

# Моделирование процесса выдавливания биметаллической массы с учетом диффузии водорода

Федотов В.П.

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

Водород в определенных интервалах температур и концентраций существенно улучшает пластические свойства титановых сплавов. Это явление названо [1-3] водородным пластифицированием. Однако, широкого развития в производстве этот эффект пока не получил из-за сложности контроля за содержанием водорода при наводороживании в промышленных условиях. Точный контроль необходим, т.к. даже небольшие превышения над допустимой концентрацией водорода могут привести к противоположному результату - водородной хрупкости. В работе на примере задачи выдавливания биметаллической массы показывается возможность оптимизации такого процесса с помощью предварительного наводороживания титанового сердечника.

Одной из интереснейших практических задач является получение сверхтонкой титановой проволоки. Она используется для изготовления бронетканей и бронестекол, для получения сверхпроводящих композитов, используемых в устройствах для создания мощных магнитных полей, и мн. др. Традиционное получение тонкой титановой проволоки волочением затруднено из-за высокого уровня налипания на инструмент, что приводит к порывам в процессе волочения. Одним из возможных технологических решений является обработка давлением композиционного материала, состоящего из медной матрицы и волокон из титанового сплава [4]. Первой операцией является процесс выдавливания [4]. Исходной заготовкой служит цилиндрический слиток из титанового сплава и стакан из чистой меди. После химической очистки поверхностей слиток устанавливают в стакан; получившуюся сборку вакуумируют, стакан закрывают крышкой и заваривают электроннолучевой сваркой. Нагретую до 500°—550°С составную заготовку выдавливают на прессе с уменьшением площади сечения. Диаметр исходной заготовки обычно 100-250 мм. Полученный после выдавливания пруток разрезают на мерные обрезки и подвергают химическому травлению. Затем необходимое количество стержней вставляют в новый стакан, вакуумируют и заваривают. Получившуюся сборку прессуют в пруток, который тянут на волочильной машине с промежуточными термообработками для получения проволоки нужного диаметра. Анализ рассмотренного процесса выдавливания и волочения [4] показал, что при обработке давлением в волокнах возникает более жесткое, чем в матрице, напряженное состояние, обусловленное различием механических свойств. Предельные деформации (пластичность) титановых волокон ограничены, а восстановление пластичности рекристаллизационным отжигом затруднено вследствие того, что температура плавления волокон значительно превышает температуру плавления медной матрицы. Неравномерность напряженного состояния по сечению прутка в процессе выдавливания может привести к различным механическим свойствам и геометрическим размерам волокон.

Эти проблемы может частично снять предварительное наводороживание титанового слитка и создание противодействия на выходе из очага деформации.

Схема выдавливания прутка представлена на рис.1. В [5] была решена задача равновесия однородной упрочняющейся среды в сходящихся каналах, в которой предполагалось, что деформация металла только радиальная. В [4] эта задача решена для биметаллической массы. Механические свойства рассчитывались усреднением по объему, на боковых поверхностях задавался закон трения по Зибелю, течение предполагалось также только радиальным, модель материала использовалась идеальнопластическая. Принятые в этих работах ограничения не позволяют оценить

уровень напряжений в титановых волокнах и истощенную в процессе деформации пластичность, влияние же водорода полностью нивелируется усреднением по объему.

Для количественного анализа этих технологических решений были поставлены две задачи. В первой рассматривалось выдавливание однородной массы с различными значениями противодействия, для выбора оптимального значения с точки зрения равномерности напряженного состояния на выходе из очага деформации. Вторая задача - выдавливание биметаллической массы с противодействием при различных содержаниях водорода с целью получения максимальных предельных деформаций.

### Выдавливание однородной массы

Рассматривалась следующая краевая задача:

$$\nabla_j s_{ij} = 0. \quad (1)$$

$$e_{ij} = (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i)/2. \quad (2)$$

$$de_{ij} = \frac{ds_{ij}}{2m} + \frac{s_{ij}}{s_i(L)} dL, \quad (3)$$

Определяющие уравнения (3) для изотермического процесса и небольших скоростей деформации можно записать в приращениях девиаторов напряжений  $s_{ij}$  и деформаций  $e_{ij}$ , т.к. для большинства процессов обработки металлов давлением считается, что они могут быть описаны теорией процессов малой кривизны [6]. Связь интенсивности напряжений  $S_i$  и накопленной пластической деформацией примем в виде:

$$s_i = s_T + \frac{4(s_B - s_T)}{3(g_B - g_T)^{1/2}} (L - g_T)^{1/2} - \frac{s_B + s_T}{3(g_B - g_T)^2} (L - g_T)^2; \quad (4)$$

где  $s_T$  и  $s_B$  соответственно предел текучести и временное сопротивление, а  $g_T$  и  $g_B$  - соответствующие им деформации. Накопленная пластическая деформация вычисляется для каждой материальной точки вдоль траектории деформации.

Граничные условия заданы следующим образом:

$$\text{на } S_1: u_R = 0; \quad f_Z = -P, \quad (5)$$

здесь  $P$  - напряжение прессования;

$$\text{на } S_2: u_R = 0; \quad f_Z = -P + k_F s_T^M \quad (6)$$

здесь на боковой поверхности учтен закон трения по Зибелю,  $k_F$  - коэффициент трения,  $s_T^M$  - предел текучести для матрицы;

$$\text{на } S_3: u_n = 0; \quad f_t = (-P + k_F s_T^M) \sin a + k_F s_T^M / \ln m_R, \quad (7)$$

здесь  $m_R = R_0^2 / R^2$  - текущее значение вытяжки к конической части;

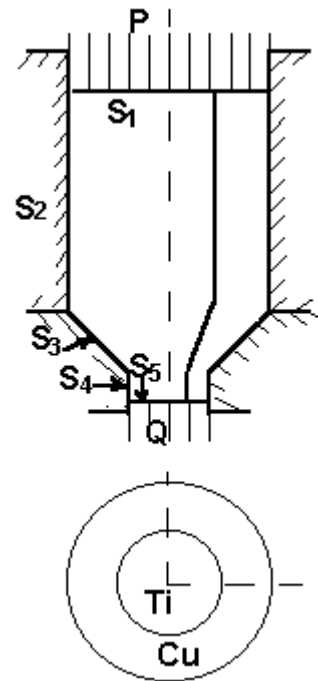


Рис.1 Выдавливание прутка

$$\text{на } S_4: \quad u_R = 0; \quad f_Z = -P + \ln \eta s_T^M + k_F s_T^M + k_F s_T^M / \ln \eta \quad (8)$$

здесь  $\eta = R_0^2 / R_1^2$  - общая вытяжка;

$$\text{на } S_5: \quad u_R = 0; \quad f_Z = Q, \quad (f_R = 0; f_Z = 0), \quad (9)$$

здесь  $Q$  - напряжение противодействия.

Первая задача решается с однородной массой, меняется только значение противодействия. В предельном случае решается задача со свободной поверхностью для  $S_5$  (соотношение (9) в круглых скобках), задание отрицательных напряжений вытягивания на этой поверхности не имеет смысла из-за возникновения в этом случае растягивающих напряжений.

Решение задачи осуществлялось с помощью вариационного принципа [7,8]. Для принятых определяющих уравнений (3), (4) и граничных условий (5)-(9) функционал принципа на каждом шаге деформирования будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \iint_V \left[ \int_{L_k}^{L_{k+1}} (s_T + a_1(L - g_T)^{1/2} - a_2(L - g_T)^2) dL + \int_{T_k}^{T_{k+1}} b_1(T - s_T)^n dT \right] dV + \\ & \int_{S_1} P u_z dS - \int_{S_2} (-P + k_F s_T^M) u_r dS - \\ & \int_{S_3} ((-P + k_F s_T^M) \sin a + k_F s_T^M / \ln \eta) u_t dS - \\ & \int_{S_4} (-P + \ln \eta s_T^M + k_F s_T^M + k_F s_T^M / \ln \eta) u_r dS - \int_{S_5} Q u_z dS \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь коэффициенты  $a_1, a_2$  вычисляются непосредственно из формулы (4), а  $b_1$  и  $n$  из численной аппроксимации обратной к (4) функции. Функционал вычислялся с учетом осевой симметрии. Виртуальное напряженно-деформированное состояние строится по формулам

$$\begin{aligned} u_j(x_S) = & \int_{S_1} [f_i(\mathbf{x}) \cdot u_{ij}^*(x_S, \mathbf{x}) - u_i^*(\mathbf{x}) \cdot f_{ij}^*(x_S, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) + \\ & \int_{S_2} [f_i^*(\mathbf{x}) \cdot u_{ij}^*(x_S, \mathbf{x}) - u_i(\mathbf{x}) \cdot f_{ij}^*(x_S, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) \\ \dot{s}_{ij}(x_S) = & \int_{S_1} [\dot{f}_k(\mathbf{x}) \cdot u_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x}) - \dot{u}_k^*(\mathbf{x}) \cdot s_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) \\ & \int_{S_2} [\dot{f}_k^*(\mathbf{x}) \cdot u_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x}) - \dot{u}_k(\mathbf{x}) \cdot s_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

Здесь  $u_{ij}^*(x_S, \mathbf{x}), f_{ij}^*(x_S, \mathbf{x}), u_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x}), s_{ijk}^*(x_S, \mathbf{x})$  - компоненты тензора Грина и его производных тензоров, определяемые по известным формулам [9]. Выбор такого виртуального состояния обусловлен тем, что оно автоматически удовлетворяет уравнениям равновесия (1). Поскольку выражение для функционала на виртуальном состоянии достаточно громоздко, приведем в качестве примера лишь выражение для второго интеграла в (10)

$$\begin{aligned}
\int_{S_1} P u_z(r, z) dr &= \int_{S_1} P \left[ \int_{S_1} (q_r u_{rz}^* + f_z^* u_{zz}^* - v_z f_{zz}^*) dr_0 + \right. \\
&\int_{S_2} (q_r u_{rz}^* + f_z^* u_{zz}^* - v_z f_{zz}^*) dz_0 + \\
&\int_{S_3} (q_r u_{rz}^* \sin a + f_z^* u_{zz}^* \cos a - v_r f_{rz}^* \sin a - v_z f_{zz}^* \cos a) dr_0 dz_0 + \\
&\left. \int_{S_4} (q_r u_{rz}^* + f_z^* u_{zz}^* - v_z f_{zz}^*) dz_0 + \int_{S_5} (q_r u_{rz}^* + f_z^* u_{zz}^* - v_z f_{zz}^*) dr_0 \right] dr
\end{aligned} \tag{11}$$

Здесь в качестве неизвестных функций выступают поверхностные напряжения  $q_r$  и перемещения  $v_r$  и  $v_z$ , известные поверхностные напряжения  $f_z^*$  берутся из соответствующих граничных условий (5)-(9). Координаты без индексов  $r$  и  $z$  относятся к интегралу, входящему в функционал, а координаты с индексом 0 ( $r_0, z_0$ ) — к интегралам образующим виртуальное состояние. Компоненты тензора Грина  $u_{ij}^*$  для цилиндрической системы координат будут иметь вид [9]:

$$\begin{aligned}
u_{rr}^* &= \frac{1}{4pn(1-n)} \left\{ \frac{4(1-n)(r^2 + \bar{z}^2) - r^2}{2rR} K(p/2, m) - \right. \\
&\left. \left[ \frac{3.5 - 4n}{2r} R - \frac{e^4 - \bar{z}^4}{4rR^3(1-m^2)} \right] E(p/2, m) \right\}; \\
u_{rz}^* &= \frac{r_0 \bar{z}}{4pn(1-n)} \left[ \frac{e^2 - \bar{z}^2}{2rR^3(1-m^2)} E(p/2, m) + \frac{K(p/2, m)}{2rR} \right]; \\
u_{zr}^* &= \frac{\bar{z}}{4pn(1-n)} \left[ \frac{e^2 + \bar{z}^2}{2R^3(1-m^2)} E(p/2, m) - \frac{K(p/2, m)}{2R} \right]; \\
u_{zz}^* &= \frac{r_0}{4pn(1-n)} \left[ \frac{3-4n}{R} K(p/2, m) + \frac{\bar{z}^2 E(p/2, m)}{R^3(1-m^2)} \right],
\end{aligned} \tag{12}$$

здесь

$$r^2 = r^2 + r_0^2, e^2 = r^2 - r_0^2, R = \sqrt{(r + r_0)^2 + \bar{z}^2}, \bar{z} = z - z_0, \tag{13}$$

а  $K$  и  $E$  - полные эллиптические интегралы первого и второго рода. Входящие в (11)

компоненты тензора  $f_{ij}^*$  можно вычислить следующим образом

$$f_{rr}^* = 2m \left\{ c \frac{\mathfrak{H}u_{rr}^*}{\mathfrak{H}r} + d \left( \frac{u_{rr}^*}{r} + \frac{\mathfrak{H}u_{zr}^*}{\mathfrak{H}z} \right) n_r + \frac{1}{2} \left( \frac{\mathfrak{H}u_{rr}^*}{\mathfrak{H}z} + \frac{\mathfrak{H}u_{zr}^*}{\mathfrak{H}r} \right) n_z \right\};$$

$$\begin{aligned}
 f_{rz}^* &= 2m \left[ c \frac{\nabla u_{zr}^*}{\nabla z} + d \left( \frac{u_{rr}^*}{r} + \frac{\nabla u_{rr}^*}{\nabla r} \right) \right] n_r + \frac{1}{2} \left( \frac{\nabla u_{rr}^*}{\nabla z} + \frac{\nabla u_{zr}^*}{\nabla r} \right) n_z \}; \\
 f_{zr}^* &= 2m \left[ c \frac{\nabla u_{rz}^*}{\nabla r} + d \left( \frac{u_{rz}^*}{r} + \frac{\nabla u_{zz}^*}{\nabla z} \right) \right] n_r + \frac{1}{2} \left( \frac{\nabla u_{rz}^*}{\nabla z} + \frac{\nabla u_{zz}^*}{\nabla r} \right) n_z \}; \\
 f_{zz}^* &= 2m \left[ c \frac{\nabla u_{zz}^*}{\nabla z} + d \left( \frac{u_{rz}^*}{r} + \frac{\nabla u_{rz}^*}{\nabla r} \right) \right] n_r + \frac{1}{2} \left( \frac{\nabla u_{rz}^*}{\nabla z} + \frac{\nabla u_{zz}^*}{\nabla r} \right) n_z \}; \\
 c &= \frac{1-n}{1-2n}, \quad d = \frac{n}{1-2n}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Переход от бесконечномерного интеграла (10) к конечномерной функции нескольких варьируемых параметров осуществляется дискретизацией границы рассматриваемой области. Рассмотрим для примера как будет выглядеть второй интеграл в квадратных скобках выражения (11)

$$\begin{aligned}
 &\int_{S_1} P \left[ \int_{S_2} (q_r u_{rz}^* + f_z^* u_{zz}^* - v_z f_{zz}^*) dz_0 \right] dr = \\
 &\int_{S_1} P \left[ \sum_{i_{z_0}=1}^{N_2} \left( q_r^{i_{z_0}} \int_{S_2^{i_{z_0}}} u_{rz}^* dz_0 + P \int_{S_2^{i_{z_0}}} u_{zz}^* dz_0 + v_z^{i_{z_0}} \int_{S_2^{i_{z_0}}} f_{zz}^* dz_0 \right) \right] dr \\
 &= \sum_{i_{z_0}=1}^{N_2} \left( q_r^{i_{z_0}} \int_{S_1^{i_r}} \int_{S_2^{i_{z_0}}} u_{rz}^* dz_0 dr + P \int_{S_1^{i_r}} \int_{S_2^{i_{z_0}}} u_{zz}^* dz_0 dr + v_z^{i_{z_0}} \int_{S_1^{i_r}} \int_{S_2^{i_{z_0}}} f_{zz}^* dz_0 dr \right).
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

В соотношении (15) в качестве неизвестных варьируемых параметров выступают значения средних по элементу поверхностных напряжений  $q_r^{i_{z_0}}$  и перемещений  $v_z^{i_{z_0}}$ . Индекс  $i_{z_0}$  принадлежит граничному элементу на поверхности  $S_2$ ,  $N_2$ - количество элементов на  $S_2$ . Интегралы от известных компонент тензора Грина  $u_{ij}^*$  и производного от него тензора  $f_{ij}^*$  вычисляются численно. Остальные слагаемые функционала (10) могут быть получены подобным образом, после чего задача сводится к минимизации функции многих переменных  $q_r^{i_{z_0}}$  и  $v_z^{i_{z_0}}$ , которая решалась стандартным методом.

Решение осуществлялось при следующих значениях:  $S_T=228$ МПа,  $S_B=450$ МПа,  $P=3.5S_T$ ,  $k_F=0.1$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $R_0=50$ мм,  $l_k=300$ мм (длина калибрующего пояса матрицы). Для выбора оптимального с точки зрения равномерности распределения напряжений на выходе из очага деформации были рассчитаны следующие варианты изменения величины напряжения противодавления  $Q$ : 1)  $Q=0$  (свободная поверхность); 2)  $Q=S_T=230$  Мпа; 3)  $Q=1.5S_T=340$  Мпа; 4)  $Q=2.5S_T=570$  Мпа; 5)  $Q=3.0S_T=690$  Мпа; 6)  $Q=3.5S_T=800$  МПа.

На рис.2 представлены графики распределения осевых напряжений по толщине прутка для одного сечения по оси  $OZ$  при  $Z=5\text{мм}$ . Как видно из графиков, перепад напряжений минимальный для варианта  $Q = 3.5S_T$ . В [4] были получены интегральные оценки процесса на основе экстремальных теорем идеальной пластичности. Полученное автором интегральное значение усилия прессования лежит в пределах верхней и нижней оценки этой характеристики, полученной в [4]

$$\left(\frac{S_P}{S_T} = 2.9\right)_{H.O.} < \left(\frac{S_P}{S_T} = 3.5\right)_{ABTOP} < \left(\frac{S_P}{S_T} = 3.9\right)_{B.O.} \quad (16)$$

### Выдавливание биметаллической массы

Вторая задача решалась для биметаллической массы, состоящей из медной матрицы и сердечника из титанового сплава ВТ1-0. В постановке задачи использовались уравнения (3,4), где для последнего функция  $S_i(L)$  задавалась своя для титанового сердечника и медной матрицы. Внешние граничные условия задавались аналогично (5)-(10), а для внутренней границы раздела вводились условия сопряжения

$$\text{на } S_G: \quad u_i^{Ti} = u_i^{Cu}; \quad f_i^{Ti} = f_i^{Cu}. \quad (17)$$

Учет условия сопряжения (17) в граничной вариационной задаче очень прост. Виртуальное состояние для внутренней границы  $S_G$

$$\begin{aligned} v_j(x) = & \int_{S_1} [f_i(\mathbf{x}) \cdot u'_{ij}(x, \mathbf{x}) - u_i^*(\mathbf{x}) \cdot f'_{ij}(x, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) + \\ & \int_{S_2} [f_i^*(\mathbf{x}) \cdot u'_{ij}(x, \mathbf{x}) - v_i(\mathbf{x}) \cdot f'_{ij}(x, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}) + \\ & \int_{S_G} [f_i(\mathbf{x}) \cdot u'_{ij}(x, \mathbf{x}) - v_i(\mathbf{x}) \cdot f'_{ij}(x, \mathbf{x})] dS(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (18)$$

задается одинаковым для титанового сердечника и медной матрицы с единственным отличием в знаке внешней нормали, что контролируется направлением обхода границы. Поверхностные напряжения являются виртуальными параметрами, задаются различными для титана и меди, а второе равенство (17) служит критерием положения самой границы раздела.

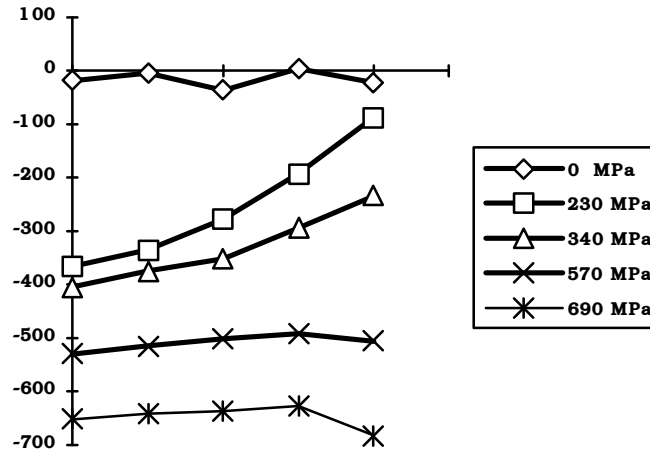


Рис.2 Осевые напряжения по толщине прутка при разном противодавлении

### Предварительное наводороживание

Для определения механических свойств наводороженного титанового сердечника решалась следующая диффузионная задача

$$\dot{C} = D(T)DC, \quad D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{H}{RT}\right), \quad (19)$$

где  $H$  - энергия активации,  $R$  - газовая постоянная. Граничные условия задаются постоянными

$$C = C^* = const, \quad (20)$$

что соответствует выдержке в газовой среде с содержанием водорода с постоянным парциальным давлением внешней газовой. Решение осуществлялось методом граничных элементов [9].

Для выбора оптимального, с точки зрения повышения пластических свойств титановых волокон содержания водорода, решалась задача для десяти вариантов предварительного наводороживания: 1) без водорода; 2) с средней концентрацией водорода  $C=0.05$ ; 3) с средней концентрацией водорода  $C=0.1$ ; 4)  $C=0.15$ ; ... 10) с средней концентрацией водорода  $C=0.45$  при концентрации водорода в окружающей среде  $C=0.5$ . Коэффициент диффузии принимался равным  $D=0.001$  см.2/сек. Радиус биметаллической заготовки брался прежним —  $R=10$  мм. На рис.3 приведено распределение концентрации

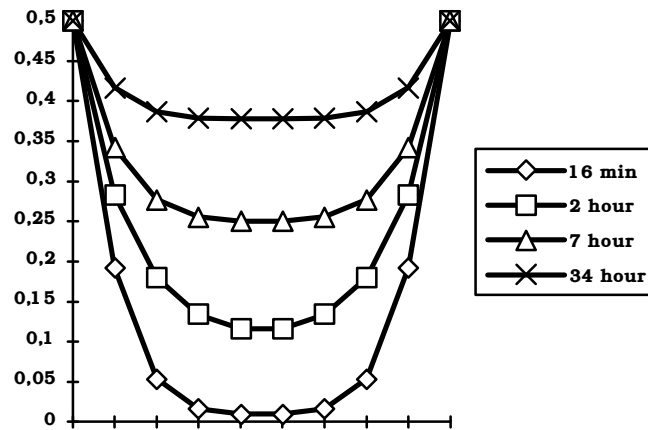


Рис.3 Концентрация водорода по диаметру образца после различного времени выдержки

водорода по диаметру образца для четырех случаев: 1) после 16 мин. 20 сек. выдержки в газовой среде, средняя концентрация водорода  $C=0.1$ ; 2) 2 час. 16 мин.,  $C=0.2$ ; 3) 7 час. 13 мин.,  $C=0.3$ ; 4) 34 час. 10 мин.,  $C=0.4$ . Как видно из рисунка стремление к получению равномерного распределения концентрации водорода по диаметру сердечника, а значит и равномерным по толщине механическим свойствам, требует быстро возрастающего времени, в пределе (при равномерном распределении) стремящегося к бесконечности. Неравномерность распределения концентрации водорода, которая реализуется в реальные времена предварительного наводороживания, требует учета неравномерности механических свойств в процессе решения задачи деформирования. В этом случае вместо (4) необходимо вместе с (3) использовать зависимость

$$s_i = s_T(C) + \frac{4(s_B(C) - s_T(C))}{3(g_B - g_T(C))^{1/2}} (L - g_T)^{1/2} - \frac{s_B(C) + s_T(C)}{3(g_B - g_T(C))^2} (L - g_T)^2; \quad (21)$$

где зависимость концентрации от координат  $C = C(\mathbf{x})$  известна из диффузионной задачи. Подстановка (21) с учетом  $C = C(\mathbf{x})$  в функционал (10) дает для объемного интеграла:

$$\iint_V \left[ \int_{L_k}^{L_{k+1}} \left( S_T(\mathbf{x}) + \frac{4(S_B(\mathbf{x}) - S_T(\mathbf{x}))}{3(g_B - g_T(\mathbf{x}))^{1/2}} (L - g_T)^{1/2} - \frac{S_B(\mathbf{x}) + S_T(\mathbf{x})}{3(g_B - g_T(\mathbf{x}))^2} (L - g_T)^2 \right) dL \right] dV \quad (22)$$

Остальные слагаемые функционала (10) не содержат величин, зависящих от концентрации водорода и остаются без изменений. После подстановки виртуального состояния и численного интегрирования вновь полученный функционал сводится к функции неизвестных варьируемых параметров  $q_r^{i_{z0}}$  и  $v_z^{i_{z0}}$ , но в отличие от предыдущей задачи здесь учтена неравномерность механических свойств из-за неравномерного распределения концентрации водорода после гидрирования.

Решение осуществлялось при следующих значениях:  $S_T=228$ МПа,  $S_B=450$ МПа для титана,  $S_T=120$ МПа,  $S_B=134$ МПа для меди,  $P=610$ МПа,  $k_F=0.1$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $R_0=50$ мм,  $l_k=300$ мм, значение напряжения противодавления принято равным  $Q=335$ МПа.

На рис.4 представлено распределение интенсивности напряжений для титанового сердечника в четырех рассмотренных вариантах решения задачи. Как видно из рисунка, наиболее низкий и равномерный уровень напряжения реализуется для титана с концентрацией водорода  $C=0.15$ . При дальнейшем наводороживании уровень напряжений возрастает, это объясняется тем, что для технически чистого титана водород является упрочняющей примесью даже в небольших количествах. Как отмечалось выше, для менее чистых сплавов ВТ6, ВТ20 оптимальная, с точки зрения повышения пластических свойств, концентрация водорода находится в интервале 0.3-0.4. Другим критерием выбора технологического режима является возможность максимально деформировать прутки без промежуточных отжигов, т.к. последние затруднительны из-за большой разницы температур плавления медной матрицы и титанового сердечника. На рис.5 представлено распределение коэффициента запаса пластической деформации

$\chi_g = g_B/g_i$  по сечению титанового волокна. Как видно из графиков, наибольший запас реализуется при концентрации водорода  $C=0.3$ . Резкое уменьшение  $\chi_g = g_B/g_i$  при увеличении концентрации водорода до  $C=0.45$  говорит об водородном охрупчивании. Таким образом, при концентрации водорода  $C=0.3$  можно достичь наибольших вытяжек в процессе выдавливания, и особенно в процессе последующего волочения.

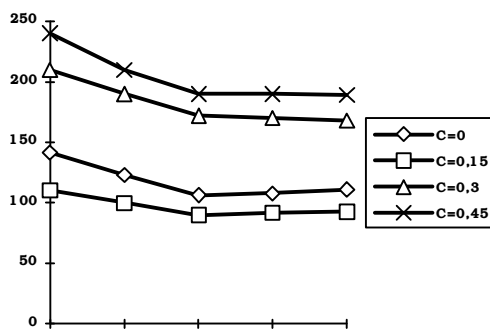


Рис.4 Интенсивность напряжений для титанового сердечника при разных концентрациях H

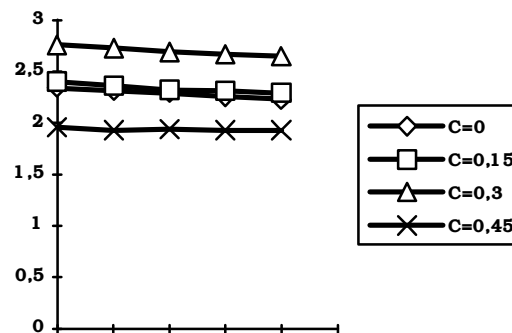


Рис.5 Коэффициент  $\chi_g = g_B/g_i$  по сечению волокна при разной концентрации H

Рассмотренные варианты решения задачи выдавливания позволяют выбрать оптимальные технологические режимы, в которых варьируется содержание водорода и



напряжение противодействия. Конкретный выбор должен диктоваться тем, какая практическая задача является основной. Если требуется производство минимальной по толщине титановой проволоки, например, для бронестекла, то из рассмотренных вариантов мы должны выбрать режим предварительного наводороживания до концентрации водорода  $C=0.3$ . Если для нас важнее однородность свойств титановых волокон, например, для производства сверхпроводящих материалов, то мы должны выбрать режим предварительного наводороживания до концентрации водорода  $C=0.15$ .

## Литература

1. Колачев Б.А. Обратимое легирование титановых сплавов водородом // Металловедение и термическая обработка металлов. 1993. № 10. С.28 - 32.
2. Колачев Б.А., Ильин А.А. Термоводородная обработка титановых сплавов // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов. М.: ВИЛС, 1991. С. 132 - 142.
3. Колачев Б.А., Мальков АВ., Низкин А.Д. и др. О возможности снижения температуры горячей высадки болтов из сплава ВТ 16 путем обратимого легирования водородом // Изв. АН СССР. Металлы. 1991. № 3. С. 67 - 79.
4. Залазинский А.Г. Математическое моделирование процессов обработки давлением структурно-неоднородных материалов. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 90 с.
5. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.
6. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
8. Колмогоров В.Л., Федотов В.П. Неклассическая задача теории пластического течения ее решения вариационным методом // В кн. : Пластическая деформация легких и специальных сплавов. М.: Металлургия, 1982.
9. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Метод граничных элементов. М.: Мир, 1987. 526 с.