

УДК 621.793:539.372

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ВЕЛИЧИНЫ ТОРЦЕВОГО ПОДЖАТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПОКРЫТИЕМ

Л.А. ГУРЬЕВА

(Полоцкий государственный университет),

А.Л. ХУДОЛЕЙ

(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)

*Рассмотрены процессы центробежного нанесения покрытий и закалки стальных оболочек с применением индукционного нагрева, используемые в машиностроительном производстве.*

Основными технологическими параметрами указанных процессов являются температура индукционного нагрева и частота вращения оболочки. Для осуществления одновременного вращения и нагрева цилиндрической оболочки ее закрепляют по торцам на установке посредством упругого поджима. Усилие торцевого поджатия оболочки является осевой нагрузкой, а центробежные силы действуют в радиальном направлении. В этой связи, при высокой температуре нагрева и большой частоте вращения оболочки возможно изменение ее геометрии: образование бочкообразной формы и даже разрушение.

Для обеспечения требуемого уровня безопасности производства и стабильного качества продукции важно определить допустимые параметры индукционного нагрева и частоты вращения с учетом прочностных характеристик материала оболочки и вида ее нагружения.

В Полоцком государственном университете и Институте механики и надежности машин (ИМИНМАШ) в рамках выполнения совместной темы 17 ГПФИ «Надежность и безопасность» проводятся исследования, связанные с указанными проблемами.

При изготовлении разного вида конструктивных элементов широко применяется двухслойный металл. При этом сокращается расход высоколегированных дефицитных сталей и цветных металлов.

Реализация возможностей повышения долговечности деталей нанесением упрочняющих слоев возможна на основе изучения поведения слоистых материалов в различных условиях эксплуатации.

Работоспособность разнородных соединений связана с напряженно-деформированным состоянием зоны соединения упрочняющий слой - основной металл. Различие в упругих свойствах упрочняющего и основного металлов приводит к образованию температурных напряжений, претерпевающих скачкообразное изменение в зоне соединения. На разных стадиях цикла нагрев-охлаждение при циклическом изменении температуры они будут изменять величину и знак и при определенном градиенте температур могут приводить к пластической деформации. Разрушение слоистых материалов из-за термической усталости может происходить не только с поверхности, как это имеет место в монолитных материалах, но и с зоны соединения. Место начала разрушения зависит от характера термонапряженного (термодеформированного) состояния и термостойкости соответствующих зон.

Возможны различные варианты разрушения упрочняющего слоя при воздействии изменяющихся температур. При неправильном подборе (для данных условий деформирования) соотношения коэффициентов термического расширения, модулей упругости упрочняющего и основного материалов и неудовлетворительного их сцепления возможно отслоение упрочняющего материала уже при первых циклах термомеханического нагружения.

В работе проведен анализ напряженного состояния детали, тепловая модель которой соответствует рис. 1, принята расчетная схема двух полых цилиндров, деформирующихся совместно.

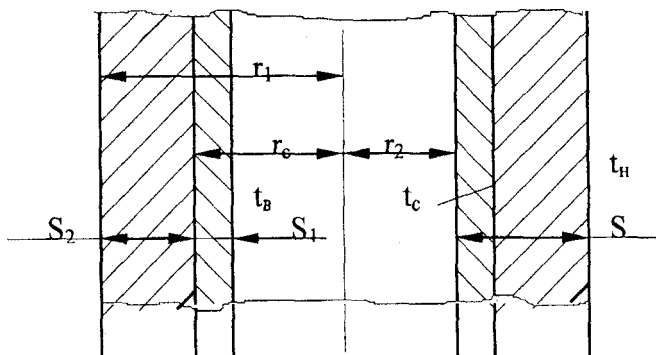


Рис. 1. Тепловая модель напряженного состояния детали

Коэффициент линейного температурного удлинения на границе соединения цилиндров:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}.$$

Коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов (с достаточной для практики точностью) принимались равными

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu \quad \text{и} \quad E_1 = E_2 = E.$$

Для определения радиального, кольцевого температурных напряжений на границе плакировки и основного металла использовались формулы:

$$(\sigma_r)_{r=r_c} = \frac{E\alpha_2(r_c^2 - r_2^2)b}{2(1-\nu)r_c^2} - \frac{E\alpha_1(r_1^2 - r_c^2)a}{2(1-\nu)r_c^2}; \quad (1)$$

$$(\sigma_t)_{r=r_c} = \frac{E}{2(1-\nu)} \left[ \left( 1 + \frac{r_1^2}{r_c^2} \right) \alpha_1 a - (\alpha_1 + \alpha_2) r_c + \left( 1 + \frac{r_2^2}{r_c^2} \right) \alpha_2 b \right], \quad (2)$$

$$\text{где } a = \frac{2 \int_{r_2}^{r_c} t r dt}{r_1^2 - r_2^2}; \quad b = \frac{2 \int_{r_1}^{r_c} t r dr}{r_1^2 - r_2^2},$$

а для определения температуры в любой точке при установившемся тепловом потоке выражение

$$t = \frac{t_g \ln \frac{r}{r_1} + t_n \ln \frac{r_2}{r}}{\ln \frac{r_1}{r_2}}. \quad (3)$$

Кольцевое напряжение на внутренней поверхности биметаллического цилиндра ( $r = r_2$ ) рассчитывалось по формуле

$$(\sigma_t)_{r=r_2} = -\frac{E}{1-\nu} (\alpha_1 t_g - \alpha_1 a - \alpha_2 b), \quad (4)$$

на наружной поверхности ( $r = r_1$ )

$$(\sigma_t)_{r=r_1} = -\frac{E}{1-\nu} (\alpha_2 t_n - \alpha_2 b - \alpha_1 a). \quad (5)$$

В работе рассматривались биметаллические оболочки, изготовленные из стали (внешний цилиндр) и бронзы или латуни (внутренний цилиндр):

$$\begin{aligned} \nu &= 0,3; \quad \alpha_1 = \alpha_{\text{ст}} = 17,5 \cdot 10^{-6}; \quad \alpha_2 = \alpha_{\text{лат}} = 18,9 \cdot 10^{-6}; \quad E = 21 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \alpha_2 = \alpha_{\text{ст}} = 11,9 \cdot 10^{-6}; \\ t_n &= 1100 \text{ }^\circ\text{C}; 700 \text{ }^\circ\text{C}; 360 \text{ }^\circ\text{C}; 350 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_g = 1100 \text{ }^\circ\text{C}; 700 \text{ }^\circ\text{C}; 360 \text{ }^\circ\text{C}; 350 \text{ }^\circ\text{C}; \quad r_1 = 0,25 \text{ м}; \quad r_c = 0,24 \text{ м} \\ r_2 &= 0,23 \text{ м}; 0,22 \text{ м}; 0,21 \text{ м}; 0,20 \text{ м}. \end{aligned}$$

В результате проведенных исследований были построены графики зависимостей  $t = f(r)$  (рис. 2, а, б);  $t_n = f(S_1/S)$  (рис. 3, а, б);  $\sigma_{t(r=r_1)} = f(S_1/S)$  (рис. 4, а) и  $\sigma_{t(r=r_2)} = f(S_1/S)$  (рис. 4, б), откуда видно, что при  $c = (\alpha_1/\alpha_2) \gg 1$  температурные напряжения достигают больших величин.

В работе рассмотрена также сжатая вдоль круглого периметра изотропная цилиндрическая оболочка, внутренняя полость которой занята сплошным наполнителем, связанным с силовой наружной стенкой. Необходимо было найти значение критического напряжения сжатия  $\sigma_{\text{кр}}$ .

Поставленная задача отличается от обычной задачи устойчивости изотропной оболочки тем, что сплошной наполнитель оказывает определенное сопротивление перемещениям отдельных элементов оболочки. Полагалось наличие препятствий лишь в радиальном направлении. При этом со стороны наполнителя на стенку действует радиальная нагрузка интенсивностью  $\alpha$  при ее единичном радиальном перемещении. Следовательно, при радиальном перемещении  $W$  элемента интенсивность нагрузки будет равна  $\alpha W$  и направлена противоположно перемещению.

При осесимметричной форме потери устойчивости в качестве функциональной неизвестной задачи принималось радиальное перемещение  $W = \psi(x)$ . Дополнительными внутренними усилиями изогнутой поверхности оболочки являются кольцевые напряжения  $\sigma_\varphi = E \frac{W}{R}$ , продольные изгибающие моменты  $m_x = -D \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$  и нагрузка со стороны заполнителя интенсивностью  $P_{зан} = -\alpha W$ .

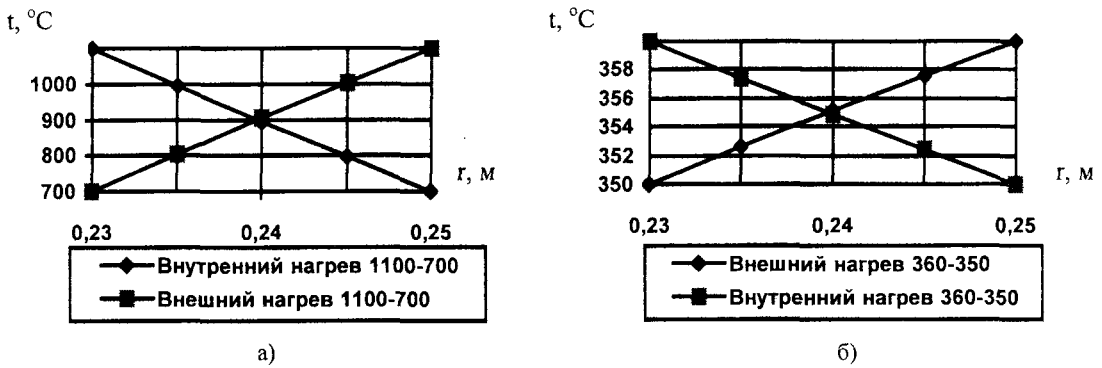


Рис. 2. Графики зависимостей  $t = f(r)$

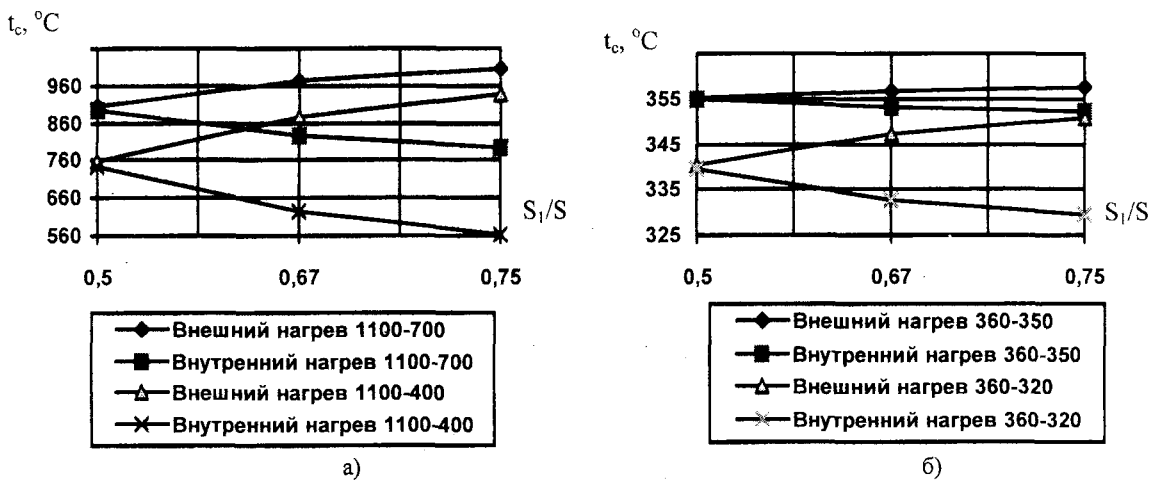


Рис. 3. Графики зависимостей  $t_c = f(S_1/S)$

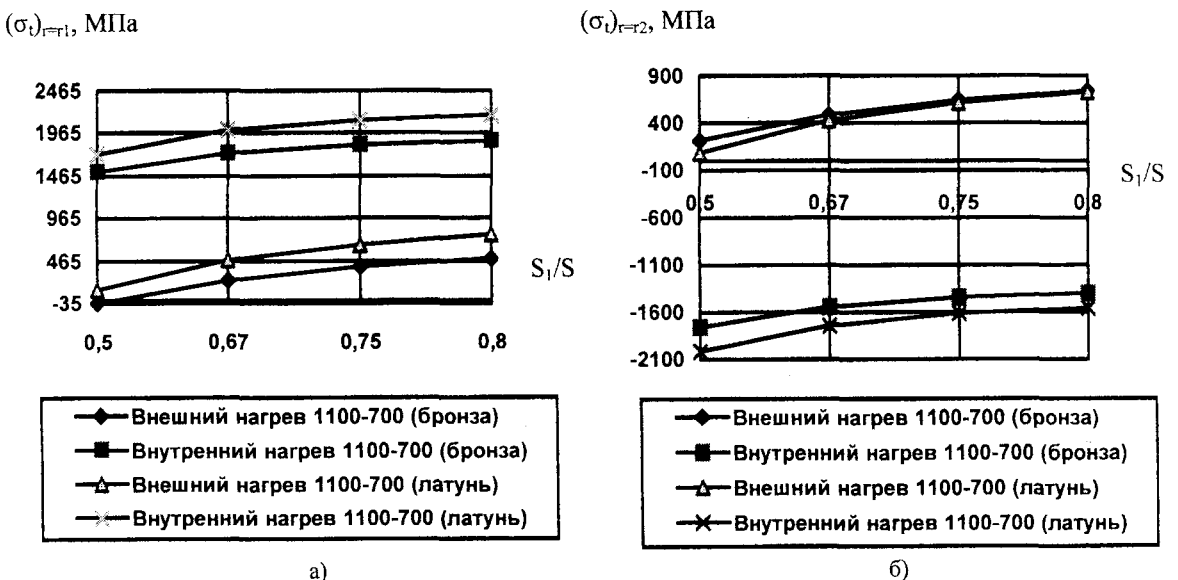


Рис. 4. Графики зависимостей: а -  $\sigma_{l(r=r_1)} = f(S_1/S)$ ; б -  $\sigma_{l(r=r_2)} = f(S_1/S)$

Условие равенства работ внешних и внутренних усилий конструкции, находящейся в состоянии безразличного равновесия, дает возможность найти значение критических напряжений  $\sigma_x = \sigma_{кр}$ :

$$\sigma_{кр} = \frac{D}{\delta} \left( \frac{m\pi}{L} \right)^2 + \frac{\frac{E}{R^2} + \frac{\alpha}{\delta}}{\left( \frac{m\pi}{L} \right)^2}. \quad (6)$$

Выбирая число полуволн  $m$  из условия минимума критических напряжений, получим

$$\sigma_{кр} = \sqrt{4 \frac{ED}{R^2 \delta} \left( 1 + \frac{\alpha R^2}{E \delta} \right)}. \quad (7)$$

Здесь  $E$ ,  $R$ ,  $\delta$  – модуль упругости материала оболочки, внутренний радиус и толщина стенки оболочки соответственно,  $D = E\delta^3 / [12(1-\nu^2)]$  – цилиндрическая жесткость.

Коэффициент «постели» при осесимметричной деформации заполнителя определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{E_{зап}}{(1-\nu_{зап}^2)R} \cdot \frac{1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2}{\left[ \frac{1}{(1+\nu_{зап})} + \frac{1}{(1-\nu_{зап})} \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

где  $E_{зап}$ ,  $\nu_{зап}$ ,  $r_0$ ,  $R$  – соответственно модуль упругости, коэффициент Пуассона материала заполнителя, внутренний и внешний радиусы заполнителя.

В работе коэффициент «постели»  $\alpha$  определяется при  $R = 30, 40, \dots, 250$  мм;  $\nu = 0,32$ ;  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа;  $r_{01} = (R - 3)$  мм;  $r_{02} = (R - 5)$  мм;  $r_{03} = (R - 10)$  мм, а критическое напряжение  $\sigma_{кр}$  при  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0,3$ ;  $R = 30, 40, \dots, 250$  мм;  $\delta = 10$  мм.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов  $\alpha$

R, мм	$r_{01} = (R - 3)$ , мм	$\alpha_1$ , Н/мм <sup>3</sup>	$r_{02} = (R - 5)$ , мм	$\alpha_2$ , Н/мм <sup>3</sup>	$r_{03} = (R - 10)$ , мм	$\alpha_3$ , Н/мм <sup>3</sup>
40	37	199,347	35	346,350	30	768,339
50	47	126,000	45	217,098	40	471,865
60	57	86,782	55	148,053	50	317,281
80	77	48,978	75	81,512	70	173,174
90	87	37,651	85	63,904	80	135,108
100	97	30,730	95	52,069	90	108,549
110	107	25,080	105	43,405	100	89,130
120	117	21,252	115	36,208	110	74,026
130	127	19,635	125	30,140	120	63,077
160	157	12,054	155	19,863	150	40,756
170	167	10,739	165	18,076	160	36,412
190	187	8,527	185	13,971	180	29,121
200	197	7,588	195	12,751	190	26,034

Как показали расчеты, все рассмотренные оболочки относятся к коротким оболочкам и оболочкам средней длины. Но не все они являются устойчивыми.

Из условия равенства нулю осевых деформаций оболочки с покрытием была получена величина торцевого поджатая. Например, для оболочки радиусом  $R = 200$  мм;  $S = 10$  мм;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $a = 11,9 \cdot 10^{-6}$ ;  $t = 1100$  °С;  $700$  °С;  $360$  °С;  $350$  °С сила поджатая оболочки соответственно равна  $N = 32,9$ ;  $20,9$ ;  $10,8$ ;  $10,5$  МН;  $N_{кр} = 9,4$  МН (при  $t = 1100$  °С).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Ярошевич В.К. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий. - Мн.: Наука і тэхніка, 1985.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. - Киев: Наукова думка, 1970.
3. Упрочнение деталей, контактирующих с расплавами металлов / А.В. Вечер, И.М. Кузменко, А.Г. Лупачев и др.; Под общ. ред. С.К. Павлюка, И.М. Кузменко. - Мн.: Наука і тэхніка, 1993.