

зали, что пластинки для металлорежущего инструмента, изготовленные из разработанного сплава, могут успешно использоваться для оснащения токарных резцов (в испытанных режимах) вместо стали Р6М5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1089164 (СССР). Сплав на основе железа/М.В.Ситкевич, Е.И.Бельский, Н.Ф.Невар. — Оpubл. в Б. И., 1984, № 16.

УДК 621.785.5

М.В.СИТКЕВИЧ, канд.техн.наук,  
НГУЕН ВАН ХЪЕН, канд.техн.наук (БПИ)

### ОСТАТОЧНЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ В БОРИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ

Для изучения термонапряженного состояния в поверхностно-упрочненных изделиях рассмотрим кольцевой образец, состоящий из  $n$  слоев различных материалов, индексы которых увеличиваются по мере удаления от общей оси:  $i = 1, 2, \dots, n$ .  $i$ -й слой имеет внутренний радиус  $r_{i-1}$ , наружный  $r_i$  и соответствующие модуль упругости  $E_i$  и коэффициент теплового расширения  $\alpha_i$ .

Можно считать, что в кольцевых образцах осевые термические напряжения отсутствуют. Для определения радиального и тангенциального напряжений  $\sigma_r^i$  и  $\sigma_\theta^i$  в наиболее опасных местах — на границах слоев — предположим, что в результате изменения температур в кольце первоначальная граница между  $i$ -м и  $(i + 1)$ -м слоями переместится.

Так как материал непрерывен при переходе через границу от одного слоя к другому, имеем:

$$U_{iH}^T - U_{(i+1)B}^T = U_{(i+1)B}^P - U_{iH}^P, \quad (1)$$

где  $U_{(i+1)B}^T$ ,  $U_{iH}^T$  — тепловые перемещения внутренней и наружной поверхностей  $(i + 1)$ -го и  $i$ -го слоев соответственно;  $U_{(i+1)B}^P$ ,  $U_{iH}^P$  — перемещения внутренней и наружной поверхностей  $(i + 1)$ -го и  $i$ -го слоев соответственно в результате действия радиального напряжения  $\sigma_r^i$  на границе  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го слоев.

Значения  $U_i^T$  и  $U_i^P$  определяются из следующих выражений [1]:

$$U_{iH}^T = \frac{2\alpha_i r_i}{r_i^2 - r_{i-1}^2} \int_{r_{i-1}}^{r_i} T r dr + \delta_i r_i; \quad (2)$$

$$U_{(i+1)B}^T = \frac{2\alpha_{i+1} r_i}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_{i+1}} T r dr + \delta_i r_i;$$

$$U_{iH}^p = \frac{1 - \mu_i}{E_i} \frac{\sigma_{i-1}^r r_{i-1}^2 - \sigma_i^r r_i^2}{r_i^2 - r_{i-1}^2} r_i + \frac{(1 - \mu_i) r_{i-1}^2 r_i^2 (\sigma_{i-1}^r - \sigma_i^r)}{E_i r_i (r_i^2 - r_{i-1}^2)}; \quad (3)$$

$$U_{(i+1)B}^p = \frac{1 - \mu_i}{E_{i+1}} \frac{\sigma_i^r r_i^2 - \sigma_{i+1}^r r_{i+1}^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} r_i + \frac{(1 - \mu_{(i+1)}) r_i^2 r_{i+1}^2 (\sigma_i^r - \sigma_{i+1}^r)}{E_{i+1} r_i (r_{i+1}^2 - r_i^2)},$$

где  $\delta_i$  – относительное изменение объема материала в  $i$ -м слое в результате фазовых превращений (если они имеют место при данном режиме нагрева или охлаждения);  $\mu_i$  – коэффициент Пуассона материала.

Введем следующие обозначения:

$$N_i = 2/(1 - \rho_{i-1}^2); \quad M_i = 2\rho_i^2/(1 - \rho_i^2);$$

$$P_i = -\mu + (1 + \rho_{i-1}^2)/(1 - \rho_{i-1}^2); \quad Q_i = \mu_i + (1 + \rho_{i-1}^2)/(1 - \rho_{i-1}^2),$$

где  $\rho = r_i/r_{i+1}$ .

Учитывая, что  $\int_{r_{i-1}}^{r_i} T r dr = r_i^2 \int_{\rho_{i-1}}^1 T \rho d\rho$ , после подстановки выражений (2) и (3) в формулу (1), получим:

$$\alpha_{i+1} N_{i+1} \int_{\rho_i}^1 T \rho d\rho - \alpha_i N_i \int_{\rho_{i-1}}^1 T \rho d\rho = -\frac{M_{i-1}}{E_i} \sigma_{i-1}^r + \left( \frac{Q_{i+1}}{E_{i+1}} + \frac{P_i}{E_i} \right) \sigma_i^r - \frac{N_{i+1}}{E_{i+1}} \sigma_{i+1}^r. \quad (4)$$

Приняв  $i$  от 1 до  $(n-1)$ , из уравнения (4) получим систему  $(n-1)$  уравнений, содержащих  $(n-1)$  неизвестных  $\sigma_1^r, \sigma_2^r, \dots, \sigma_{n-1}^r$ . Если имеют место внешние давления ( $\sigma_0^r \neq 0, \sigma_n^r \neq 0$ ), их значения должны быть заданы, и они также входят в систему (4).

Тангенциальные напряжения на внутренней и наружной поверхностях каждого  $i$ -го слоя определяются по формулам:

$$\sigma_{iB}^{\theta} = \alpha_i E_i \left[ N_i \int_{\rho_{i-1}}^1 T \rho d\rho - T_{iB} \right] + \sigma_{i-1}^r (Q - \mu_i) - \sigma_i^r N_i; \quad (5)$$

$$\sigma_{iH}^{\theta} = \alpha_i E_i \left[ N_i \int_{\rho_{i-1}}^1 T \rho d\rho - T_{iH} \right] + \sigma_{i-1}^r \mu_{i-1} - \sigma_i^r (Q_i - \mu_i),$$

где  $T_{iB}, T_{iH}$  – температура на внутренней и наружной поверхностях  $i$ -го слоя.

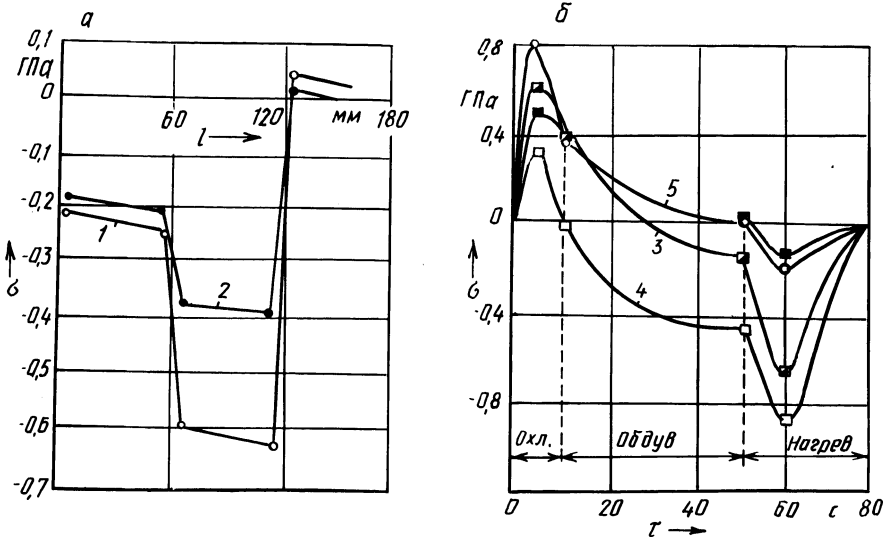


Рис. 1. Остаточные напряжения в боридном слое (а) и изменение термических напряжений в кольцевых борированных (■, □, ■) и неборированных образцах стали 45 в процессе термоциклирования (б):

1 — охлаждение на воздухе; 2 — в воде; 3 — в фазе FeB; 4 — в фазе Fe<sub>2</sub>B; 5 — в матрице стали (нагрев в свинцовой ванне при 700 °С, охлаждение в воде,  $a = 50 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{С})$ ); l — расстояние от поверхности; τ — время процесса

T в формулах (2), (4), (5) определяется как разность начальной и рабочей температур. Остаточные напряжения рассчитывают по уравнениям (4) и (5) с учетом

$$\alpha_i N_i \int_{\rho_{i-1}}^1 T \rho d\rho = \alpha_i \Delta T,$$

где  $\Delta T$  — разность нормальной (комнатной) и температуры, при которой материал переходит из пластичного состояния в упругое в процессе охлаждения. Если для двух слоев i и (i + 1) существуют различные  $\Delta T$ , то в уравнение (4) входит наименьшее из них.

Результаты расчета остаточных напряжений в борированных слоях (случай  $n = 3$  — двухфазный диффузионный слой с одинаковым содержанием FeB и Fe<sub>2</sub>B и  $n = 2$  — однофазный слой) с учетом фазовых превращений стали 45 представлены на рис. 1, а. Следует отметить, что различные условия охлаждения образцов, а следовательно, и разные степени фазовых превращений, приводят к наличию различных остаточных напряжений. Мартенситное превращение сопровождается увеличением объема матрицы и снижением уровня остаточных напряжений. Важно отметить также, что тангенциальные напряжения являются сжимающими и на порядок выше, чем растягивающие радиальные. В отличие от тангенциальных, которые мало зависят от толщины диффузионного слоя, радиальные напряжения возрастают примерно пропорционально толщине слоя и определяют склонность его к скалыванию: чем больше толщина диффузионного слоя, тем выше склонность его к скалыванию. Поэтому инструмент, работающий в условиях динамических нагрузок, желательно упрочнять.

В процессе термоциклирования наиболее опасным следует считать период охлаждения, так как именно на этой стадии в образцах возникают растягивающие напряжения. В борированных образцах, критерии  $Bi$  которых при охлаждении такие же, как и у неборированных, максимальные растягивающие напряжения в матрице находятся практически на том же уровне, что и в неборированных (меньше лишь на  $\sigma_1'$ ). Однако если испытания осуществляются при одинаковых режимах, то для борированных образцов условия теплопередачи оказываются всегда менее жесткими, чем для неборированных, благодаря термическому сопротивлению боридных покрытий. Так, например, при коэффициенте теплопередачи  $a = 50 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  для неборированных колец  $Bi = 21$ , для борированных же (двухфазные слои толщиной 200 мкм) — 13,5. В этих условиях охлаждения максимальное напряжение в неборированном кольце достигает 800 МПа и более, в то время как в бориде  $\text{FeB} - 650$ ,  $\text{Fe}_2\text{B} - 360$ , а в матрице — 520 МПа. Совершенно очевидно, что борирование благоприятно сказывается на термонапряженном состоянии стальных колец. Вместе с тем следует отметить, что предел прочности боридного слоя на растяжение (255–275 МПа) в несколько раз меньше предела прочности стали (600–700 МПа), а амплитуда цикла максимальных термических напряжений при термоциклировании в боридных покрытиях больше, чем в поверхностном слое неборированных образцов. Это, как показали эксперименты, обуславливает раннее появление термоусталостных трещин на борированных образцах.

Наиболее важными факторами, определяющими термонапряженное состояние диффузионно-упрочненных сталей при термоциклировании, являются: 1) условия нагрева и охлаждения (критерий  $Bi$ ); 2) толщина диффузионного слоя; 3) физико-механические свойства диффузионного слоя. Регулируя эти факторы, можно изменять термонапряженное состояние деталей, например, подбирать такие покрытия и условия теплопередачи, чтобы в диффузионном слое действовали только сжимающие напряжения ( $\sigma_{2в}^\theta \leq 0$ ). Для этого необходимо, чтобы удовлетворялось условие

$$P_{0 \max} \leq \frac{(a_1 - a_2) \Delta T}{a_1 N_1 - a_2 N_2 \theta}$$

где  $P_{0;1} = \int_0^1 T \rho d\rho$ ,  $\theta = P_1/P_0$ ;  $a_1, a_2$  — коэффициенты теплового расширения стали и покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко А.Д. Термоупругость. — Киев: Вища школа, 1975. — 216 с.