

## ЛИТЕРАТУРА

1. Альбом течений жидкости и газа/Сост. Ван-Дейк.— М.: Мир, 1986.
2. Садовский М. А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР.— 1979.— Т. 247, № 4.
3. Аннин Б. Д., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Механика деформированного твердого тела в СО АН СССР // ПМТФ.— 1987.— № 4.
4. Пригожин И. От существенного к возникающему.— М.: Наука, 1985.
5. Ревуженко А. Ф. О самых простых течениях сплошной среды // ДАН СССР.— 1988.— Т. 303, № 1.
6. Думанский А. В., Ишлинский А. Ю. О закономерностях растрескивания коры деревьев // ДАН СССР.— 1952.— Т. 84, № 1.
7. Крамаренко В. П., Ревуженко А. Ф. О формировании блочной структуры при сдвиге сыпучей среды // ФТПРПИ.— 1988.— № 2.
8. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. Об одном методе испытания неупругих материалов // Изв. АН СССР. МТТ.— 1990.— № 4.
9. Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф. О временных структурах в процессах деформирования сыпучей среды // ФТПРПИ.— 1990.— № 2.
10. А. с. 1352302 СССР. Способы испытания на склонность к слеживаемости сыпучих материалов/А. Ф. Ревуженко, А. П. Бобряков, В. Н. Пронин // Открытия. Изобретения.— 1987.— № 42.

г. Новосибирск

Поступила 4/XII 1991 г.

УДК 621.762

*Л. Р. Вишняков, С. Е. Александров, Л. И. Феодосьева*

### ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ МАТРИЦЫ И АРМИРУЮЩЕЙ СЕТКИ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

При уплотнении армированных сетками композиционных материалов (КМ) с порошковой металлической матрицей методами прессования или прокатки следует учитывать способность ряда сетчатых структур подвергаться большим деформациям. В частности, способностью к большим деформациям обладают металлотрикотажные сетки со структурой трикотажа [1]. В процессе совместной деформации порошковой матрицы и таких сеток последние проявляют определенную податливость, особенно на ранних стадиях уплотнения. В связи с этим представляется интересным выяснить влияние введения сетки на энергосиловые параметры процессов и в конечном итоге на макрогеометрию КМ и его свойства. Важно также уметь определять деформацию и усилие в сетке в процессе деформирования.

Анализ некоторых технологических процессов обработки давлением рассматриваемых КМ был проведен в [2], где условия на границах представительного элемента, по напряженно-деформированному состоянию в котором определялись поля напряжений, скоростей и плотности во всем обрабатываемом объеме, накладывают жесткие ограничения на схемы технологических процессов, которые могут быть описаны с помощью этой модели. В частности, напряженно-деформированное состояние, а следовательно, и плотность должны быть макрооднородными, а неоднородность имеет место только внутри представительного элемента.

**1. Общие положения.** В настоящей работе предлагается математическая модель КМ, которая по свойствам матрицы и армирующей сетки позволяет строить решения любых краевых задач методами механики сплошной среды, примененными ко всему деформируемому объему. При известном механизме взаимодействия матрицы и однонаправленных армирующих элементов предлагаемый подход может быть использован для описания процессов деформирования композитов с другими видами арма-

туры. Исследуется совместное течение порошковой матрицы и трикотажной металлической сетки в процессах получения листовых КМ, в которых толщина сетки значительно меньше характерного размера очага деформации. Это позволяет пренебречь толщиной сетки, которую можно принять за условный армирующий монослой и при расчетах рассматривать его как поверхность разрыва свойств материала матрицы. Решение соответствующей краевой задачи также будет разрывным.

Поскольку реальная геометрия сетки образует ячеистый каркас, расположенный в некотором объеме армирующего монослоя, создаются условия для непрерывности перемещения монослоя и матричного порошка на границе их контакта. Подобная схема принята в [3] и для сетки тканой структуры.

В дальнейшем ограничимся исследованием ортотропной сетки в условиях плоской деформации ( $\epsilon_z = 0$ ), предполагая, что одно из главных направлений совпадает с осью  $z$ . В этом случае свойства сетки можно определить из одной диаграммы, связывающей относительное удлинение вдоль главного направления, перпендикулярного оси  $z$ , и силу, приложенную вдоль этого направления. Такая диаграмма может быть получена либо экспериментально, либо теоретически [4, 5]. Так как зависимость между усилием и удлинением в общем случае должна включать текущую пористость матрицы, а полный комплекс экспериментов, очевидно, провести затруднительно, на наш взгляд, теоретический путь определения этой зависимости предпочтительнее. Отметим, что диаграмма деформирования сетки имеет сильно выраженный нелинейный характер [4, 5].

Структура трикотажной сетки позволяет считать, что перемещения монослоя и матрицы на поверхности их контакта непрерывны [3]. Этого предположения достаточно для построения определенной системы уравнений, которая состоит из уравнений, описывающих течение матрицы [6], уравнения связи между усилием и удлинением сетки [5] и условия отсутствия разрывов перемещений на линии контакта монослой — матрица. Заметим, что наличие сетки приводит к тому, что в общем случае для любой модели материала матрицы приходится рассматривать конечные деформации.

**2. Исследование процесса экструзии.** В качестве рабочей схемы, описывающей процесс уплотнения армирующего монослоя, исследуем установившийся процесс экструзии вязкой матрицы и армирующего монослоя в условиях плоской деформации (рис. 1). Ввиду симметрии на рис. 1 изображена половина очага деформации. Считается, что поверхности инструмента идеально гладкие, т. е. силами трения на поверхности инструмента можно пренебречь. Течение порошковой матрицы описывается уравнением равновесия, уравнениями закона течения и неразрывности.

Введем цилиндрическую систему координат  $r, \varphi, z$ . Решение будем искать при следующих предположениях: очаг деформации ограничен линиями  $r = r_1, r = r_2$ , скорость  $v_\varphi = 0$ . Это предположение должно хорошо выполняться при малых углах  $\varphi_0$ , так как  $v_\varphi = 0$  на поверхности инструмента и оси симметрии из краевых условий. Остальные величины не зависят от полярного угла  $\varphi$ .

Уравнение равновесия составим по методу Хилла [7]. При сделанных предположениях получим

$$(2.1) \quad \frac{d(r\sigma_r)}{dr} - \sigma_\varphi + \frac{\tau}{\varphi_0} = 0,$$

где  $\sigma_r, \sigma_\varphi$  — нормальные напряжения в матрице;  $\tau$  — касательное напряжение в матрице на условной линии контакта. Уравнения закона те-

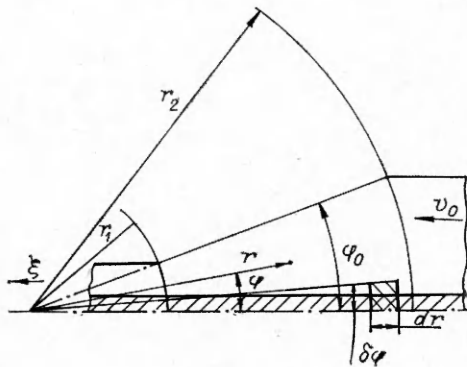


Рис. 1

чения имеют вид [6]

$$(2.2) \quad \sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \left(v - \frac{2\mu}{3}\right)\epsilon\delta_{ij}.$$

Здесь  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений;  $\epsilon_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформации;  $\epsilon$  — удельная скорость изменения объема;  $v$  — объемный коэффициент вязкости;  $\mu$  — сдвиговой коэффициент вязкости;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера. При сделанных предположениях выражения для компонент тензора скоростей деформации запишем в виде  $\epsilon_r = dv/dr$ ,  $\epsilon_\varphi = v/r$ , остальные компоненты равны нулю ( $v = v_r$  — радиальная скорость). Удельная скорость изменения объема  $\epsilon = dv/dr + v/r$ .

Уравнения (2.2) теперь можно представить в форме

$$(2.3) \quad \sigma_r = \left(v + \frac{4}{3}\mu\right)\frac{dv}{dr} + \left(v - \frac{2\mu}{3}\right)\frac{v}{r}, \quad \sigma_\varphi = \left(v - 2\frac{\mu}{3}\right)\frac{dv}{dr} + \left(v + \frac{4\mu}{3}\right)\frac{v}{r}.$$

Уравнение неразрывности в силу установившегося характера течения есть

$$(2.4) \quad \frac{v}{\rho} \frac{d\rho}{dr} + \frac{dv}{dr} + \frac{v}{r} = 0$$

( $\rho$  — относительная плотность).

Связь между усилием  $P$ , растягивающим сетку в направлении оси  $r$ , и ее относительным удлинением из недеформированного состояния  $\Delta$  в общем случае имеет вид  $P = f(\Delta)$ . Эта зависимость, учитывающая конкретную структуру трикотажной сетки и свойства материала проволоки, получена численно, например, в [5]. Она и принята нами в дальнейшем исследовании.

Для рассматриваемой схемы уплотнения (см. рис. 1) относительное удлинение может быть выражено через скорости частиц. Закон движения любой точки армирующего слоя определяется уравнением  $r = r(a, t)$  ( $a$  — лагранжева координата точки,  $t$  — время). Тогда относительное удлинение

$$(2.5) \quad \Delta = \partial r / \partial a - 1.$$

Из условия непрерывности скорости на линии контакта вытекает

$$dr/dt = v(r),$$

откуда закон движения точки может быть определен из уравнения

$$F = \int_a^r \frac{dz}{v(z)} - t = 0.$$

После дифференцирования этого выражения получим

$$\frac{\partial r}{\partial a} - \frac{(\partial F / \partial a)}{(\partial F / \partial r)} = \frac{v(r)}{v(a)}.$$

Тогда из уравнения (2.5) следует

$$(2.6) \quad \Delta = v(r)/v(a) - 1,$$

где  $v(a)$  — скорость на входе в очаг деформации (предполагается, что до этого сетка находилась в недеформированном состоянии);  $v(r)$  — скорость точки в данном месте очага деформации.

С учетом (2.6) зависимость между усилием в сетке и скоростью частиц представим в виде

$$(2.7) \quad P = f\left[\frac{v(r)}{v(a)} - 1\right].$$

Определим связь между напряженным состоянием сетки и матрицы. Уравнение виртуальных мощностей для любого элемента  $dr$  вблизи оси

симметрии (см. рис. 1) при сделанных предположениях имеет вид

$$\int_r^{r+dr} \int_0^{\delta\varphi} (\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_\varphi \varepsilon_\varphi) r d\varphi dr = - \int_r^{r+dr} \tau v dr - \int_0^{\delta\varphi} \sigma_r r v(r) d\varphi + \\ + \int_0^{\delta\varphi} (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) v(r + dr) d\varphi.$$

Устремляя  $\delta\varphi$  к нулю, получим

$$(2.8) \quad \int_r^{r+dr} P \varepsilon_r dr = - \int_r^{r+dr} \tau v dr - P(r) v(r) + P(r + dr) v(r + dr) \\ \left( P = \int_0^{\delta\varphi} \sigma_r r d\varphi \right).$$

Произведем в левой части уравнения (2.8) интегрирование по частям:

$$P v \Big|_r^{r+dr} - \int_r^{r+dr} \frac{dP}{dr} v dr = - \int_r^{r+dr} \tau v dr - P(r) v(r) + P(r + dr) v(r + dr).$$

Отсюда ввиду произвольности  $v$  и интервала интегрирования по  $r$  находим

$$(2.9) \quad \frac{dP}{dr} - \tau = 0.$$

Таким образом, имеем систему уравнений (2.1), (2.3), (2.4), (2.7), (2.9) относительно неизвестных  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$ ,  $\tau$ ,  $v$ ,  $\rho$ ,  $P$  с краевыми условиями  $v = -v_0$ ,  $\rho = \rho_0$  при  $r = r_2$  и  $P + \sigma_r r_1 \varphi_0 = 0$  при  $r = r_1$ . Уравнение неразрывности (2.4) имеет интеграл  $\rho v r = -\rho_0 v_0 r_2 = c$ , откуда находим

$$(2.10) \quad \rho = c/(vr).$$

Подставляя (2.7) в (2.9), выразим  $\tau$  через скорость  $v$ :

$$(2.11) \quad \tau = \frac{1}{v_0} \frac{df}{d\Delta} \frac{dv}{dr}.$$

Для определения  $v$  из (2.1) с учетом (2.3), (2.10), (2.11) получим дифференциальное уравнение

$$(2.12) \quad r \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) \frac{d^2 v}{dr^2} - \frac{c}{r^2} \left( \frac{dv}{dr} + \frac{4}{3} \frac{d\mu}{dr} \right) \left( \frac{dv}{dr} \right)^2 - \left[ \frac{2c}{rv} \left( \frac{dv}{dr} + \frac{1}{3} \frac{d\mu}{dr} \right) - \right. \\ \left. - v - \frac{4}{3} \mu - \frac{1}{\varphi_0 v_0} \frac{df}{d\Delta} \right] \frac{dv}{dr} - \left( \frac{dv}{dr} - \frac{2}{3} \frac{d\mu}{dr} \right) \frac{c}{r^2} - \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) \frac{v}{r} = 0$$

и краевые условия  $v = -v_0$  при  $r = r_2$  и

$$f \left[ \frac{v(r_1)}{v_0} - 1 \right] + \left[ \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) \frac{dv}{dr} + \left( v - \frac{2\mu}{3} \right) \frac{v}{r_1} \right] r_1 \varphi_0 = 0$$

при  $r = r_1$ . Зависимость  $\mu$  и  $v$  от относительной плотности принимаем в виде [8]

$$(2.13) \quad v = \mu_0 \frac{4}{3} \frac{\rho^3}{(1-\rho)}, \quad \mu = \mu_0 \rho^2.$$

Оценим порядок членов в уравнении (2.12). За характерные значения примем величины:  $v_0$  для скорости,  $r_2$  для длины,  $r/v_0$  для времени,  $\mu_0 r_2/v_0$  для напряжений в матрице,  $P_*$  для усилия в сетке на единицу длины ( $P_*$  — сила, при которой становятся существенными пластические деформации нитей),  $\varepsilon_*$  для деформации сетки ( $\varepsilon_*$  — деформация в сетке при действующей силе  $P = P_*$ ).

Тогда в безразмерных величинах уравнение (2.12) может быть записано так:

$$(2.14) \quad r \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) \frac{d^2 v}{dr^2} - \frac{\rho_0}{v^2} \left( v' + \frac{4}{3} \mu' \right) \left( \frac{dv}{dr} \right)^2 - \left[ \frac{2\rho_0}{rv} \left( v' + \frac{4}{3} \mu' \right) - \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) - \left( \frac{P_*}{\mu_0 \varphi_0 v_0 \varepsilon_*} \right) \frac{1}{v} \frac{dP}{d\Delta} \right] \frac{dv}{dr} - \left( v' - \frac{2}{3} \mu' \right) \frac{v_0}{r^2} - \left( v + \frac{4}{3} \mu \right) \frac{v}{r} = 0,$$

$$v' = \frac{dv}{d\rho}, \quad \mu' = \frac{d\mu}{d\rho}.$$

Для безразмерных величин сохранены прежние обозначения. В выражениях для  $\mu$  и  $v$   $\rho = -\rho_0/(vr)$ .

Из уравнения (2.14) видно, что влияние сетки на распределение скорости частиц, а следовательно, и напряженно-деформированного состояния определяется величиной безразмерного комплекса

$$\delta = \frac{P_*}{\mu_0 \varphi_0 v_0 \varepsilon_*}.$$

Для сетки типа «ластик», изготовленной из стальной и медной проволоки,  $P_* \approx 10^2$  Н/м,  $\varepsilon_* \approx 1$  [5], коэффициент вязкости  $\mu_0 \approx 10^{10}$  Па · с [6], скорость пуансона при выдавливании  $v_0 \approx 10^{-2}$  м/с [9]. Таким образом, для рассматриваемого процесса при  $\varphi_0 \approx 1$  имеем  $\delta \approx 10^{-6}$ . Отсюда видно, что введение податливых металлтрикотажных сеток не оказывает существенного влияния на распределение скоростей и, следовательно, напряженно-деформированного состояния и плотности в матрице. Это позволяет исследовать процессы деформирования матрицы и сетки отдельно: сначала определяются поля всех физических величин из решения задачи о деформировании порошковой матрицы, а затем по определенному полю скоростей с помощью уравнения (2.7) вычисляется усилие в сетке. Отметим, что уравнение (2.14) при отбрасывании члена, обусловленного наличием сетки, значительно упрощается.

Введем обозначение  $u = vr$ . Тогда из (2.14) для определения функции  $u$  получим

$$a_1 r^2 \frac{d^2 u}{dr^2} - \rho_0 a_1' r^2 \left( \frac{du}{dr} \right)^2 - \left( a_1 - \frac{2\rho_0 \mu'}{u} \right) r \frac{du}{dr} = 0,$$

где  $a_1 = v + \frac{4}{3} \mu$ ;  $a_1' = \frac{da_1}{d\rho}$ ;  $\mu = \mu(u)$ ;  $v = v(u)$ . Положив  $z_1 = \ln r$ , а  $u = u(z_1)$ , имеем

$$a_1 \frac{d^2 u}{dz_1^2} - \rho_0 a_1' \left( \frac{du}{dz_1} \right)^2 - 2 \left( a_1 - \frac{\rho_0 \mu'}{u} \right) \frac{du}{dz_1} = 0.$$

Примем за независимую переменную  $u$ , тогда последнее уравнение преобразуется к виду

$$\frac{d^2 z_1}{du^2} + \frac{\rho_0 a_1'}{a_1} \frac{dz_1}{du} + 2 \left( 1 - \frac{\rho_0 \mu'}{a_1 u} \right) \left( \frac{dz_1}{du} \right)^2 = 0.$$

Полагая  $dz_1/du = y$ , приходим к уравнению Риккати

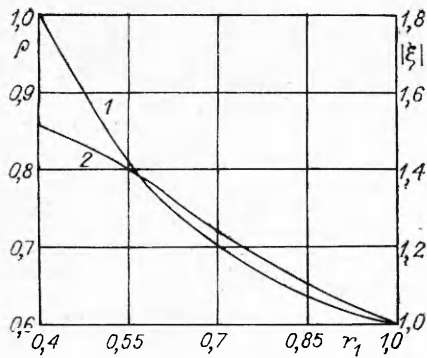
$$\frac{dy}{du} + \frac{\rho_0 a_1'}{a_1} y + 2 \left( 1 - \frac{\rho_0 \mu'}{a_1 u} \right) y^2 = 0,$$

которое подстановкой  $y = x^{-1}$  сводится к линейному

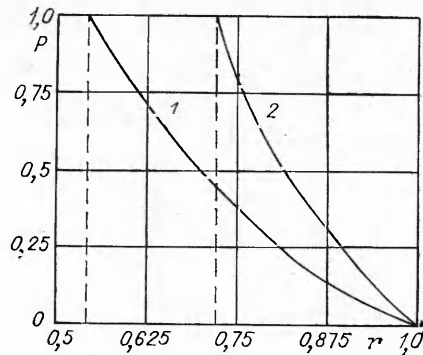
$$(2.15) \quad \frac{dx}{du} - \frac{\rho_0 a_1'}{a_1} x - 2 \left( 1 - \frac{\rho_0 \mu'}{a_1 u} \right) = 0.$$

Для определения  $z_1$  воспользуемся уравнением

$$(2.16) \quad \frac{dz_1}{du} = x^{-1}.$$



Р и с. 2



Р и с. 3

Решение системы (2.15), (2.16) можно записать в квадратурах. Краевые условия имеют вид  $z_1 = 0$  при  $u = -1$  и  $x = (a_1 - b)\xi/a_1$  при  $u = \xi$  ( $\xi$  — значение функции  $u$  на выходе из очага деформации,  $b = v - 2\mu/3$ ).

Решение уравнений (2.15), (2.16) запишем как

$$x = \exp(-F) \left[ \left( \frac{a_1 - b}{a_1} \right) \xi + 2 \int_{\xi}^u \left( 1 - \frac{\rho_0 u'}{a_1 u} \right) \exp(F) du \right],$$

$$F = -\rho_0 \int_{\xi}^u \frac{d(\ln a_1)}{d\rho} du,$$

$$z_1 = \int_{-1}^u \exp(F) \left[ \left( \frac{a_1 - b}{a_1} \right) \xi + 2 \int_{\xi}^u \left( 1 - \frac{\rho_0 u'}{a_1 u} \right) \exp(F) \right]^{-1} du.$$

Величина  $\xi$  находится из уравнения

$$\ln r_1 = \int_{-1}^{\xi} \exp(F) \left[ \left( \frac{a_1 - b}{a_1} \right) \Big|_{u=\xi} \xi + 2 \int_{\xi}^u \left( 1 - \frac{\rho_0 u'}{a_1 u} \right) \exp(F) du \right]^{-1} du.$$

Если  $\mu$  и  $\nu$  определяются выражениями (2.13), то

$$F = \frac{(\xi^2 - u^2)}{2} + \rho_0^2 \ln \left( \frac{\rho_0 - \xi}{\rho_0 - u} \right) + \frac{(\rho_0 + \xi)^2 - (\rho_0 + u)^2}{2},$$

$$\ln r = z_1 = \int_{-1}^u \exp(F) \left[ \frac{3}{2} (\xi - \rho_0) + \int_{\xi}^u \left( \frac{3\rho_0}{u} - 1 \right) \exp(F) du \right]^{-1} du,$$

$$\ln r_1 = \int_{-1}^{\xi} \exp(F) \left[ \frac{3}{2} (\xi - \rho_0) + \int_{\xi}^u \left( \frac{3\rho_0}{u} - 1 \right) \exp(F) du \right]^{-1} du.$$

Результаты расчетов для этого случая представлены на рис. 2 (зависимость скорости истечения материала и плотности изделия (кривые 1, 2) от величины  $r_1$ ) и 3 (усилие в сетке вдоль очага деформации при различных параметрах сетки плетения «ластик»). Этот тип плетения характеризуется параметром  $\theta_0$  [5]. На рис. 3 кривые 1, 2 соответствуют  $\theta_0 = 1,484; 0,904$ . По этим графикам может быть определен критический размер очага деформации  $r_*$ , при котором наступают существенные пластические деформации материала сетки, что ухудшает свойства изделия. В частности, для  $\theta_0 = 1,484$   $r_* = 0,55$ , для  $\theta_0 = 0,904$   $r_* = 0,72$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпинос Д. М., Тучинский Л. И., Вишняков Л. Р. Новые композиционные материалы.— Киев: Вища шк., 1977.
2. Тучинский Л. И. Твердофазное уплотнение армированных металлов.— Киев: Наук. думка, 1980.
3. Композиционные материалы. Справочник/Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского.— М.: Машиностроение, 1990.
4. Тан С., Бойл Р., Уайтсайд Дж., Андерсон Р. Нелинейная зависимость между напряжением и деформацией для металлических сеток // РТК.— 1980.— № 6.
5. Вишняков Л. Р., Феодосьева Л. И. Нелинейные деформации металлотрикотажа со структурными элементами ромбовидной формы // Вопросы прочности элементов приборов.— М.: МИП, 1990.
6. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел.— М.: Машиностроение, 1989.
7. Хилл Р. Общий метод анализа процессов металлообработки // Механика: Сб. пер. иностр. лит.— 1964.— № 3.
8. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания.— Киев: Наук. думка, 1972.
9. Береснев Б. И., Езерский К. И., Трушин Е. В. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии.— М.: Наука, 1981.

г. Киев  
г. Москва

Поступила 26/VIII 1991 г.,  
в окончательном варианте — 22/XI 1991 г.

УДК 539.3

*В. Н. Миленин, И. А. Филимоненко, Л. И. Шкутин*

#### РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЯМИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методом граничных элементов изучена картина распределения остаточных напряжений в сварных цилиндрических образцах из твердого сплава и стали. Наблюдаемое в экспериментах расширение стали вследствие внутренних структурных превращений задано однородной объемной деформацией. Теоретически и экспериментально доказано, что концентрация осевых растягивающих напряжений на цилиндрической поверхности в зоне сварного соединения служит причиной разрушения твердого сплава. Доказано также, что управление скоростью охлаждения позволяет не только снижать уровень остаточных напряжений и предотвращать разрушение твердого сплава, но и формировать остаточное поле, способное в определенной мере компенсировать эксплуатационные напряжения в сварной детали.

**Механизм формирования остаточных напряжений.** Твердые сплавы применяются в промышленности для оснащения буровых, режущих, штамповых и других инструментов. Неразъемные соединения создаются посредством сварки, пайки и клеики. Наибольшей прочностью отличаются сварные соединения. Однако наличие остаточных напряжений как неизбежное следствие термического режима сварки снижает прочность сварного соединения и может быть причиной разрушения твердого сплава.

Механизм формирования напряжений в сварных соединениях связан с процессом охлаждения и обусловлен различием коэффициентов термического расширения свариваемых материалов. Снижению уровня остаточных напряжений способствует применение различных компенсационных металлических прокладок, порошковых прослоек, искусственное создание пористости в зоне соединения [1]. Более перспективным, как показывает настоящий анализ, является управление напряженным состоянием за счет эффекта объемного расширения, сопровождающего процесс структурных превращений стали при охлаждении.

© В. И. Миленин, И. А. Филимоненко, Л. И. Шкутин, 1993