

6. Нестеренко В. Ф. Гетерогенный разогрев пористых материалов при ударно-волновом деформировании и критерии образования прочных компактов // Высокоэнергетическое воздействие на материалы: Сб. тр. Междунар. конф. (HERF-86), Новосибирск, авг. 1986. — Новосибирск, 1986.
7. Prümmer R. Explosive compaction of amorphous alloys // Междунар. семинар по высокоэнергетической обработке быстроокаленных материалов (HERAPS-88), Новосибирск, окт. 1988: Сб. тр. — Новосибирск, 1989.
8. Краношин В. С. Обработка поверхности металлических материалов лазерным излучением // Поверхность. — 1982. — № 3.
9. Vollert V., Crosst M. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 1981. — V. 24. — P. 545.
10. Курко В. И., Пак Н. И., Попов Е. Г. Исследование процесса уноса вещества с поверхности при воздействии отраженной ударной волны // ПМТФ. — 1985. — № 4.

г. Красноярск

Поступила 31/1 1989 г.,  
в окончательном варианте — 5/II 1990 г.

УДК 517.947

Н. И. Пак, С. А. Шижунов

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ЭНЕРГИИ

Из современных способов удаления заусенцев с металлических изделий одним из наиболее перспективных является термическая зачистка [1]. Термическое удаление заусенцев с обрабатываемых заготовок производят в камере посредством сжигания газокислородной смеси, обеспечивающей локальный разогрев заусенцев до их расплавления или сгорания. Другой метод термического удаления основан на использовании концентрированных потоков энергии, в частности лазерного луча, приводящего к оплавлению и испарению заусенцев [2]. Режимы обработки деталей определяются в большинстве случаев экспериментально [3].

Цель данной работы — численное исследование процесса удаления заусенца с поверхности стенки при воздействии концентрированных потоков энергии за счет оплавления и испарения. Определение закономерностей удаления при вариации различных параметров позволяет построить методики выбора режимов термической обработки и оптимизировать известные технологии.

Термическое воздействие на вещество мощным кратковременным тепловым потоком в настоящее время можно осуществить с помощью лазерных установок, взрывных источников плазмы, высокоэнтальпийных газовых струй и т. п. Основными определяющими факторами теплового режима в материалах в подобных процессах являются воздействующий тепловой поток, время его действия и геометрическая форма поверхности. Термическое разрушение вещества обусловлено проплавлением и испарением (процесс сгорания тонких заусенцев в работе не рассматривается), причем в случаях конвективного воздействия имеет место растекание и унос расплава с поверхности. В этой связи важно изучить динамику плавления и испарения, законы движения фазовых границ, оценить степень прогревания изделия в окрестности заусенцев.

Рассмотрим воздействие однородного по пространству и времени теплового потока  $Q$  на поверхность заготовки с находящимся на ней заусенцем (рис. 1). Геометрическая форма заусенца для определенности выбрана в виде равнобедренного треугольника. Поскольку размеры заусенцев, как правило, намного меньше размеров изделия, то достаточно рассмотреть конечную область  $\Omega(t)$ , изменяющуюся со временем за счет возможного движения внешней границы  $\omega$  при проплавлении и испарении.

Оценить температурное поле в области  $\Omega(t)$  можно по математической модели Стефана в двумерной постановке с учетом особенностей фазовых превращений на поверхности стенки:

$$(1) \quad cp\partial T/\partial t = \lambda(\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2), \quad (x, y) \in \Omega(t), \quad t > 0;$$

$$(2) \quad pG \frac{d\xi}{dt} = [q]_{\xi}, \quad T|_{(x,y) \in \xi} = T^{**};$$

$$\begin{aligned}
 (3) \quad & pLd\eta/dt = [\mathbf{q}]_{\eta}, T|_{(x,y) \in \eta} = T^*; \\
 (4) \quad & T|_{t=0} = 0, (x, y) \in \Omega(0); \\
 (5) \quad & q|_{(x,y) \in \omega, \xi=0} = Q; \\
 (6) \quad & \partial T / \partial \mathbf{n}|_{(x,y) \in \partial \Omega} = 0.
 \end{aligned}$$

В задаче требуется найти температуру  $T(x, y, t)$ , законы перемещения фазовых границ  $\xi(x, t)$  и  $\eta(x, t)$  по уравнению теплопроводности (1), по условиям Стефана (2), (3) при заданных начальных (4) и граничных (5), (6) условиях. Здесь  $\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T$  — вектор теплового потока;  $G, T^{**}, L, T^*$  — скрытые теплоты и температуры испарения и плавления соответственно;  $\mathbf{n}$  — нормаль к границам области  $\Omega$ . Теплофизические свойства материала стенки (теплоемкость  $c$ , плотность  $\rho$  и теплопроводность  $\lambda$ ) примем постоянными, не зависящими от температуры и координат.

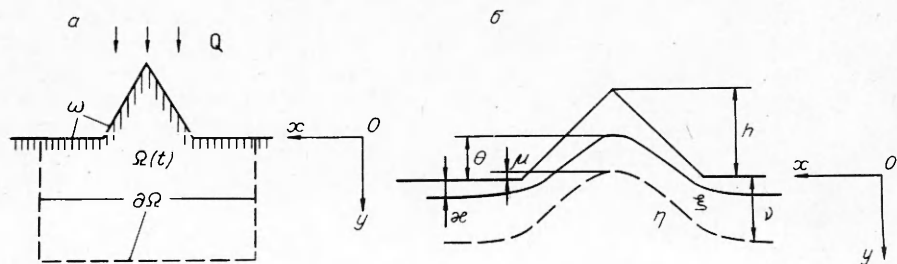
Для решения задачи использовался численный алгоритм, изложенный в [4]. Алгоритм позволяет явно выделять фазовые границы и работает в изменяющейся расчетной области  $\Omega(t)$ , что характерно для данной модели.

Рассмотрим два вида воздействия на заготовку тепловым потоком: при первом (лучевой вид теплообмена) тепловой поток направлен параллельно оси  $Oy$  (рис. 1, а), как, например, при лазерном облучении [2], при втором (конвективный вид теплообмена) тепловой поток направлен перпендикулярно поверхности во всех точках, как в случае воздействия посредством взрывных газовых смесей [5]. Последнее приводит к тому, что участки поверхности равной площади поглощают одинаковое количество энергии.

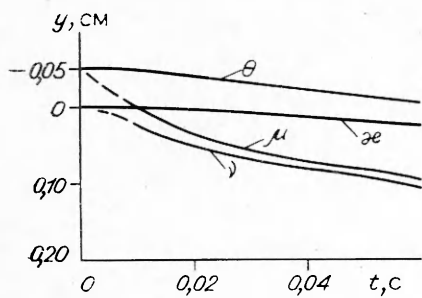
Термическое разрушение заусенца связано с процессом испарения и проплавления с последующим уносом расплава с поверхности стенки или его растекания за счет касательных напряжений и сил поверхностного натяжения. При этом имеет важное значение сохранение формы заготовки, что может быть обеспечено условиями воздействия теплового потока и существенно зависит от геометрии заусенца.

На рис. 1, б показаны характерные профили поверхности стенки-фронта испарения  $\xi$  (сплошная линия) и границы проплавления  $\eta$  (штриховая). Небольшие по величине тепловые потоки ( $Q \leq 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>) вызывают прогревание детали на значительную глубину и приводят к практически равномерному нагреву всей поверхности, что исключает влияние на процесс геометрической формы поверхности. В случае мощных потоков ( $Q \geq 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>) происходит быстрый нагрев тонкого слоя стенки и заусенца до температур плавления и кипения, что определяет одновременное плавление и испарение как заусенца, так и стенки. В этой связи при численном моделировании можно ограничиться интервалом значений  $Q \in [0,5Q_0; 5Q_0]$ , где  $Q_0 = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

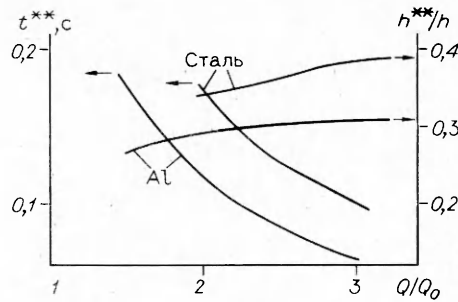
Для анализа теплового процесса введем количественные характеристики (рис. 1, б):  $h$  — начальная высота заусенца (в расчетах принято  $h = 0,05$  см при ширине основания заусенца — 0,1 см),  $\kappa$  — глубина эрозии стенки испарением,  $\theta$  — остаточная высота заусенца,  $\mu$  — размер нерасплавленной части заусенца,  $\nu$  — глубина проплавления стенки. На



Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

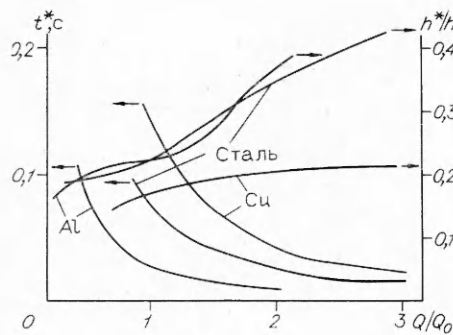
рис. 2 представлены зависимости изменения этих параметров от времени при лучевом виде воздействия теплового потока  $Q = 5Q_0$  на стальную заготовку. Теплофизические параметры стали в расчетах выбирались следующими:  $\rho = 7,8$  г/см,  $c = 0,45$  кДж/(кг · град),  $\lambda = 74,4$  Вт/(м · град),  $L = 293$  кДж/кг,  $T^* = 1530$  °С,  $G = 6300$  кДж/кг,  $T^{**} = 3050$  °С.

Расчеты показали, что испарение стенки начинается чуть позже начала испарения заусенца. Зависимость  $\theta$  и  $\xi$  от  $t$  практически линейна. Скорость эрозии заусенца  $\partial\theta/\partial t$  незначительно больше скорости эрозии стенки  $\partial\xi/\partial t$ . На момент полного удаления заусенца ( $\theta = 0$ ) глубина эрозии стенки обычно  $\sim h/2$ , глубина проплавления  $\sim 2h$ , а для алюминиевой ( $\rho = 2,7$  г/см,  $c = 0,88$  кДж/(кг · град),  $\lambda = 209$  Вт/(м · град),  $L = 390$  кДж/кг,  $T^* = 659$  °С,  $G = 9220$  кДж/кг,  $T^{**} = 2300$  °С) или медной ( $\rho = 8,9$  г/см,  $c = 0,39$  кДж/(кг · град),  $\lambda = 389$  Вт/(м · град),  $L = 214$  кДж/кг,  $T^* = 1083$  °С,  $G = 5410$  кДж/кг,  $T^{**} = 2360$  °С) заготовок  $\sim 4h$ , причем фронт плавления имеет спрямленный профиль. Время полного удаления заусенца  $t^{**}$  испарением  $\sim 0,05$  с. Увеличение мощности теплового потока приводит к усилению эрозии стенки, уменьшение — к увеличению глубины проплавления.

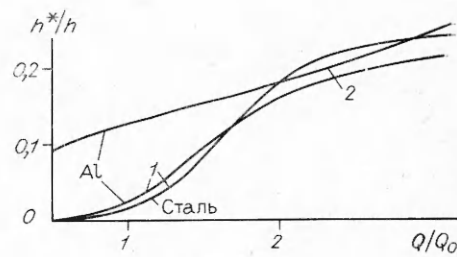
В случае конвективного вида теплового воздействия глубина эрозии стенки  $h^{**}$  на момент времени  $t^{**}$ , когда  $\theta = 0$ , составляет  $\sim h/3$  (рис. 3), а проплавление  $\sim 3h$ . Зависимость  $h^{**}$  от мощности теплового потока слабая.

Уменьшение мощности теплового потока приводит к увеличению времени обработки, что создает условия для удаления заусенца путем растекания расплава. Можно получить верхнюю оценку, рассматривая поведение только фазового фронта плавления, и нижнюю — в предположении, что фазовый переход расплав — твердое тело происходит на внешней поверхности стенки, т. е. в случае мгновенного удаления расплава. На рис. 4 приведены верхняя оценка времени оплавления заусенца до основания  $t^*$  и глубина проплавления стенки на этот момент  $h^*$  в зависимости от интенсивности теплового воздействия лучевого вида. Величина  $h^*$  характеризует нежелательный эффект теплового воздействия на стенку, поскольку определяет возможный унос массы или изменение формы заготовки за счет растекания расплава. Зависимость  $h^*$  от значения теплового потока для различных материалов существенно отличается, но ни для одного из рассмотренных металлов  $h^*$  не достигает нуля. Зависимость времени полного оплавления заусенца до основания от мощности теплового потока характеризуется монотонной резко спадающей кривой.

В случае конвективного воздействия время полного оплавления заусенца  $t^*$  примерно в 1,5 раза меньше, а профили зависимостей  $t^*(Q)$  того же вида, что и для лучевого воздействия. Однако зависимость глубины проплавления стенки  $h^*$  от мощности теплового потока имеет характерные отличия (рис. 5). В среднем  $h^*$  в 4 раза меньше тех же величин при лучевом теплообмене. К тому же верхняя оценка (кривые 1) показывает возможность удаления заусенца практически без расплавления стенки для  $Q < Q_0$ . Нижняя оценка  $h^*$  (кривая 2) оказалась несколько выше верхней и обнаружила практически линейную зависимость от мощности



Р и с. 4



Р и с. 5

теплового потока. Инверсия верхних и нижних оценок также справедлива для времен полного оплавления заусенца  $t^*$  и времен начала плавления стенки. Высота нерасплавившейся части заусенца в момент времени начала плавления стенки для алюминия (в сравнении с лучевым теплообменом) в 2 раза ниже и для потоков  $Q < 1,5Q_0$  может быть оценена как  $0,2h$ .

Наблюдающийся в данном случае характер верхних и нижних оценок можно объяснить следующим образом. Условие перпендикулярности вектора внешнего теплового потока к поверхности тела создает наиболее интенсивный режим нагревания выступающих частей (типа заусенца). Верхняя оценка предполагает сохранение формы расплавленного заусенца, следовательно, постоянно реализуется оптимальный режим нагревания в течение всего процесса воздействия. В свою очередь, способ получения нижней оценки определяет совпадение фронта плавления с внешней границей заусенца, что приводит к выглаживанию поверхности и выравниванию условий нагревания всех частей стенки.

Были проведены расчеты для воздействия фиксированного теплового потока  $Q = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> на алюминиевую стенку с заусенцами различной высоты и при разной начальной температуре. Ширина основания заусенца остается равной 0,1 см. Увеличение высоты  $h$  в 4 раза (от 0,025 до 0,1 см) приводит к росту  $t^*$  и  $h^*$  в  $\sim 1,5$  раза,  $h^{**}$  в 3 раза, увеличение начальной температуры от 0 °С до  $2/3T^*$  — к уменьшению  $t^*$  в 3 раза и увеличению  $h^*$  и  $h^{**}$  в 2 раза. Причем в обоих случаях  $h^*$  возрастает довольно значительно.

Проведенный численный анализ позволил заключить следующее. Удаление заусенца испарением невозможно ни одним из рассмотренных способов ввиду либо значительной эрозии стенки при полном удалении заусенца, либо недостаточного для практики уменьшения размера заусенца на момент начала испарения стенки. Технологически возможен способ разрушения заусенца посредством расплавления.

Для способа, связанного с мгновенным удалением образующегося расплава с поверхности, показана возможность подбора режимов теплового воздействия, в которых достигается минимальная глубина проплавления стенки при полном расплавлении заусенца. Более технологичен конвективный способ воздействия теплового потока.

Авторы выражают благодарность В. И. Кирко за полезное обсуждение результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Przyklenk K., Schlatter M. Vergleich und Einsatzbedingungen von Entgratvenfohren // Industrie-Anzeiger. — 1985. — Bd 107, N 14.
2. Delle Piane A. A laser robot for cutting and trimming deeply stamped metal sheets // ISATA 84: Int. Symp. Automat. Technol. and Autom., Milan, 1984: Proc. — Croudon, 1984. — V. 2.
3. Warmeschockentgraten von kleinteilen aus Metall und Plast // Fertigungstechnik und Betrieb. — 1985. — Bd 35, N 1.
4. Пак Н. И., Шикунов С. А. Численное решение двумерной задачи Стефана в энтальной формулировке в изменяющейся области на подвижных сетках. — Красноярск, 1989. — (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние, ВЦ; № 14).

5. Гаек А. В., Попов Е. Г., Попова Н. В. Термическое действие газового взрыва на металлы // Физика и химия обработки материалов. — 1986. — № 4.

г. Красноярск

Поступила 27/X 1989 г.,  
в окончательном варианте — 23/III 1990 г.

УДК 536.24

А. М. Гришин, А. Н. Голованов, А. С. Якимов

## СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Математическому моделированию процессов тепло- и массопереноса в составном композиционном материале (КМ) посвящено ограниченное число работ [1, 2]. Если в [1] рассмотрен режим термохимического разрушения под действием заданного теплового потока в многослойном КМ на боковой части тела вращения, то в [2] уже решается задача о взаимодействии высокоэнтальпийного потока с комбинированным КМ в сопряженной постановке от начала пористого тела вращения до семи калибров по обводу непроницаемого конуса. Однако математическая модель тепло- и массообмена (ТМО) в [2] записана без учета перетекания тепла между конусом и пористым телом (рис. 1). Кроме того, результаты расчетов в [2] для пористой части тела получены в одностепенном приближении. В то же время известно [3], что в общем случае в газопроницаемых средах температура газа и температура конденсированной фазы (к-фазы) различаются.

В [4—6] приводится обширная библиография работ, в которых исследовано температурное состояние систем пористого охлаждения [7—9]. Однако, как справедливо отмечено в [4], полученные результаты не сопоставимы из-за значительного произвола или недостаточной корректности в формулировке граничных условий. В отечественной и зарубежной литературе [4, 7, 9], посвященной математическому моделированию процессов ТМО в двухтемпературной среде, в уравнении сохранения энергии для газовой фазы при расчете поля температур, как правило, не учитывают перенос тепла кондукцией. В то же время при учете последнего в [8] предполагается, что весь тепловой поток на внешней границе раздела сред падает на поверхность каркаса (как для одностепенной среды), а для газа выставляются мягкое граничное условие  $(\partial^2 T_2 / \partial n^2)|_{n=0} = 0$  или условие тепловой изоляции. Изучение характеристик ТМО для двух типов газопроницаемых сред показало [10], что балансовые (имеющие смысл законов сохранения) граничные условия инвариантны относительно теплофизических свойств двухтемпературной пористой среды. Отметим, что в [10] получены пределы применимости мягких граничных условий.

Цель данной работы — изучение в рамках двухтемпературной модели пористой инертной среды внутреннего механизма ТМО для оболочки, составленной из разных материалов. В результате математических экспериментов показано, что необходимо: учитывать двухтемпературность пористой среды; использовать материалы, имеющие структурные характеристики, обеспечивающие максимальное значение коэффициента межфазного теплообмена; в качестве теплового экрана брать конструктивным элементом металлокерамику.

**1. Постановка задачи.** Для упрощения анализа будем считать, что: среда двухтемпературна, т. е. газовая и к-фаза имеют различные температуры; величина потока массы по нормали к обтекаемой поверхности тела значительно больше, чем по образующей этой поверхности; тело при взаимодействии с потоком газа не разрушается, а внутри и на его поверхности отсутствуют гетерогенные и гомогенные химические реакции и фазовые переходы; плотность газовой фазы определяется из уравнения состояния идеального газа; состав вдуваемого газа и в набегающем внешнем потоке одинаков; тепловой поток на внешней нагреваемой стороне конической части тела задавался таким образом, чтобы температура поверхности конуса к моменту окончания теплового воздействия ( $t = t_0$ ) была меньше температуры плавления данного материала.

Расход газа-охлаждителя будем определять из совместного решения стационарного уравнения неразрывности и нелинейного закона Дарси [5, 6, 8]. Дело в том, что при больших массовых скоростях  $(\rho v)_w$  ( $Re > 10$ ) наблюдается турбулентный режим фильтрации [6], который характеризуется квадратичной зависимостью перепада давления от скорости.