

В.Н. Трофимов, Г.Л. Колмогоров, Т.В. Кузнецова

Пермский государственный технический университет,

Д.С. Анищук, А.В. Есеев

ОАО «Чепецкий механический завод», г. Глазов

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) широко используются как в приборостроении, так при создании мощных исследовательских и энергетических установок.

Для проектирования технологии многоэтапного пластического деформирования длинномерных композиционных НТСП с целью получения заданной длины и достижения высоких критических характеристик предлагается методика расчёта напряженно-деформированного состояния заготовки НТСП в очаге пластической деформации.

Ключевые слова: низкотемпературные сверхпроводники, пластическая деформация, напряженно-деформированное состояние, композит.

Для создания сверхпроводящих магнитных систем (СМС) наиболее широко используются низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) 2-го рода.

Важнейшими характеристиками НТСП являются *критическая температура T_c , критическое магнитное поле H_c и также критическая плотность тока j_c* . Указанные критические параметры являются структурно чувствительными и существенно изменяются в результате термомеханической обработки.

Теория НТСП 2-го рода основана на модели *пиннинга* (от английского *pinning* – прищипливание) – проникновении магнитного поля внутрь сверхпроводника в виде квантованных вихрей, закрепляющихся на дефектах объёмной нанокристаллической структуры, называемых *центрами пиннинга*. Создание такой структуры обеспечивается конструкцией НТСП и технологией их изготовления.

Наиболее широко применяются НТСП на основе сплава NbTi и интерметаллического соединения Nb₃Sn.

Основными центрами пиннинга в сплавах NbTi являются мелкодисперсные частицы α-Ti, выделяющиеся из β-твердого раствора по границам деформационных микрополос в местах скопления дислокаций. Такая структура может быть получена после очень большой степени деформации сначала в горячем, а затем в холодном состоянии.

Более высокими критическими параметрами обладают сверхпроводники на основе интерметаллического соединения Nb₃Sn. Соединение Nb₃Sn чрезвычайно хрупкое, поэтому для изготовления длинномерных сверхпроводников применяется метод селективной твердофазной диффузии – «бронзовая технология». Идея метода заключается в совместном многократном деформировании сборки заданной структуры, состоящей из коаксиальных волокон ниобия и оловянистой бронзы для получения длинномерных композиционных заготовок с заданной структурой распределения по сечению ниобиевых волокон диаметром 5–130 мкм в проводнике диаметром 0,1–1,0 мм с общим числом порядка $\sim 10^1 \div 10^4$.

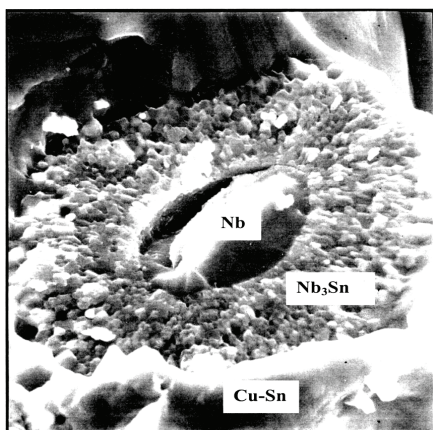


Рис. 1. Поперечное сечение волокна сверхпроводника после диффузионного отжига

По окончании деформационной обработки в результате диффузионного отжига при температуре 700–750 °С образуется соединение Nb₃Sn (рис. 1) с размером зерен менее 100 нм.

В проводниках на основе интерметаллида Nb₃Sn содержание сверхпроводящей фазы определяется конструкцией проводника, диаметром волокон и, ограниченно, содержанием олова в бронзе и соотношением олова и ниобия в композите. Допустимое содержание олова в бронзе ограничивается пределом его растворимости в меди в твердом состоянии – 13–14 мас. %.

Такие бронзы имеют низкую пластичность и после деформации на 45–50 % требуется отжиг заготовки при 500–550 °С.

Для получения высоких значений критических характеристик проводники для СМС на основе сверхпроводников 2-го рода изготов-

ливаются в виде комбинированных композитов, имеющих высокую однородность свойств по длине (1–30 км).

В настоящее время в РФ в рамках проекта ITER (международный термоядерный исследовательский реактор) разворачивается масштабное производство НТСП для СМС. В перспективе производимые НТСП планируется применять в электротехнике, приборостроении, медицине.

При производстве проводников на основе НТСП наиболее длительным и ответственным является волочильный передел, связанный с многократным холодным пластическим деформированием композиционной заготовки с диаметра 60–70 мм на диаметр 0,1–1,0 мм. На этом этапе изготовления необходимо обеспечить безобрывность процесса и получение заданной плотности микродефектов, чтобы обеспечить образование центров пиннинга в случае сверхпроводников на основе сплава NbTi или исключить разрушение заготовки на промежуточных стадиях деформирования при производстве сверхпроводников по «бронзовой технологии».

Для решения указанной задачи необходимо проектировать технологический процесс с учетом накопления поврежденности (дефектности) структуры сверхпроводниковой композиционной заготовки на каждом этапе пластического деформирования.

Для проектирования технологии многоэтапного пластического деформирования длинномерных композиционных НТСП предлагается методика расчёта напряженно-деформированного состояния заготовки НТСП в очаге пластической деформации.

Различные конструкции сверхпроводников на основе сплавов NbTi и соединения Nb₃Sn представлены на рис. 2.

Сечение проводника для СМС представляет собой сложный геометрический объект и может быть представлено как трансверсально-изотропный двух- или трехслойный композит (би- или триметалл), наружный слой которого состоит из медной токостабилизирующей оболочки, а промежуточный слой или сердечник являются композитом, состоящим из волокон NbTi или ниобия, размещенных в медной или бронзовой матрице, эффективные механические характеристики которого определяются механическими характеристиками металла волокон и металла матрицы и их процентным отношением в сечении проводника (см. рис. 2).

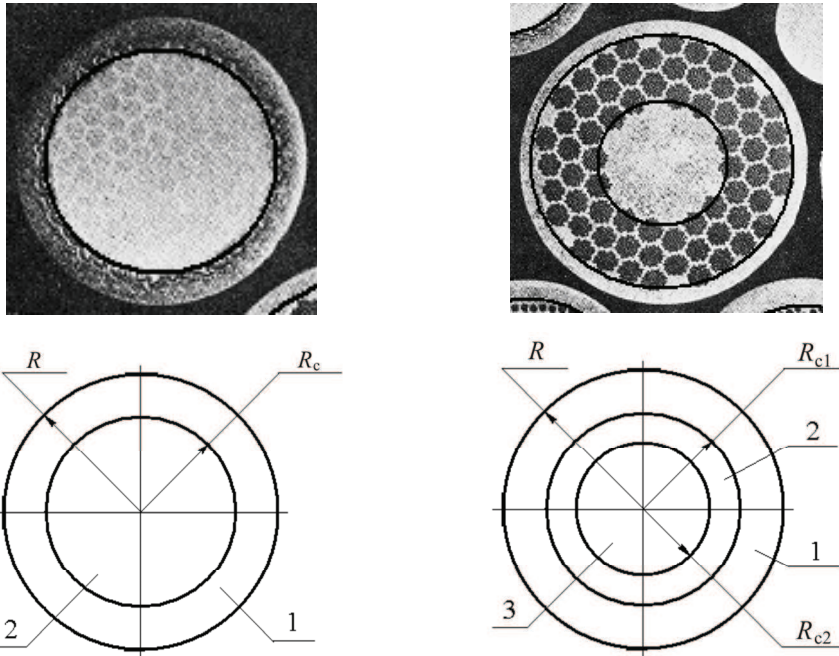


Рис. 2. Схематизация конструкций сверхпроводников в виде би- и триметалла: 1 – оболочка; 2 – промежуточный слой; 3 – сердечник; R – радиус проводника; R_{c1} – наружный радиус промежуточного слоя; R_{c2} – радиус сердечника

Определим деформированное состояние заготовки, принимая, что процесс деформирования монометаллических и композиционных заготовок подчиняется общим закономерностям, а материал заготовки жестко-пластический.

Определим кинематически возможное поле скоростей в очаге деформации (рис. 3). Угол наклона линий тока θ определится следующим образом:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dr}{dx'} = \frac{\bar{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}{\bar{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho) - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где $r_0 / R_0 = r / R = \bar{r}$; \bar{r} – относительный радиус линии тока; r и r_0 – текущий и начальный радиус линии тока; $R = R_0 + x \cdot \operatorname{tg} \alpha$ и R_0 – текущий и начальный радиус заготовки в канале волокна; $\rho = \arctg(f_n)$ – угол трения; $\operatorname{tg} \varphi = \bar{r} \cdot \sin(\alpha + \rho) / \sqrt{1 - \bar{r}^2 \cdot \sin^2(\alpha + \rho)}$; α – угол наклона образующей канала волокна.

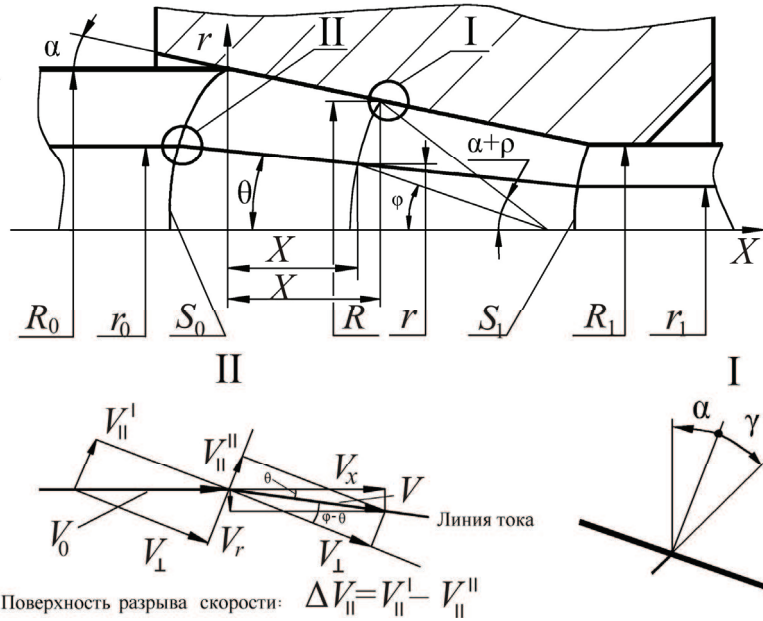


Рис. 3. Кинематически возможное поле скоростей при волочении заготовки

Определим компоненты тензора скоростей деформаций $\xi_x, \xi_r, \xi_\varphi$.

Из рис. 3 определим $V_r = -V_x \cdot \operatorname{tg} \theta$. Подставляя полученные выражения в уравнение неразрывности для осесимметричного течения и учитывая граничное условие $V_x|_{x=0} = V_{x0}$, получим

$$\xi_r = \xi_\varphi; \quad \xi_x + \xi_r + \xi_\varphi = \frac{\partial V_x}{\partial x} - 2 \frac{V_x}{r} \operatorname{tg} \theta = 0;$$

$$V_x = V_{x0} (R_0 / R)^2;$$

$$\xi_x = 2V_{x0} \frac{R_0^2}{R^3} \operatorname{tg} \theta'; \quad \xi_r = \xi_\varphi = -\frac{V_{x0} \cdot R_0^2}{R^3} \operatorname{tg} \theta';$$

$$\eta_{rx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial x} \right) = -\frac{2V_{x0} \cdot R_0^2}{R^3} \bar{r} \cdot \operatorname{tg}^2 \theta',$$

где $\operatorname{tg} \theta' = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\bar{r}}$.

Определим интенсивность скоростей деформации сдвига и степень деформации частиц вдоль линии тока:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{(\xi_x - \xi_r)^2 + (\xi_r - \xi_\varphi)^2 + (\xi_\varphi - \xi_x)^2 + 3/2\eta_{rx}^2};$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^T H dt = \sqrt{4 + (4/3) \cdot \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot \ln(R_0/R), \quad (2)$$

где $dt = dx/V_x$; T – время движения частицы металла вдоль линии тока.

На границах очага деформации S_0 и S_1 , являющихся поверхностями разрыва скорости, частицы металла получают приращение степени деформации

$$\Delta\varepsilon = (1/\sqrt{3}) \cdot |\Delta V_{\parallel}|/V_{\perp}, \quad (3)$$

где V_{\perp} – составляющая скорости, перпендикулярная поверхности разрыва; ΔV_{\parallel} – разность составляющих скорости, параллельных поверхности разрыва.

Из рис. 3 следует: справа от поверхности S_0 – $V''_{\parallel} = V_{\perp} \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \theta) = V_0 \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \theta)$, слева – $V_{\perp} = V_0 \cdot \cos \varphi$; $V'_{\parallel} = V_0 \cdot \sin \varphi$. Подставляя полученные соотношения в формулу (3), получим

$$\Delta\varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg}(\varphi - \theta)}{\sqrt{3}} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{\sqrt{3} \cdot (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \theta)} \operatorname{tg} \theta.$$

На границе S_1 приращение степени деформации определяется аналогично. Суммарная степень деформации частицы вдоль линии тока определится следующим образом:

$$\varepsilon_{\Sigma} = 2\Delta\varepsilon + \varepsilon = \frac{2 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{\sqrt{3} \cdot (1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \theta)} \operatorname{tg} \theta + \sqrt{4 + \frac{4}{3} \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right).$$

На практике процесс волочения осуществляется при $\alpha \leq 10^\circ$, $f_n \leq 0,1$ и $R_0/R_1 \leq 1,3$, поэтому можно принять $\operatorname{tg} \theta \approx \bar{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha$;

$$\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \theta} \approx 1; \quad \sqrt{4 + \frac{4}{3} \operatorname{tg}^2 \theta} \approx 2,$$

откуда

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} + 2 \ln \left(\frac{R_0}{R_1} \right). \quad (4)$$

Полученное соотношение верно для очага деформации с плоскими границами [1]. Условие плоских границ будем использовать при определении напряженного состояния заготовки в очаге деформации (рис. 4).

При анализе процесса волочения слоистых композиционных заготовок используем усредненные по толщине каждого слоя, ограниченного волокнами с координатами $r_i = \bar{r}_i R$ и $r_{i+1} = \bar{r}_{i+1} R$, значения степени деформации:

$$\varepsilon_{\Sigma \text{ср}} = \frac{2\pi \int_{r_i}^{r_{i+1}} \varepsilon_{\Sigma} r \, dr}{\pi(r_{i+1}^2 - r_i^2)} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \bar{r}_{i+1} \frac{1 - \bar{R}_i^3}{1 - \bar{R}_i^2} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} + 2 \ln \left(\frac{R_0}{R_1} \right), \quad (5)$$

где $\bar{R}_i = \bar{r}_i / \bar{r}_{i+1}$.

Для определения напряженного состояния примем следующие допущения:

1. Отношение толщины слоев элементов композиционной заготовки постоянно, $\bar{R}_i = R_i / R = \text{const}$, где R_i, R – наружный радиус i -го слоя и заготовки в очаге деформации.

2. Напряжения распределены равномерно по сечению каждого слоя и являются главными (подход Закса).

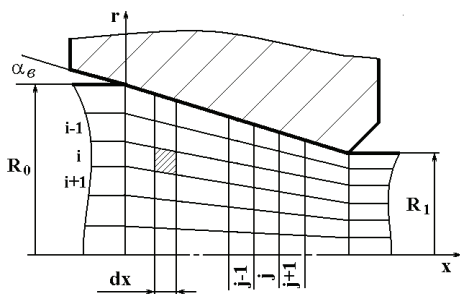


Рис. 4. Схема очага деформации

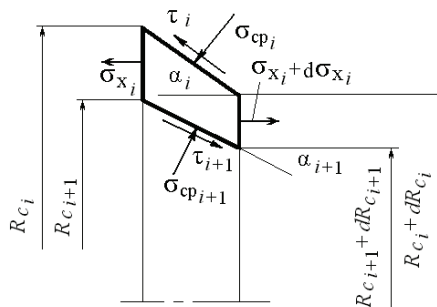


Рис. 5. Схема напряженного состояния элемента слоя заготовки

3. Из равенства $\xi_r = \xi_\varphi$ следует равенство $\sigma_r = \sigma_\varphi$.

Так как $\alpha \leq 10^\circ$, то принимаем на поверхностях контакта слоев $\sigma_r \approx \sigma_n$ и используем упрощенное условие пластичности $\sigma_{xi} + \sigma_{ni} = \sigma_{si}$, где σ_{xi} и σ_{ni} – продольные и нормальные напряжения в i -м слое заготовки; σ_{si} – сопротивление деформированию металла i -го слоя заготовки.

4. Касательные напряжения на поверхности контакта заготовки и волокна определяются законом Кулона–Амонтона: $\tau_{тр} = f_n \cdot \sigma_{n1}$.

5. На границах слоев касательные напряжения определяются [2] следующим образом

$$\tau_i = f_n \cdot \sigma_{n1} \cdot \bar{R}_i,$$

где σ_{n1} – нормальные напряжения на контакте заготовки и инструмента.

6. Для исключения разрыва компонент тензора напряжений примем, что на границе слоев существует тонкий промежуточный слой, в пределах которого нормальные напряжения изменяются по линейному закону, а непосредственно на границах слоя нормальные напряжения определяются выражениями

$$\sigma_{cpi} = \frac{\sigma_{ni-1} + \sigma_{ni}}{2}; \quad \sigma_{cpi+1} = \frac{\sigma_{ni} + \sigma_{ni+1}}{2},$$

где σ_{ni-1} , σ_{ni} , σ_{ni+1} – нормальные напряжения в соседних слоях.

Выделим элемент произвольного слоя заготовки в очаге деформации (рис. 5) (на рис. 4 элемент заштрихован).

Дифференциальное уравнение равновесия выделенного элемента слоя с учетом принятых допущений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{xi}}{dx} - \sigma_{xi} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R} + \sigma_{xi-1} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R} \frac{1}{1 - \bar{R}_c^2} - \sigma_{xi+1} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R} \frac{1}{1 - \bar{R}_c^2} + \\ + \sigma_{x1} \frac{2f_n}{R} - \sigma_{s1} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R} \left(\eta_i - 2a + \frac{\eta_{i-1} - \eta_{i+1}}{1 - \bar{R}_{ci}^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{R}_{ci} = \bar{R}_{i+1} / \bar{R}_i$; $a = f_n / \operatorname{tg} \alpha$; $\eta_i = \sigma_{si} / \sigma_{s1}$ – коэффициент неоднородности пластических свойств; σ_{s1} , σ_{si} – сопротивление деформации металла наружного и i -го слоя соответственно.

После перехода к безразмерным параметрам уравнение (6) принимает вид

$$\bar{R}(d\bar{\sigma}_i / d\bar{x}) + \bar{\sigma}_i \cdot a_{1i} + \bar{\sigma}_1 \cdot a_{2i} + \bar{\sigma}_{i-1} \cdot a_{3i} + \bar{\sigma}_{i+1} \cdot a_{4i} + a_{5i} = 0, \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}_i = \sigma_{xi} / \sigma_{si}$; $\bar{x} = x / L$; $\bar{R} = R / R_0 = (1 - x \cdot \operatorname{tg} \alpha) / R_0$;
 $L = (R_0 - R_1) / \operatorname{tg} \alpha$;

$$a_{1i} = -\bar{A}; \quad a_{2i} = 2a \cdot \bar{A} / \eta_i; \quad a_{3i} = \frac{\eta_{i-1}}{\eta_i} \cdot \frac{\bar{A}}{1 - \bar{R}_{ci}^2}; \quad a_{4i} = \frac{\eta_{i+1}}{\eta_i} \cdot \frac{\bar{A}}{1 - \bar{R}_{ci}^2};$$

$$a_{5i} = \bar{A} \left[1 - \frac{2a}{\eta_i} + \frac{\eta_{i-1} - \eta_{i+1}}{\eta_i \cdot (1 - \bar{R}_{ci}^2)} \right]; \quad \bar{R} = 1 - \bar{x} \cdot \bar{A}; \quad \bar{A} = 1 - R_1 / R_0.$$

Для n -слойной композиционной заготовки ($i = 1, n$) после подстановки соответствующих параметров можно получить систему неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами, решение которой позволяет определить продольные напряжения в каждом слое. Нормальные напряжения определяются из условий пластичности (10) для соответствующего слоя, а касательные напряжения на границах слоев – из уравнения (12).

Использование уравнения (7) позволило получить расчетные соотношения для определения напряжений в слоях наиболее распространенных типов слоистых композиционных заготовок – би- и триметаллов.

Биметаллические заготовки

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 / \sigma_{s1} = \eta \bar{\sigma}_2 + \Delta \bar{\sigma}; \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 / \sigma_{s2} = C_1 + (\bar{\sigma}_{q2} - C_1 - C_2) \bar{R}^{2a} + C_2 \bar{R}^{2(B-1)};$$

$$\Delta \bar{\sigma} = (1 - \eta) [B / (B - 1)] [1 - \bar{R}^{2(B-1)}] + (\bar{\sigma}_{q1} - \eta \bar{\sigma}_{q2}) \bar{R}^{2(B-1)};$$

$$C_1 = (1 / a\eta) [1 + 2a + \eta - 2 \cdot (1 - \eta)(1 + 2a)B / (B - 1)];$$

$$C_2 = \frac{(1 + 2a) [(1 - \eta)B - (\bar{\sigma}_{q1} - \eta \bar{\sigma}_{q2})(B - 1)]}{2\eta(1 + a - B)(B - 1)},$$

где $\bar{\sigma}_{q1} = \sigma_{q1} / \sigma_{s1}$; $\bar{\sigma}_{q2} = \sigma_{q2} / \sigma_{s2}$; σ_{q1} и σ_{q2} – напряжения противонапряжения оболочки и сердечника соответственно.

Триметаллические заготовки

Для триметаллических заготовок продольные напряжения определяются из решения системы дифференциальных уравнений: для наружной оболочки

$$\bar{R} \cdot d\bar{\sigma}_1 / d\bar{x} + a_{11} \cdot \bar{\sigma}_1 + a_{21} \cdot \bar{\sigma}_2 + a_{31} = 0, \quad (9.1)$$

где $\bar{R} = R / R_0 = 1 - \bar{A} \cdot \bar{x}$; $\bar{A} = 1 - R_1 / R_0$; $\bar{x} = x / L$ ($0 \leq \bar{x} \leq 1$);
 $a_{11} = -C_1 \cdot \bar{A}$; $a_{21} = -\eta_1 \cdot B_1 \cdot \bar{A}$; $a_{31} = -C_2 \cdot \bar{A}$;

для промежуточной оболочки

$$\bar{R} \cdot d\bar{\sigma}_2 / d\bar{x} + a_{12} \cdot \bar{\sigma}_2 + a_{22} \cdot \bar{\sigma}_1 + a_{32} \cdot \bar{\sigma}_3 + a_{42} = 0, \quad (9.2)$$

где $a_{12} = -\bar{A}$; $a_{22} = -\bar{A} \cdot C_3 / \eta_1$; $a_{32} = -\bar{A} \cdot B_2 \cdot \eta_2 / \eta_1$; $a_{42} = -\bar{A} \cdot C_4 / \eta_1$;
 для сердечника

$$\bar{R} \cdot d\bar{\sigma}_3 / d\bar{x} + a_{13} \cdot \bar{\sigma}_3 + a_{23} \cdot \bar{\sigma}_1 + a_{33} \cdot \bar{\sigma}_3 + a_{43} = 0, \quad (9.3)$$

где $a_{13} = -\bar{A}$; $a_{23} = 2a \cdot \bar{A} / \eta_2$; $a_{33} = \bar{A} \cdot \eta_1 / \eta_2$; $a_{43} = -\bar{A} \cdot C_5 / \eta_2$;
 $C_1 = 2 - A_1$; $C_2 = A_1 - \eta_1 \cdot B_1$; $C_4 = \eta_1 - \eta_2 B_2 - C_3$; $C_5 = 2a + \eta_1 + \eta_2$;

$\eta_1 = \sigma_{s2} / \sigma_{s1}$; $\eta_2 = \sigma_{s3} / \sigma_{s1}$; $a = f_n / \operatorname{tg} \alpha_\theta$; $A_1 = \frac{1 + (1 + 2a)(1 - \bar{R}_1^2)}{1 - \bar{R}_1^2}$;

$C_3 = -\frac{1 + 2a(1 - \bar{R}_3^2)}{1 - \bar{R}_3^2}$; $B_1 = \frac{\bar{R}_1^2}{1 - \bar{R}_1^2}$; $B_2 = \frac{\bar{R}_3^2}{1 - \bar{R}_3^2}$; $\bar{R}_1 = R_{c1} / R$;

$\bar{R}_2 = R_{c2} / R$; $\bar{R}_3 = R_{c2} / R_{c1}$; R_{c1} и R_{c2} – наружный и внутренний радиусы промежуточной оболочки; L – длина очага деформации.

Полученная математическая модель расчета продольных напряжений в слоях би- и триметаллической композиционной заготовки включает основные параметры: σ_{S_1} , α_B , f_n , λ , \bar{R}_1 , \bar{R}_2 , η_1 , η_2 , σ_q и позволяет оценить влияние каждого из них на процесс волочения композиционной заготовки, имеющей конкретную конструкцию.

Библиографический список

1. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
2. Маковский В.А., Ейльман Л.С. Биметаллические прутки. – М.: Металлургия, 1981. – 190 с.

Получено 10.11.2010