

УДК 536.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУЕЙ

И. К. Жарова¹, Г. В. Кузнецов², Е. А. Маслов³

¹ *Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Томский политехнический университет, Томск, Россия*

³ *Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия*

Решена плоская нестационарная задача сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении конструкционного материала (КМ) под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи вязкого сжимаемого газа, натекающей по направлению нормали к поверхности неподвижной пластины. Представлены типичные поля температур и скоростей, описывающие основные закономерности исследуемого процесса. Проведено сравнение температурного поля пластины в процессе разрушения с данными эксперимента и показано их удовлетворительное соответствие.

Одним из перспективных направлений в технологиях перфорации, резки и обработки различных материалов являются технологии, в основе которых лежит воздействие высокотемпературной гетерогенной струи на конструкционный материал. Теоретические и экспериментальные основы ряда таких технологий заложены в [1, 2]. Разработка новых наукоемких технологий экспериментальным путем практически невозможна в связи с многофакторным характером физических и химических процессов, протекающих при их реализации, и очень широкими диапазонами изменения основных технологических параметров. Для выбора наиболее эффективных режимов воздействия высокотемпературных гетерогенных струй на материал необходимо проведение исследований на основании физического и математического моделирования, что позволяет анализировать условия взаимодействия и определять параметры, характеризующие рассматриваемый процесс.

Цель – математическое моделирование процесса сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении КМ под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по нормали к поверхности пластины

Рассматривается задача высокотемпературного конвективно-кондуктивного тепломассопереноса при натекании гетерогенной струи на поверхность пластины. При моделировании процесса взаимодействия предполагалось: радиационный теплообмен на поверхности пластины не учитывается; возможные процессы плавления и окисления материала пластины активными компонентами газовой струи отсутствуют; скорость струи дозвуковая; режим течения ламинарный.

Известно, что одним из важнейших параметров, характеризующих процесс разрушения поверхности пластины, является температура прогретого («размягченного») слоя материала, т.к. предел прочности для большинства конструкционных материалов с повышением температуры снижается. При постановке задачи принималось, что если гетерогенная струя создает касательные напряжения трения на поверхности, значение которых превышает предел прочности материала при соответствующей температуре, то это приводит к термомеханическому разрушению. В

качестве условия разрушения принято равенство касательных напряжений трения $\tau_g(y,t)$ и предела прочности материала $\sigma_{пр}(T_s)$ при соответствующей температуре:

$$\tau_g(y,t) = \sigma_{пр}(T_s). \quad (1)$$

Считалось, что гетерогенная струя представляет собой совокупность непрерывной (несущей) и дискретной фаз, "газ – твердые частицы". Также предполагалось, что частицы не влияют на режим течения газовой струи, не взаимодействуют между собой и в течение всего процесса не изменяют своей формы и массы [3]. Частицы являются твердыми и взаимодействуют с поверхностью материала пластины в режиме трения-скольжения [4]. Гетерогенная струя рассматривается как двухкомпонентная среда (газ – твердые частицы) с эффективными характеристиками [3, 4].

Значения касательных напряжений трения $\tau_g(y,t)$ на поверхности пластины в (1) определялись в соответствии с общей теорией взаимодействия двухфазных струй с поверхностью материала [4]:

$$\tau_g(y,t) = c_f \frac{\rho_g U^2(x,y,t)}{2}, \quad (2)$$

где $U(x,y,t)$ – скорость струи, c_f – коэффициент трения частицы о шероховатую поверхность, ρ_g – эффективная плотность гетерогенной струи.

Область решения рассматриваемой задачи включает две подобласти, одна из которых – высокотемпературная гетерогенная струя, вторая – твердое тело. Схема представлена на рис. 1.

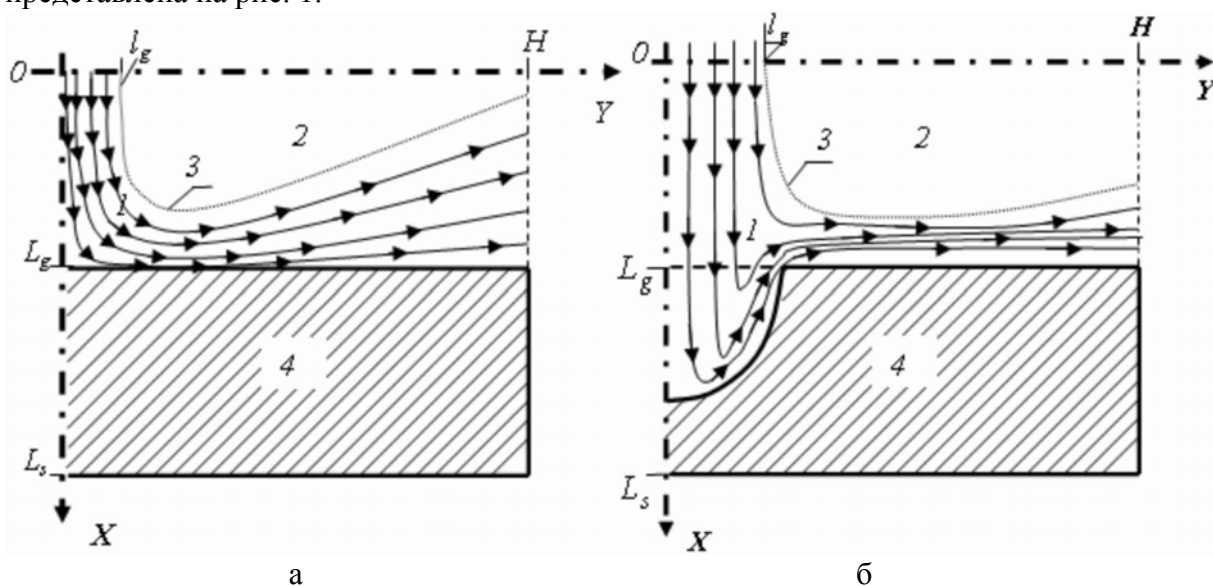


Рис. 1. Область решения задачи: а) – начальный момент времени $t = 0$; б) – конечный момент времени: 1 – струя; 2 – внешняя среда; 3 – граница струи; 4 – пластина

В данной схеме приняты следующие обозначения: H – продольный размер пластины; L_s – расстояние от начального сечения струи до нижней границы пластины; l_g – ширина начального сечения струи; L_g – расстояние от начального сечения струи до верхней границы пластины.

В рамках принятых предположений анализируемый процесс описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса для гетерогенной струи и уравнением теплопроводности в области с подвижной криволинейной границей для пластины [5].

Система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями для рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

уравнения движения

$$\frac{\partial \rho_g u}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g uv}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_g \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial p_g}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_g v}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_g \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p_g}{\partial y}, \quad (4)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

уравнение энергии

$$c_p \left(\frac{\partial \rho_g T_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u T_g}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v T_g}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right), \quad (6)$$

уравнение состояния

$$p_g = \rho_g R T_g, \quad (7)$$

уравнение теплопроводности

$$c_s \frac{\partial \rho_s T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right). \quad (8)$$

Начальные условия ($t=0$):

$$0 \leq x \leq L_g, 0 \leq y \leq H, u(x, y, t) = 0, v(x, y, t) = 0, T_g(x, y, t) = T_e = \text{const}; \quad (9)$$

$$L_g < x \leq L_s, 0 \leq y \leq H, T_s(x, y, t) = T_e = \text{const}; \quad (10)$$

$$0 \leq y \leq H, \xi(y, t) = L_g; \quad (11)$$

$$L_g \leq y \leq L_s, \eta(x, t) = 0. \quad (12)$$

Граничные условия:

$$x = 0, 0 \leq y \leq l_g, u(x, y, t) = U_3 = \text{const}, v(x, y, t) = 0, T_g(x, y, t) = T_3; \quad (13)$$

$$x = 0, l_g \leq y \leq H, \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial x} = 0, v(x, y, t) = 0, \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial x} = 0; \quad (14)$$

$$0 < x < L_g, y = H, \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial y} = 0, u(x, y, t) = 0, \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial y} = 0; \quad (15)$$

$$0 < x < \xi(y, t), y = 0, \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial y} = 0, v(x, y, t) = 0, \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial y} = 0; \quad (16)$$

$$0 < y < H, x = \xi(y, t), u(x, y, t) = \frac{\partial \xi(y, t)}{\partial t}, v(x, y, t) = \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t}; \quad (17)$$

$$\lambda_s(T_s) \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{x=\xi+0} = \lambda_g(T_g) \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{x=\xi-0} - c_s(T_s) \rho_s V_n(x, y, t) \times [T_s(x, y, t) \Big|_{x=\xi+0} - T_g(x, y, t)],$$

$$T_s(x, y, t) \Big|_{x=\xi+0} = T_g(x, y, t) \Big|_{x=\xi-0}; \quad (18)$$

$$\xi(y, t) \leq x \leq L_s, y = 0, \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial y} = 0; \quad (19)$$

$$L_g \leq x \leq L_s, y = H, \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial y} = 0; \quad (20)$$

$$x = L_s, 0 \leq y \leq H, \frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial x} = 0; \quad (21)$$

Эффективные теплофизические характеристики и коэффициент динамической вязкости гетерогенной струи определялись через объемные доли компонент газовой и

дисперсной фаз. В тонком приповерхностном слое эти характеристики определялись через коэффициент перекрытия K_p [6].

В математической модели (1) – (21) приняты следующие обозначения: x, y – пространственные координаты; t – время; $u(x, y, t), v(x, y, t)$ – компоненты вектора скорости U ; $T(x, y, t)$ – температура; ρ – плотность; c – коэффициент удельной теплоемкости; λ – коэффициент теплопроводности; μ – коэффициент динамической вязкости; R – универсальная газовая постоянная; $\xi(y, t), \eta(x, t)$ – текущие координаты поверхности пластины, определяемые из условия (1) (где $\eta(x, t)$ – функция, обратная к $\xi(y, t)$); V_n – линейная нормальная скорость уноса массы пластины из контрольного объема вследствие термомеханического разрушения; $\rho_s V_n$ – суммарная массовая скорость уноса материала пластины из контрольного объема; $p(x, y, t)$ – давление. Индексы "g", "s", "p" относятся к характеристикам струи, пластины и частиц соответственно.

Для численного решения поставленной задачи использовался метод контрольных объемов [5, 7]. Одним из важных свойств метода контрольных объемов является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса и количество движения на любой группе контрольных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Это свойство проявляется при любом числе узловых точек, а не только в предельном случае очень большого их числа. Таким образом, даже решение на грубой сетке удовлетворяет точным интегральным балансовым соотношениям при разумном выборе сеточных параметров [7].

Система дифференциальных уравнений (3) – (6), (8) аппроксимировалась неявной пятиточечной схемой. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема против потока. Диффузионные члены аппроксимировались центральной схемой второго порядка. Системы линейных алгебраических уравнений решались методом пятиточечной прогонки. Для расчета поля течения использовалась процедура PISO [7].

Метод и алгоритм численного решения тестировались на последовательности сгущающихся сеток. Численные исследования проводились при сеточных параметрах, дальнейшее уменьшение которых не приводило к заметным отклонениям результатов вычислений. Результаты численного решения сравнивались с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными: истечение щелевой струи в безграничное пространство [8], продольное обтекание пластины высокотемпературной вязкой гомогенной струей [8], теплообмен при натекании холодной струи вязкого газа по нормали к поверхности горячей пластины [9], теплообмен между вязкой высокотемпературной струей и пластиной, расположенной нормально к потоку [10].

Численное исследование процесса термомеханического разрушения бетонной пластины при взаимодействии с вязкой сжимаемой газовой струей, содержащей металлические частицы, проведено при значениях параметров, соответствующих условиям экспериментов [11 – 13] при режимах перфорации и резки. Скорость и температура в начальном сечении струи: $U_s = 750$ м/с, $T_s = 3000$ К. Характеристики газа, материала частиц и внешней среды: $\mu_g = 9,2 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с, $c_g = 1,3$ кДж/кг·град, $\lambda_g = 0,18$ Вт/м·град, $\rho_g = 0,41$ кг/м³; $c_s = 0,84$ кДж/кг·град, $\lambda_s = 1,51$ Вт/м·град, $\rho_s = 2400$ кг/м³; $\rho_p = 7980$ кг/м³, $d_p = 10 \div 100$ мкм; $\mu_e = 1 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с, $c_e = 1,2$ кДж/кг·град, $\lambda_e = 0,17$ Вт/м·град, $\rho_e = 1,2$ кг/м³. Геометрические характеристики: $H = 0,1$ м; $L_s = 0,1$ м; $l_g = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $L_g = 0,05$ м.

Температурная зависимость предела прочности $\sigma_{пр}(T)$ бетона аппроксимирована би-сплайном [14] по данным [15] и приведена на рис. 2. Представленная зависимость соответствует изменению $\sigma_{пр}(T)$ для большинства бетонов (железобетон, бетон на гравии или щебне из природного камня и т. д.) [15].

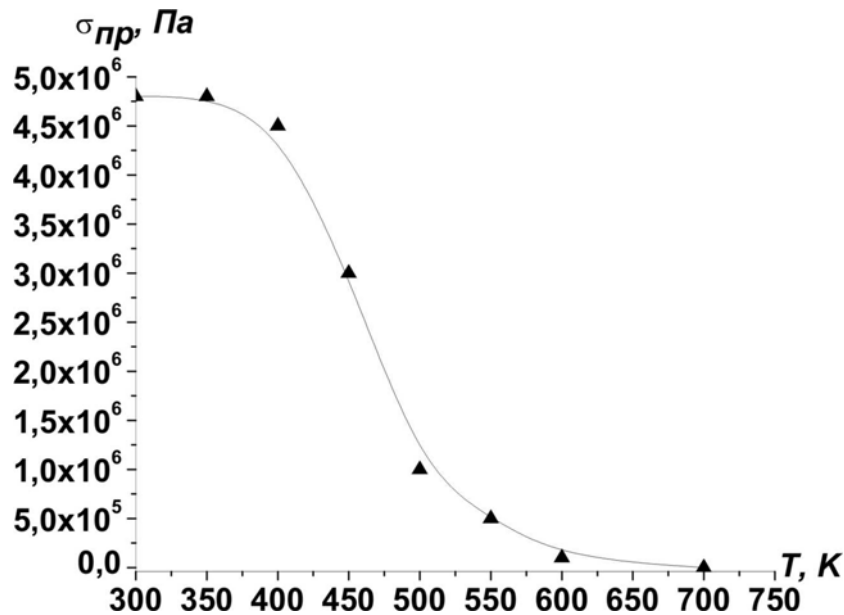


Рис. 2. Зависимость предела прочности бетона от температуры: точки – данные [15]; сплошная линия – аппроксимирующая зависимость

Анализ приведенной зависимости свидетельствует о том, что бетон достаточно прочен при относительно невысоких температурах – до 400 К. Интенсивное снижение предела прочности бетона наблюдается при температурах 450 ÷ 500 К, и при температурах, близких к 700 К, предел прочности заметно стремится к нулю. При воздействии холодной гетерогенной струи на бетон при идентичных скоростях и давлениях разрушение его поверхности незначительно [16], возможно появление микротрещин, локальных повреждений, микросколов и т.д. Установлено, что сновной вклад в значение касательных напряжений трения на поверхности бетона вносят частицы металла [5]. Высокотемпературная струя, воздействуя на материал пластины, разогревает бетон до температуры, при которой предел прочности становится равным касательным напряжениям трения потока. В результате бетон разрушается. На основании численных исследований установлено [17], что металлические частицы диаметром $d_p = 10 \div 100$ мкм достигают поверхности, взаимодействуя с ней в режиме трения-скольжения, причем протяженность области взаимодействия частиц соизмерима с шириной начального сечения струи. При численной реализации математической модели эффективные характеристики гетерогенной струи рассчитывались при объемной доле частиц $\varphi_p \approx 10^{-3}$, за исключением приповерхностного слоя. На поверхности пластины концентрация частиц определялась через коэффициент перекрытия [6].

По результатам численных исследований установлено, что размер зоны наибольшего прогрева пластины в продольном направлении соизмерим с характерным поперечным размером струи, и поперечный размер образующегося кратера равен ширине начального сечения струи [5, 17]. Анализ полученных полей температуры и скорости в различные моменты времени при продвижении фронта разрушения показал, что значения температуры и скорости струи вблизи поверхности изменяются со временем незначительно. Следовательно, остаются неизменными величины теплового потока и концентрации частиц на поверхности, а, значит, и значения касательных напряжений трения. Поэтому приведенная на рис. 3 зависимость значений касательных напряжений трения на поверхности пластины не изменяется со временем. Видно, что наибольшие касательные напряжения трения реализуются на поверхности пластины в

узкой приосевой зоне. Сравнение значений $\sigma_{пр}(T)$ (рис. 2) и $\tau_g(y)$ (рис. 3) показало, что при достижении температуры $T > 450$ К на поверхности бетонная пластина разрушается.

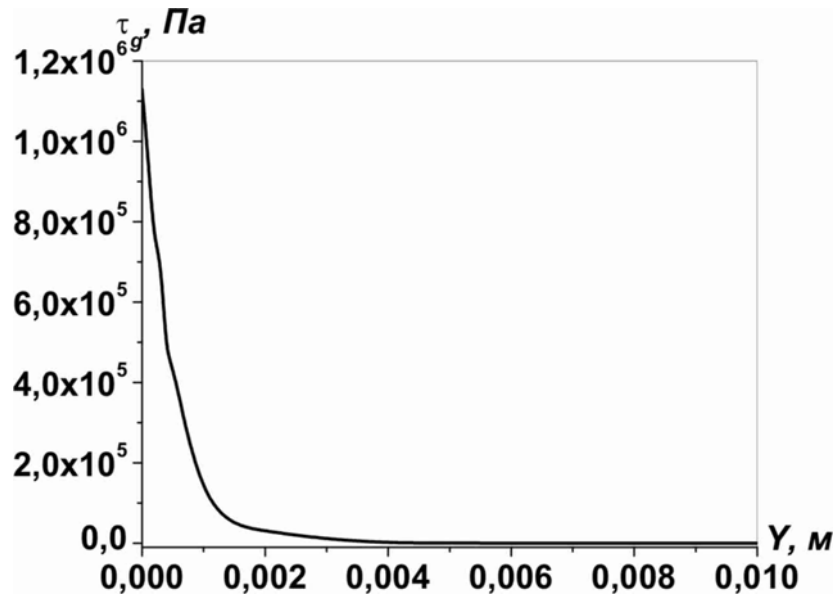


Рис. 3. Касательные напряжения трения на поверхности пластины

На рис. 4, 5 представлены типичные результаты решения сформулированной задачи (1) – (21) в фиксированный момент времени $t = 0,8$ с.

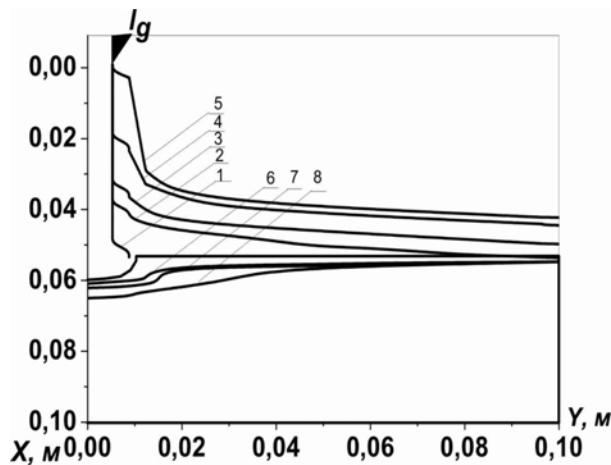


Рис. 4. Изотермы в системе "струя-пластина", $t = 0,8$ с: 1 – $T = 3000$ К; 2 – $T = 2800$ К; 3 – $T = 2500$ К; 4 – $T = 1500$ К; 5 – $T = 1000$ К; 6 – $T = 450$ К; 7 – $T = 400$ К; 8 – $T = 305$ К

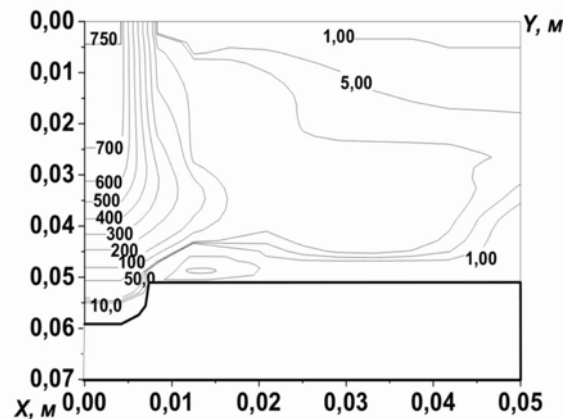


Рис. 5. Изоахи высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей на пластину, при термомеханическом разрушении

Анализ полученных полей температур и скоростей позволил установить некоторые закономерности исследуемого процесса. Прогрев КМ имеет в узкой приповерхностной области, поскольку бетон является низкотеплопроводным материалом. Предел прочности материала в этой области минимален и, следовательно, материал наиболее подвержен разрушению при воздействии высокотемпературной гетерогенной струи. При этом в глубь материала, в направлении нормали к поверхности, тепло распространяется более интенсивно. В поперечном направлении переток тепла незначителен. Следствием этого эффекта является то, что профиль образующегося кратера имеет вид сильно вытянутой параболы, а поперечный размер отверстия на поверхности соизмерим с шириной начального сечения струи.

Сравнение численных и экспериментальных [11] результатов показало, что отличие температуры и скорости разрушения (показание термопары на глубине и численное значение температуры на этой же глубине) составило $\sim 15\%$ и $\sim 8\%$ соответственно. Результаты сравнения представлены на рис. 6. Полученное удовлетворительное соответствие численных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности разработанной математической модели исследуемому процессу.

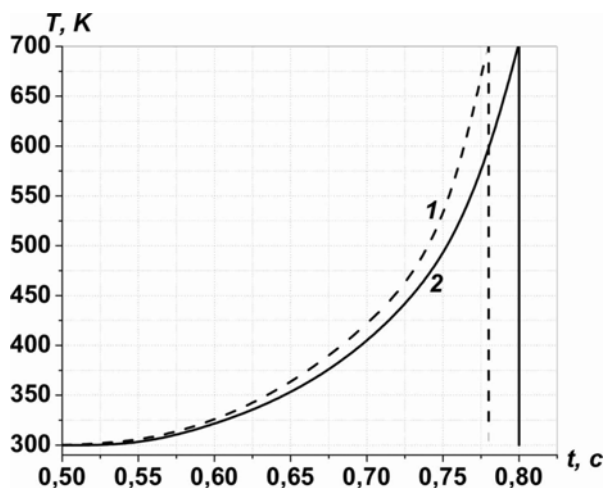


Рис. 6. Распределение во времени температуры материала на глубине 10 мм от нагреваемой поверхности за время $t = 0,8$ с: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет

Отметим ряд достоинств модели (1) – (21).

Так, анализ теплообмена на границе раздела «материал – гетерогенная струя» в сопряженной постановке, с одной стороны, приводит к значительному усложнению математической модели и к необходимости решения системы уравнений Навье-Стокса. С другой стороны, такой подход позволяет исключить из рассмотрения граничные условия третьего рода [18], в которых используется коэффициенты теплоотдачи α от высокотемпературной гетерогенной струи к поверхности пластины. Определение значения α в рассматриваемых условиях является не менее сложной задачей, чем решение системы (1) – (21). Кроме того, при решении задачи в несопряженной постановке для вычисления значений касательных напряжений трения на поверхности конструкционного материала необходимо иметь информацию о полях температуры и скоростей газа и концентрации частиц в пристенном слое. Определение этих характеристик опытным путем затруднительно. Сопряженная постановка задачи позволяет избежать указанных затруднений.

Преимуществом разработанной математической модели является ее автономность. Для использования модели (1) – (21) нет необходимости определять путем специальных экспериментальных исследований какие-либо параметры или характеристики процесса, например, коэффициент теплоотдачи, или напряжения трения на поверхности разрушающегося материала, или скорость частиц металла при взаимодействии с поверхностью.

Математическая модель [5] достаточно просто описывает непосредственно процесс образования кратера в КМ в рамках механизма термомеханического разрушения. Этот механизм реализуется для большинства типичных конструкционных материалов [13]. В данной работе бетон рассматривался в связи с тем, что имеются экспериментальные данные о закономерностях его разрушения под действием высокотемпературной гетерогенной струи. По этим же причинам рассматривались и частицы Ni–Al.

С использованием математической модели (1) – (21) в условиях, соответствующих возможному практическому применению, был проведен выбор параметров технологии перфорации стальной пластины. В качестве устройства перфорации рассматривался твердотопливный генератор гетерогенной струи [11] (см. рис. 7). Ставилась задача выбора технологических параметров для перфорации отверстий диаметром 5 мм в стальных пластинах толщиной h . Температура продуктов сгорания топливной композиции составляла 3000 К; массовая доля частиц дисперсной фазы в продуктах сгорания – 0,3. Основными параметрами, которые необходимы для реализации технологии, являются расстояние L_g от среза сопла газогенератора до перфорируемой пластины и длина заряда топливной композиции (см. схему на рис. 7).

Выбор длины заряда l осуществлялся в зависимости от времени t_k , необходимого для перфорации отверстия на заданную глубину, и определялся по формуле $l = U_{\Gamma} \cdot t_k$, где U_{Γ} – известная скорость горения топливной композиции. Значение t_k определялось из условия $t_k = h / V_p$, где V_p – скорость разрушения металла, которая, в свою очередь, зависит от расстояния L_g , температуры гетерогенной струи и содержания в ней дисперсной фазы.

Задача выбора технологических параметров L_g и l при известных значениях h и U_{Γ} сводится к решению задачи (1) – (21). При проведении расчетов для определенности предполагалось, что скорость гетерогенной струи на выходе из сопла для используемой топливной композиции и диаметра сопла равна 700 м/с.

Предел прочности стали $\sigma_{пр}(T)$ определялся по температурной зависимости [19], аппроксимированной с помощью би-сплайна (рис. 8). Приведенная зависимость показывает, что сталь обладает высокими прочностными качествами при температурах до 800 К, затем ее прочность существенно уменьшается.

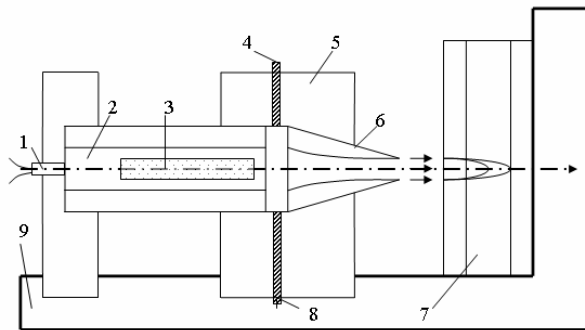


Рис. 7. – Схема устройства [11]: 1 – датчик давления; 2 – камера сгорания; 3 – заряд твердого топлива; 4 – вывод предохранительного клапана сброса избыточного давления; 5 – сопловой блок; 6 – сопло; 7 – перфорируемая пластина; 8 – вывод электрокапсульного воспламенителя; 9 – станина

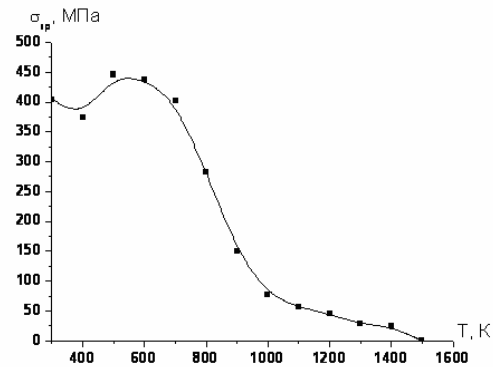


Рис. 8. Зависимость предела прочности стали (сталь-40) от температуры: ■ – данные [19]; – - аппроксимационная зависимость

В численных экспериментах варьировалась массовая доля частиц дисперсной фазы в струе, $C_p = 0,06 \div 0,3$, и расстояние от среза сопла до пластины, $L_g = (1 \div 5) \cdot 10^{-1}$ м. В качестве дисперсной фазы рассматривались частицы технологического порошка Ni–Al, $d_p = 40 \div 60$ мкм. Рассматриваемые условия отвечают ранее определенному диапазону параметров, обеспечивающих взаимодействие частиц дисперсной фазы с поверхностью

пластины. Скорость разрушения металла определялась при различных расстояниях L_g . Установлено, что при $L_g = 0,2$ м за время $t_k = 1$ с струя пробивает в стальной пластине отверстие на глубину 10 мм. Увеличение L_g приводит к росту t_k и снижению эффективности работы устройства.

На рис. 9, 10 приведены значения теплового потока, касательных напряжений трения и скоростей газовой потока и частиц на оси струи

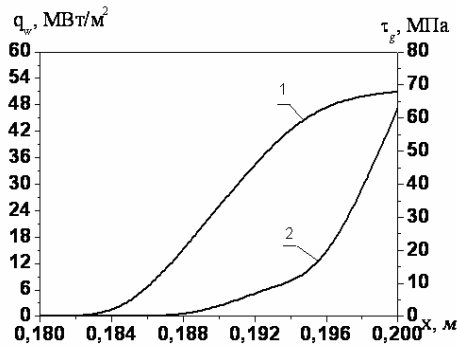


Рис. 9. Распределение плотности теплового потока (1) и значений касательных напряжений трения (2) на оси симметрии струи, $L_g = 0,2$ м

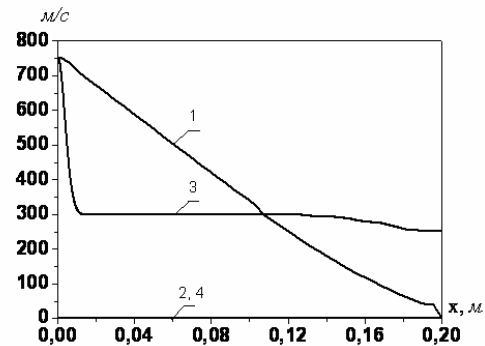


Рис. 10. Распределение продольной и поперечной скоростей газовой потока и частиц на оси симметрии, $L_g = 0,2$ м: 1, 2 – продольная и поперечная скорости газовой потока; 3, 4 – продольная и поперечная скорости частиц

На рис. 11 представлена зависимость глубины перфорированного отверстия, образующегося при различных расстояниях от среза сопла до пластины, $t_k = 1$ с.

Установлено, что, как и можно было предположить, существует некоторое расстояние L_g , при котором достигается максимальная глубина перфорации стальной пластины. Этот результат обусловлен следующими причинами. При малых L_g частицы дисперсной фазы не успевают разогнаться до больших скоростей, соответствующих высоким значениям тепловых потоков q_w и касательных напряжений трения τ_g на обрабатываемой поверхности, а при больших L_g имеет место уменьшение скоростей движения газа и частиц с соответствующим уменьшением q_w , τ_g , V_p и d , вследствие чего эрозионное воздействие частиц на пластину является слабым, а разрушение менее эффективным.

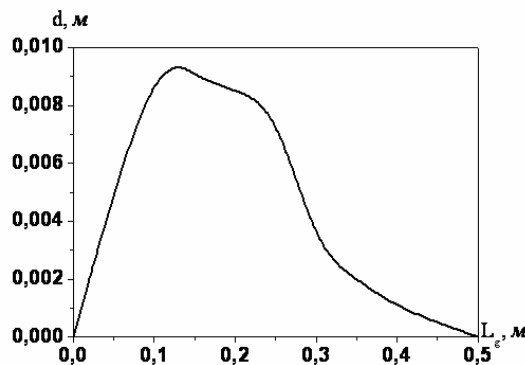


Рис. 14. Глубина перфорированного отверстия в стальной пластине (сталь-40) при различных расстояниях от среза сопла до пластины при $t_k = 1$ с

Полученные результаты являются убедительным примером возможностей математического моделирования сложных физических и химических процессов при обработке материалов [1].

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующее заключение.

В рамках разработанной математической модели (1) – (21) [5] численно исследован конвективно-кондуктивный теплоперенос при термомеханическом разрушении КМ. Полученные результаты характеризуют температурное поле в КМ и скорость его разрушения в рассмотренных условиях.

На основании численного моделирования и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными сделан вывод о том, что разработанная математическая модель сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по направлению нормали к поверхности пластины, является адекватной исследуемому процессу. Использование сопряженной математической модели (1) – (21) конвективно-кондуктивного теплопереноса для описания подобного рода явлений не приводит к достаточно заметным отклонениям по значениям основных параметров (температура и скорость разрушения пластины), которые характеризуют исследуемый процесс.

Литература

- [1] Углов В.В., Анищук В.М., Стальмошенок Е.К. Поверхностная обработка инструментальных сталей плазменными потоками квазистационарного ускорителя // Физика и химия обработки материалов. 2004. – № 6. – С. 44 – 49.
- [2] Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищук В.М., и др. Структура и состав покрытий сформированных при обработке материалов компрессионными плазменными потоками // Физика и химия обработки материалов. 2005. – № 4. – С. 28 – 32.
- [3] Стернин Л.Е., Маслов Б.Н., Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.М. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1980. 172 с.
- [4] Соу С. Гидродинамика многофазных течений. М, «Мир», 1971, 536 с.
- [5] Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Термомеханическое разрушение бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 61 – 68.
- [6] Полежаев Ю.В., Шишков А.А. Газодинамические испытания тепловой защиты: Справочник. – М.: Промедэк, 1992. 248 с.
- [7] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [8] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
- [9] Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольфштейн М. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. / Под ред. А.Г. Тирского. М.: Мир, 1972. 323 с.
- [10] Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
- [11] Абалтусов В.Е., Жарова И.К., Кузнецов Г.В. и др. Экспериментальное определение основных характеристик тепломассообмена при теплоэрозионном разрушении материала // ПМТФ, 2000. Т. 41, №2. С. 138 – 143.
- [12] Абалтусов В.Е., Алексеенко Н.Н., Дементьев В.Ф., и др. Экспериментальное исследование термохимического и эрозионного разрушения материалов при взаимодействии с высокотемпературными гетерогенными потоками // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 1. С. 59 – 63.

- [13] Абалтусов В.Е., Кузнецов Г.В., Немова Т.Н. Механизм высокотемпературного разрушения металлов под действием гетерогенной струи с высокой концентрацией частиц// ТВТ, 1999. Т. 37, № 3. С. 438 – 444.
- [14] Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 582 с.
- [15] Макагонов В.А. Бетон в условиях высокотемпературного нагрева. – М.: Стройиздат. 1979. – 84 с.
- [16] Эрозия. Под ред. К Прис. М.: Мир, 1982, 464 с.
- [17] Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Условия взаимодействия частиц конденсированной фазы с поверхностью при натекании гетерогенного потока. Известия Томского политехнического университета. 2005. – т. 308. – № 5. – С. 96 –100.
- [18] Кузнецов Г.В., Световец Е.В. Моделирование процесса локального разрушения бетона высокотемпературной гетерогенной струей, содержащей частицы конденсированной фазы // Физика и химия обработки материалов. 1999, № 3, С. 30 – 34.
- [19] Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1964. 333 с.