных магнитных полей. Основная задача в этом случае заключается в адекватной аппроксимации корреляционного тензора $\langle M_{ij} \rangle_{M, P}$ (или $\langle M_{ij} \rangle_{P, P_0}$), которая должна учитывать особенности каждого конкретного течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алавидзе Г. Р., Ватажин А. Б. Описание турбулентных магнитогидродинамических течений с помощью дополнительного дифференциального уравнения для турбулентной вязкости. — Тр. Ин-та механ. МГУ, 1974, № 32, с. 158–170.
2. Артемов В. И., Ватажин А. Б., Левитан Ю. С., Синкевич О. А. Аппроксимация корреляций, содержащих пульсации электрических параметров, при турбулентном течении высокотемпературного электропроводного газа. — Теплофиз. высоких температур, 1984, т. 22, № 4, с. 720–727.
3. Хинце И. О. Турбулентность. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.

Москва

Поступила в редакцию
20.III.1985

УДК 532.529.5

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ЭРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

ВАСИН А. В., МИХАТУЛИН Д. С., ПОЛЕЖАЕВ Ю. В.

В литературе [1–4] описаны результаты исследования эрозионной стойкости некоторых элементов конструкций энергетических машин, пневмотранспортных магистралей, кромок винтов вертолетов и т. п. при одновременном воздействии тепловых потоков и мелкодисперсных частиц; однако эти данные ограничены как по скорости соударения частиц (до 170 м/с), так и по температуре прогретого слоя (до 900 С).

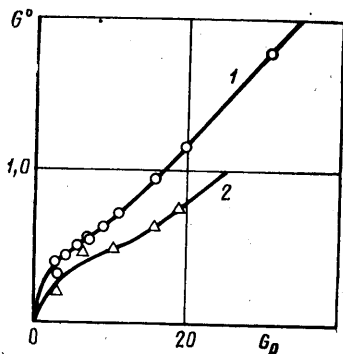
В данной статье представлена методика определения температурного режима материалов при их разрушении в высокотемпературной запыленной струе газа и результаты экспериментального исследования теплоэрозионной стойкости стеклопластика и графита при воздействии на них высокоскоростных запыленных газовых потоков.

Эрозионное воздействие на материал оказывают частицы из тугоплавких окислов, специально вводимые в струю; тепловое воздействие на образец создается высокотемпературной струей газа, а также за счет соударения с образцом твердых частиц, передающих ему часть своей энергии. Регулирование теплового состояния поверхностного слоя образца осуществляется изменением концентрации частиц в потоке и соответственно изменением скорости разрушения материала и градиента температуры в нем. С увеличением концентрации частиц в потоке интервал времени между ударами частиц по поверхности материала уменьшается. При этом скорость эрозионного разрушения материала в потоке увеличивается, а средняя температура уносимого слоя T_s , с которой соотносят скорость эрозионного разрушения, уменьшается. Таким образом, увеличение концентрации частиц в высокоскоростном газовом потоке приводит к уменьшению влияния теплового воздействия потока на интенсивность эрозионного разрушения образца.

Испытаниям на стенде подвергались цилиндрические образцы с плоским торцом из стеклопластика и графита. Параметры потока соответствовали условию сохранения частиц в твердой фазе. В форкамеру установки вводились частицы микропорошка электрокорунда Al_2O_3 марки М50П ГОСТ 3647-71 с размером основной фракции $d_p \approx 50$ мкм. Частицы разгонялись в основном тракте установки газовым потоком, затем частично теряли свою скорость в ударном слое, так что окончательная скорость взаимодействия с поверхностью составляла $V_{pw} \approx 1000$ м/с.

В результате испытаний получены зависимости (фиг. 1) относительных величин уноса $G^\circ = G_{er} / G_p^*$ стеклопластика (кривая 1) и графита (кривая 2) от плотности потока массы частиц G_p , кг/м²с. Здесь G_{er}^* — величина эрозионного уноса стеклопластика в потоке с пороговым значением концентрации частиц G_p^* , выше которого интенсивность эрозионного разрушения $G' = G_{er} / G_p$ становится величиной постоянной.

При $G_p < G_p^*$ влияние теплового воздействия высокотемпературного двухфазного потока на эрозионный унос материалов проявляется в отклонении зависимости $G^\circ(G_p)$ от линейной и увеличении G' примерно в 2 раза для стеклопластика и в 1,5 раза для графита.



Фиг. 1

В основу математической модели положено следующее допущение [5]: теплообмен между набегающим высокоскоростным запыленным потоком газа и образцом в окрестности критической точки рассчитывается по формулам [6]

$$q_w = St G_g (I_e - I_w) + \frac{1}{2} f G_p V_{pw}^2 - \epsilon \sigma T_w^4$$

$$St = \frac{\alpha}{C_p G_g} = 0,098 \chi^{0,317}$$

$$\chi = \frac{G_p (1 + G')}{G_g}, \quad G' = \frac{G_{er}}{G_p}$$

$$G_p = \rho_p V_{pw}, \quad G_g = \rho_\infty V_\infty$$

Здесь q_w — тепловой поток в критической точке внутрь материала, ρ_∞ , V_∞ — плотность и скорость невозмущенного газового потока; ρ_p , V_{pw} — пространственная плотность и скорость частиц у поверхности; I_e , I_w — энтальпия газового потока на границе пограничного слоя и на поверхности; G_{er} , G_p , G_g — соответственно плотность потока массы разрушаемого материала, бомбардирующих частиц и газа в районе критической точки образца; α , C_p — коэффициент теплоотдачи и теплоемкость газа; ϵ , σ — степень черноты исследуемого материала и постоянная Стефана — Больцмана; f — коэффициент аккомодации кинетической энергии частиц. Для эрозионно стойких материалов (металлов) $f=0,7$, для всех других материалов (в том числе и композитов) $f=0,3$.

В эксперименте условия воздействия двухфазного потока на поверхность образца таковы, что выпадение частиц равновероятно для всех элементарных площадок поверхности и равномерно распределено по времени. Это обстоятельство позволяет предположить, что при достаточной высокой концентрации частиц переток тепла вдоль поверхности преграды имеют локальный и кратковременный характер. В среднем же тепловое состояние всей поверхности образца можно считать одинаковым и рассматривать изменение температурного поля в одномерной постановке (только по толщине образца).

Тогда на каждый участок поверхности, нормальной к омывающему потоку, площадью, равной площади кратера ($\pi d_k^2/4$), образованного частицей, выпадают частицы с периодом

$$\tau_{er} = \frac{2}{3} \frac{\rho_p d_p^3}{G_p d_k^2}$$

и сносят слой материала толщиной

$$h = \frac{2}{3} G' \frac{\rho_p d_p^3}{\rho_m d_k^2}$$

где ρ_m — плотность материала образца, d_k — диаметр кратера.

Снос прогретого материала частицей приводит к мгновенному падению температуры поверхности образца до ее значения на глубине h . В течение интервала времени τ_{er} до следующего удара происходит нестационарный конвективный нагрев образца. Этот процесс в отсутствие теплехимического разрушения описывается уравнением

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

с граничными условиями при $y=0$

$$\frac{\alpha (I_e - I_w)}{C_p} = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} + \epsilon \sigma T_w^4 - f \frac{G_p V_{pw}^2}{2} \eta$$

где коэффициент η имеет ненулевое значение только на первом временном шаге численного счета, сразу после сноса слоя толщины h , и на «холодной» поверхности образца при $y=\delta$ $\partial T/\partial y=0$.

Начальными условиями после снятия частицей слоя толщины h является распределение температуры по оставшейся толщине образца

$$T(i\tau_{er}, y) = T_i(y) \quad (i=0, 1, \dots, n, n=\tau_{ex}/\tau_{er})$$

В этих уравнениях δ — толщина образца; τ_{ex} — время эксперимента, ρ_s , c_s , λ_s — теплофизические характеристики материала образца.

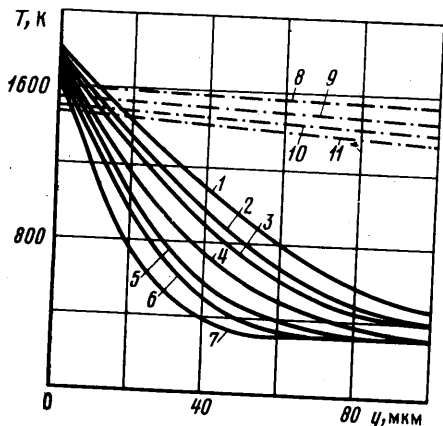
Вследствие малого времени взаимодействия частиц с поверхностью (при $V_{pw} \approx 1000$ м/с, $\tau=10^{-8}-10^{-7}$ с) коэффициент аккомодации тепловой составляющей энергии частиц принимается равным нулю, а передача доли кинетической энергии частицы ($\eta \neq 0$), расходуемой на нагрев преграды, осуществляется в тече-

ние первого временного шага численного счета прогрева после момента взаимодействия и сноса слоя толщины h .

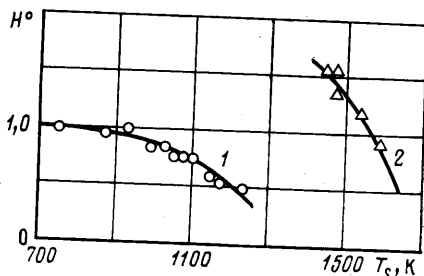
Исследование композиционных материалов после эрозионных испытаний показывает, что в материалах со сложной структурой типа стеклопластика понятие формы кратера весьма условно.

На основании анализа результатов расчета температурного состояния поверхностного слоя материалов при различных формах кратеров установлено, что форма кратеров, образующихся в процессе эрозии в высокотемпературной запыленной струе газа, оказывает слабое влияние на тепловое состояние поверхностного слоя, а принципиальное значение имеет лишь отношение глубины кратера к его диаметру. В настоящей работе это отношение принималось равным $1/2$ [7].

Изменение температурного профиля внутри стеклопластика, реализующееся при эрозионном разрушении в зависимости от плотности потока массы частиц в набегающем потоке, показано на фиг. 2 (кривые 1-7 соответствуют $G_p=2,6; 4,14;$



Фиг. 2



Фиг. 3

6,76; 9,64; 16,15; 19,3; 30,75). Обращает на себя внимание небольшое отличие температуры поверхности T_w от температуры торможения ($T_0'=2000$ К), что является следствием интенсивного теплообмена в условиях обтекания высокотемпературной запыленной струей. При этом в стеклопластике реализуются высокие градиенты температуры в поверхностном слое $-dT/dy=(20-60) \cdot 10^6$ К/м. Изменение G_p в основном приводит к изменению параметра h/δ_T (этот параметр для стеклопластика имеет порядок единицы), где δ_T — толщина прогретого слоя материала, и через этот параметр влияет на среднюю температуру поверхностного слоя. Внутри графита вследствие его хорошей теплопроводности ($h/\delta_T \ll 1$) реализуются пологие температурные профили с низким значением градиента температур $-dT/dy \approx (3-12) \cdot 10^5$ К/м (кривые 8-11 соответствуют $G_p=2,95; 6,57; 10,36; 18,96$).

Для оценки эрозионной стойкости материалов используется эффективная энтальпия эрозионного разрушения H_{er} [8], которая численно равна количеству энергии, необходимой для эрозионного разрушения единицы массы материала: $H_{er} = V^2/(2G_{er}/G_p)$.

На фиг. 3 показано изменение величины $N^0 = H_{er}/H_{er}^*$, где H_{er}^* — значение эффективной энтальпии эрозионного разрушения стеклопластика при низких температурах, в зависимости от рассчитанной средней температуры поверхностного слоя

$$T_s = \frac{1}{h} \int_0^h T(y) dy$$

Для материала с низкой температуропроводностью (стеклопластик, кривая 1) на стенде удалось реализовать диапазон изменения T_s от 750 до 1250 К, для отличающегося высокой температуропроводностью графита (кривая 2) — более узкий диапазон от 1400 до 1600 К.

В области $T_s \approx 900$ К для стеклопластика H_{er} слабо зависит от T_s ; с дальнейшим ростом T_s эффективная энтальпия эрозионного разрушения начинает уменьшаться. С увеличением средней температуры от 900 до 1250 К эрозионная энтальпия стеклопластика падает в 2 раза. Графит — материал более эрозионно стойкий, но для него не удалось вследствие его высокой температуропроводности получить значение H_{er} в области низких значений T_s , где ожидалась слабая зависимость $H_{er}(T_s)$. Таким образом, для обоих испытанных материалов имеет место существенная зависимость эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температурного состояния поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суур У. К. О влиянии температуры на механизм изнашивания металлов в струе абразива.— Тр. Таллин. политехн. ин-та, сер. А, 1966, № 237, с. 63—76.
2. Айвис. Эрозия нержавеющей стали 310 при 975°С в атмосфере продуктов сгорания.— Тр. амер. о-ва инж.-мех. Теорет. основы инж. расчетов, 1977, т. 99, № 2, с. 31—38.
3. Игнатов С. Ф., Репин И. В., Сахаров В. П. Установка для испытания материалов на износостойкость при ударе твердых частиц.— Завод. лаб., 1981, т. 47, № 8, с. 89—91.
4. Уэйкмен Т., Табаков В. Экспериментальное исследование эрозии в реактивном двигателе.— Ракетная техника и космонавтика, 1980, т. 18, № 5, с. 183—189.
5. Васин А. В., Полежаев Ю. В. Унос массы при совместном эрозионном и тепловом воздействии двухфазного потока.— Изв. АН СССР. МЖТ, 1984, № 1, с. 120—126.
6. Данбар, Котки, Макмиллен. Возрастание тепловых нагрузок в условиях обтекания тел запыленными гиперзвуковыми потоками.— Ракетная техника и космонавтика, 1975, т. 13, № 7, с. 83—89.
7. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар.— В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. 2. М.: Мир, 1971, с. 204—246.
8. Полежаев Ю. В., Романченко В. П., Чирков И. В., Шебеко В. Н. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала.— Инж.-физ. журн., 1979, т. 37, № 3, с. 395—404.

Москва

Поступила в редакцию
25.VII.1984

УДК 532.546

ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К СКВАЖИНЕ В НЕОДНОРОДНО-СЛОИСТОМ ПЛАСТЕ ПРИ ОТКАЧКЕ ИЗ ДВУХ СЛОЕВ

КАЗАРЯН С. М.

Использование подземных вод в орошении плодородных земель является важной практической задачей. Однако при ее решении не должна нарушаться глобальная гидрогеологическая обстановка режима подземных вод с их естественной разгрузкой. Поэтому предварительно необходимо теоретически исследовать возможность их использования. Ниже такое исследование выполнено применительно к условиям Араратского артезианского бассейна с двумя напорными водоносными горизонтами, отбор подземных вод из которых осуществляется при помощи системы эксплуатационных скважин. Основные особенности этого процесса выясняются уже из анализа решения задачи для одиночной скважины. Последняя и является предметом исследования данной работы. Ниже получено аналитическое решение задачи о неустановившемся движении подземных вод в неограниченной трехслойной, гидравлически связанной среде с учетом инфильтрации и перетекания при жестком режиме в раздельном слое (фиг. 1). При этом напоры в водоносных слоях разные, а отбор воды производится из двух нижних напорных слоев с постоянным суммарным расходом.

Процесс фильтрации описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{aligned}
 & b_0(S_1 - S_0) - e = \frac{\partial S_0}{\partial t} \\
 & a_1 \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} \right) - b_1(S_1 - S_2) - b_1^*(S_1 - S_0) = \frac{\partial S_1}{\partial t} \\
 & a_2 \left(\frac{\partial^2 S_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_2}{\partial r} \right) - b_2(S_2 - S_1) = \frac{\partial S_2}{\partial t} \quad (1)
 \end{aligned}$$

В системе (1) введены следующие обозначения [1, 3]:

$$a_i = \frac{T_i}{\mu_i^*}, \quad b_0 = \frac{\lambda_0}{h_0 \mu_0}, \quad b_1^* = \frac{\lambda_0}{h_0 \mu_1^*}, \quad b_1 = \frac{\lambda_1}{h_1 \mu_1^*}, \quad b_2 = \frac{\lambda_1}{h_1 \mu_2^*}, \quad e = \frac{\varepsilon}{\mu_0}$$

$$S_i(r, t) = H_{ie} - H_i(r, t)$$