

УДК 621.81

UDC 621.81

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕННОСТИ В СИСТЕМЕ  
ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА В ПРОЦЕССЕ  
РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО  
СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**THEORETICAL STUDIES OF TENSION IN  
THE COATING - SUBSTRATE SYSTEM IN  
THE PROCESS OF IMPLEMENTATION OF  
THE COMBINED METHOD OF RESTORING  
OF WORN DETAILS OF MACHINES**

Чурилов Дмитрий Геннадьевич  
аспирант

Churilov Dmitry Gennadievich  
postgraduate student

*Рязанский государственный агротехнологический  
университет имени П.А. Костычева, Рязань,  
Россия*

*Ryazan State Agrotechnological University named  
after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

В статье исследованы остаточные напряжения в покрытии, которые формируются при постепенном приложении удельной рабочей нагрузки и температуры до некоторых окончательных значений

The article is devoted to the residual on-tolerances in the coating, which are formed with the gradual application of the specific working load and temperature to some of the final values

Ключевые слова: НАПРЯЖЕННОСТЬ,  
КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ,  
ВОССТАНОВЛЕНИЕ, ДЕТАЛЬ

Keywords: TENSIONS, COMBINED WAY,  
RESTORE, PART

Остаточные напряжения являются одной из причин разрушения покрытий. Однако необходимо отметить, что из-за многообразия факторов, влияющих на возникновение остаточных напряжений, и сложности их математического описания, многие аспекты прогнозирования и регулирования значений и знака напряжений остаются открытыми.

Для оценки свойств покрытий используются такие понятия, как модуль упругости, коэффициенты линейного расширения, Пуассона, теплопроводности и т.д., усредненные по объему значительно большему, чем объем отдельно взятой капли расплавленного металла. Поэтому кристаллизацию отдельно взятых капель при комбинированном способе обработки можно заменить модельным непрерывным процессом и проводить расчеты на основании существующих теорий физики и механики сплошной среды.

При рассмотрении наплавленного покрытия как сплошной среды, в первую очередь, представляют интерес остаточные напряжения первого рода, уравнивающиеся в объеме, соизмеримом с размерами всей

детали. В этом случае замена кристаллизации отдельно взятых капель модельным непрерывным процессом является оправданной [1]. Впервые такое модельное рассмотрение в рамках теории упругости было использовано в работе [2] и получило подтверждение в работе [3]. При этом многие определяют температурную составляющую остаточных напряжений, рассматривая окончательно сформировавшееся покрытие. В действительности же остаточные напряжения формируются при постепенном приложении удельной рабочей нагрузки и температуры до некоторых окончательных значений.

При определении остаточных напряжений в покрытиях, полученных ЭИС, приняли, как и авторы работы [4], следующую модель процесса: длина образца достаточно велика по сравнению с его диаметром; в процессе наплавки возникает подвижное квазистационарное температурное поле; остаточные напряжения возникают в результате наплавки и охлаждения образца до температуры окружающей среды.

Наплавленное покрытие рассматривали, как сплошную среду (пористость покрытий не более 5%), что позволяло рассматривать задачу в рамках феноменологических теорий теплообмена и механики сплошной среды.

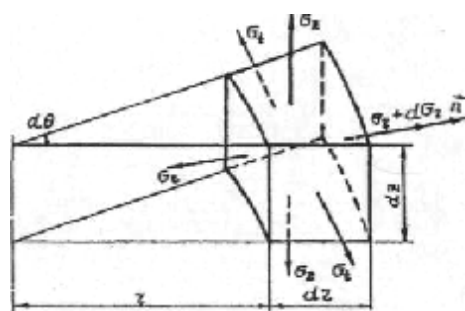


Рисунок 1. - Схема элементарного участка цилиндрического стержня с действующими напряжениями

Ввиду того, что процесс наплавки занимает малое время, будем считать, что температурное поле является постоянным в направлении оси цилиндра  $Z$  и симметричным относительно ее. Оно изменяется только по радиусу  $r$ , т. е.  $T = T(r)$ , и остается постоянным в окружном направлении  $Q$  (рис. 1). Напряжения,

возникающие при этом, можно определять как для осесимметричной задачи теории упругости в цилиндрических координатах [5].

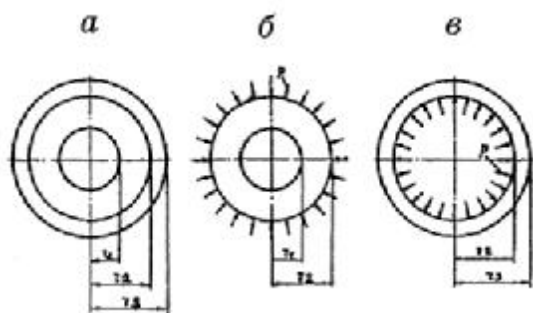


Рисунок 2. - Схема для расчета остаточных напряжений в наплавленном цилиндрическом стержне

Так как после наплавки цилиндрическая деталь получается двухслойной, будем обозначать слои порядковыми номерами 1 и 2, начиная от центра. При этом внутренний радиус первого слоя обозначим  $r_1$ , радиус границы слоев обозначим  $r_2$ , внешний радиус второго слоя —  $r_3$  (рис. 2).

При описанном выше модельном процессе площадки, проведенные в детали перпендикулярно к осям  $Z$ ,  $r$  и  $\varphi$  будут главными площадками и на них будут возникать только нормальные напряжения  $\sigma_{iz}$ ,  $\sigma_{ir}$ ,  $\sigma_{i\theta}$ . Обозначим  $u_i'$  перемещение в направлении оси  $Z$ , а  $u_i$  в направлении радиуса  $r$ , где  $i$  порядковый номер слоя.

Условия равновесия в этом случае будут описаны уравнениями:

$$r \frac{\partial s_{ir}}{\partial r} + s_{ir} - s_{iq} = 0; \quad \sum_{i=1}^n \int_{r_1}^{r_{i+1}} s_{iz} r dr = 0. \quad (1)$$

Кинематические уравнения для  $i$ -го слоя можно представить в виде:

$$e_{iz} = \frac{\partial w_i}{\partial z}; \quad e_{ir} = \frac{\partial u_i}{\partial r}; \quad e_{iq} = \frac{u_i}{r}. \quad (2)$$

Физические уравнения с учетом температуры для  $i$ -го слоя запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} s_{iz} &= 2G_i e_{iz} + l_i l_i - h_i T_i; \\ s_{ir} &= 2G_i e_{ir} + l_i l_i - h_i T_i; \\ s_{iq} &= 2G_i e_{iq} + l_i l_i - h_i T_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l_i$  - относительная объемная деформация ( $l_i = e_{iz} + e_{ir} + e_{iq}$ );  $h_i = E_i \alpha_i / (1 - 2m_i)$  — постоянная величина для данного

слоя;  $G_i = 0,5E_i / (1 + m_i)$  — модуль сдвига;  $I_i = 2m_i G_i / (1 - 2m_i)$  — постоянная Ляме;  $E_i$  — модуль Юнга;  $\mu_i$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha_i$  — коэффициент линейного расширения.

Решая совместно уравнения (2.12...2.14), получим дифференциальное уравнение для  $i$ -го слоя:

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d(u_i r)}{dr} + \frac{1 + m_i}{1 - m_i} a_i T_i \right) = 0. \quad (4)$$

Проинтегрировав полученное уравнение дважды получим формулу:

$$u_i = C_i r + \frac{D_i}{r} + \frac{1 + m_i}{1 - m_i} \cdot \frac{a_i}{r} \int_{r_i}^r T_i(r) dr, \quad (5)$$

где  $C_i, D_i$  — постоянные интегрирования.

Зная радиальное перемещение  $u_i$ , определим напряжения в слоях, получим уравнения: (6)

$$\begin{aligned} s_{ir} &= \frac{E_i}{1 - m_i^2} \left[ C_i (1 + m_i) - \frac{D_i}{r^2} (1 - m_i) \frac{a_i}{r^2} \int_{r_i}^r r T_i(r) dr \right]; \\ s_{iq} &= \frac{E_i}{1 - m_i^2} \left[ C_i (1 + m_i) + \frac{D_i}{r^2} (1 - m_i) a_i \left( T_i(r) - \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r r T_i(r) dr \right) \right]; \\ s_{iz} &= \frac{E_i}{(1 + m_i)(1 - 2m_i)} \left[ (1 - m_i) e_z + 2m_i C_i \right] - \frac{E_i a_i}{1 - m_i} T_i(r). \end{aligned} \quad (5)$$

Относительная деформация  $\varepsilon_z$ , входящая в формулу для  $\sigma_{iz}$ , определится из условия совместности деформаций слоев  $\varepsilon_{1z} = \varepsilon_{2z} = \varepsilon_z$ :

$$e_z = \sum_{i=1}^m \left( \frac{E_i a_i}{1 - m_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + \frac{E_i m_i (r_i^2 - r_{i+1}^2)}{(1 + m_i)(1 - 2m_i)} C_i \right) / \sum_{i=1}^m B_i, \quad (7)$$

где  $B_i = \frac{E_i (1 - m_i) (r_{i+1}^2 - r_i^2)}{2(1 + m_i)(1 - 2m_i)}$ ,  $m$  — число слоев ( $m = 2$ ).

Когда температура наплавленного слоя падает до некоторой величины  $T_2$ , между наплавленным слоем и основной деталью возникает адгезионная

связь. При дальнейшем остывании, ввиду различного значения коэффициентов линейного расширения, между наплавляемым слоем и основной деталью на границе возникает давление  $P$ . Давление  $P$  и постоянные интегрирования  $C_i, D_i$  определим из граничных условий:

$$\text{при } r = r_1 \quad \sigma_{1r} = 0;$$

$$\text{при } r = r_2 \quad \sigma_{1r} = -P, \quad \sigma_{2r} = -P, \quad u_1 = u_2;$$

$$\text{при } r = r_3 \quad \sigma_{2r} = 0.$$

Используя эти условия, получим: (8)

$$P = \sum_{i=1}^m \left[ (-1)^{i-1} \frac{2a_i}{(1-m_i)(r_{i+1}^2 - r_i^2)} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr \right] /$$

$$/ \sum_{i=1}^m \left[ \frac{(1-m_i)r_{i+1}^2 + (1+m_i)r_i^2}{E_i(r_{i+1}^2 - r_i^2)} \right];$$

$$C_i = \frac{1-m_i}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ \frac{a_i}{1-m_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + (-1)^i \frac{r_{i+1}^2}{E_i} P \right];$$

$$D_i = \frac{(1+m_i)r_i^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ \frac{a_i}{1-m_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + (-1)^i \frac{r_{i+1}^2}{E_i} P \right].$$
(5)

В процессе наплавки на деталь попадает расплавленный материал при некоторой температуре  $T$ . Частицы расплавленного материала при соприкосновении с поверхностью детали быстро остывают и, как показано в работе [5], к моменту сцепления наплавляемого материала с деталью температура его равна  $T_2$  ( $T_2 = 150... 250$  °C). Следовательно, на внешней поверхности детали ( $r = r_2$ ) можно принять расчетную температуру  $T_2$ . С уменьшением радиуса  $r$  она будет резко падать, так как продолжительность наплавки небольшая и температура не успевает достичь больших значений на достаточной глубине. Проведенные нами предварительные теоретические и экспериментальные исследования показали, что с достаточной точностью распределение температуры по радиусу можно записать зависимостью:

$$T(r) = T_0 + (T_2 - T_0) \left( \frac{r}{r_2} \right)^n,$$

где  $T_0$  — температура в центре заготовки ( $r = 0$ ) в предположении, что она сплошная;  $n$  — положительное число.

Относительно наплавляемого слоя, учитывая его небольшую толщину, температуру можно считать постоянной по толщине и равной  $T_2$ .

В детали в момент наплавки будут возникать напряжения от неравномерного распределения температуры. Эти напряжения будем называть напряжениями наплавки и обозначать с индексом « $n$ ». Напряжения наплавки в детали  $s_{1z}^n, s_{1r}^n, s_{1q}^n$  определим при  $m = 1$  и  $P = 0$ . Напряжения наплавки в наплавляемом слое отсутствуют  $s_{2z}^n = s_{2r}^n = s_{2q}^n = 0$ .

В дальнейшем при остывании также будут возникать остаточные напряжения, которые будем обозначать с индексом « $o$ ». Для определения остаточных напряжений остывания в детали необходимо принять:

$$T_1(r) = - \left[ T_0 + (T_2 - T_0) \left( \frac{r}{r_2} \right)^n \right], \text{ а для наплавляемого слоя } T_2(r) = -T_2.$$

В результате остаточные напряжения будут складываться из напряжений, возникающих в процессе наплавки, и напряжений, возникающих при остывании:

$$s_{ir} = s_{ir}^n + s_{ir}^o; \quad s_{i0} = s_{i0}^n + s_{i0}^o; \quad s_{iz} = s_{iz}^n + s_{iz}^o.$$

Таким образом, как в детали, так и в наплавленном слое остаточные напряжения будут создавать объемное напряженное состояние, которое необходимо учитывать при расчетах на прочность восстановленных деталей.

Полученные расчетные соотношения позволили разработать алгоритм и составить программу для численных исследований остаточных

напряжений.

Кроме того, экспериментально установлено, что при совмещении электроимпульсного способа с отделочно-упрочняющей обработкой резанием и поверхностным пластическим деформированием на поверхности детали действуют незначительные по величине сжимающие остаточные напряжения.

Напряжения, возникающие в поверхностном слое восстановленной и упрочненной детали, в процессе эксплуатации последней накладываются на остаточные напряжения, сформированные комбинированным способом обработки. Суммирование остаточных напряжений с рабочими сказывается на усталостной прочности всего изделия в целом. Поэтому необходимо учитывать влияние, как остаточных напряжений, так и рабочих на эксплуатационные свойства упрочненных и восстановленных комбинированным способом обработки деталей. Условие прочности материала детали при сложном напряженном состоянии можно выразить следующей зависимостью:  $t_{окт} + h_0 s_{окт} = C$ , (9)

где  $\tau_{окт}$  и  $\sigma_{окт}$  — касательные и нормальные напряжения соответственно на октаэдрической площадке, которые можно получить по формулам:

$$t_{окт} = \frac{1}{3} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2}; \quad (10)$$

$$s_{окт} = \frac{1}{3} \sqrt{s_1 + s_2 + s_3}, \quad (11)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения;  $C$  и  $\eta_0$  — коэффициенты, определяющиеся через предельные напряжения при растяжении и сжатии.

При осевом растяжении в предельном состоянии:  $\sigma_1 = \sigma_p; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ .

Тогда при этом условии:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{3} s_p + \frac{1}{3} h_0 \cdot s_p &= C; \\ t_{окт} &= \frac{\sqrt{2}}{3} s_p; \quad s_{окт} = \frac{1}{3} s_p. \end{aligned} \quad (5)$$

При осевом сжатии в предельном состоянии:  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = -\sigma_c$ .

В этом случае:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{3} s_c - \frac{1}{3} h_0 \cdot s_c &= C; \\ t_{окт} &= \frac{\sqrt{2}}{3} s_c; \quad s_{окт} = -\frac{1}{3} s_c. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая совместно уравнения, получим:

$$h_0 = \frac{\sqrt{2}(s_c - s_p)}{s_c + s_p}; \quad C = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{s_c \cdot s_p}{(s_c + s_p)}, \quad (12)$$

где  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  — предельные напряжения при растяжении и сжатии соответственно.

Для определения коэффициентов  $C$  и  $\eta_0$  рассмотрим случай, когда деталь испытывается на кручение. Обозначим предельное касательное напряжение при кручении через  $\tau_k$ . Тогда  $\sigma_1 = \tau_k$ ;  $\sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = -\tau_k$  октаэдрические напряжения, при принятых условиях соответствуют:

$$t_{окт} = \frac{\sqrt{6}}{3} t_k; \quad s_{окт} = 0.$$

Таким образом, уравнение (12) примет вид: (13)

$$\frac{\sqrt{6}}{3} t_k = C. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения, получим:

$$h_0 = \frac{\sqrt{6}t_k - \sqrt{2}s_p}{s_p}. \quad (14)$$

Анализ показывает, что в тех случаях, когда  $\sigma_{окт} > 0$  (растяжение), сдвиги начинаются при меньшей величине касательного напряжения  $\tau_{окт}$ , чем при  $\sigma_{окт} < 0$  (сжатие). Таким образом, на разрушение материала, кроме касательных напряжений, оказывают влияние и нормальные напряжения, возникающие на площадках сдвига.

При этом, если на площадке сдвига возникают растягивающие



нормальные напряжения, то они уменьшают трение и способствуют сдвигу, если сжимающие нормальные напряжения, то они увеличивают трение и препятствуют сдвигу.

Установлено [6], что амплитуда предельных напряжений цикла для большинства материалов уменьшается с ростом растягивающих средних напряжений и увеличивается с ростом сжимающих. Поэтому условие (14) используется для определения влияния остаточных напряжений на величину амплитуды предельных напряжений при усталостном разрушении материала детали [7].

Левую часть условия (14) обычно называют эффективным касательным напряжением и записывают:  $\tau_{\varepsilon} = \tau_{окт} \pm \eta\sigma_{окт}$ . (15)

При переменных напряжениях коэффициент  $\eta$  отличается от  $\eta_0$ . Для определения влияния остаточных напряжений на величину амплитуды предельных напряжений воспользуемся предположением о том, что предельная для данного материала амплитуда изменений эффективного касательного напряжения остается неизменной с изменением величины среднего напряжения цикла [7]. Однако, необходимо иметь в виду, что величина среднего напряжения цикла ограничивается пределами текучести при соответствующих статических нагрузках.

Любые циклические напряжения могут быть представлены как результат наложения переменного напряжения  $\sigma_v$ , изменяющегося по симметричному циклу с амплитудой  $\sigma_a$  ( $\sigma_v = \sigma_a \sin\omega t$ ), на постоянные напряжения  $\sigma_m$ .

Для трехосного напряженного состояния амплитудные напряжения на главных площадках обозначим:  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a} > \sigma_{3a}$ . Постоянные напряжения на этих же площадках обозначим:  $\sigma_{1m}$ ,  $\sigma_{2m}$ ,  $\sigma_{3m}$ . Индексы 1, 2, 3 для постоянных напряжений соответствуют индексам амплитудных напряжений. Поэтому условие  $\sigma_{1m} > \sigma_{2m} > \sigma_{3m}$  может не соблюдаться.

Рассмотрим случай, когда напряжения на главных площадках изменяются синфазно по симметричному циклу. Положение о постоянстве амплитуды позволяет приравнять предельную величину амплитуды эффективных касательных напряжений для сложного напряженного состояния к предельной величине амплитуды эффективных касательных напряжений для одноосного напряженного состояния, в котором наибольшее главное нормальное напряжение  $\sigma_{iv \text{ (max)}}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) изменяется по симметричному циклу.

Если главные напряжения изменяются синфазно и по симметричному циклу, то отношения главных напряжений постоянны в любой момент времени. Примем одно из трех главных переменных напряжений за основное и обозначим его  $S_{iv}^0$ . Найдем отношение всех главных

амплитудных напряжений к основному:  $k_i = \frac{S_{iv}}{S_{iv}^0} = \frac{S_{ia}}{S_{ia}^0}$ ,

(16)

$$\text{то есть } k_1 = \frac{S_{1v}}{S_{iv}^0} = \frac{S_{1a}}{S_{ia}^0}, k_2 = \frac{S_{2v}}{S_{iv}^0} = \frac{S_{2a}}{S_{ia}^0}, k_3 = \frac{S_{3v}}{S_{iv}^0} = \frac{S_{3a}}{S_{ia}^0}.$$

$$\text{Таким образом: } S_{1v} = k_1 S_{iv}^0; S_{2v} = k_2 S_{iv}^0; S_{3v} = k_3 S_{iv}^0. \quad (17)$$

Подставляя (16, 17) определим октаэдрические напряжения, изменяющиеся по симметричному циклу:

$$t_{(v)окт} = \frac{1}{3} S_{iv}^0 \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - k_1)^2};$$

$$S_{(v)окт} = \frac{1}{3} S_{iv}^0 (k_1 + k_2 + k_3).$$

Обозначим: (18)

$$\left. \begin{aligned} Y_a &= \frac{1}{3} \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - k_1)^2}; \\ I_a &= \frac{1}{3} (k_1 + k_2 + k_3). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом:  $t_{v(окм)} = y_a s_{iv}^0; s_{v(окм)} = l s_{iv}^0.$  (19)

Таким образом, если принять за предельную величину сложного напряженного состояния  $\sigma_{ia(max)}$  ее значение для одноосного растяжения-сжатия, и определить величину амплитуды эффективных касательных напряжений для сложного напряженного состояния, то отношение пределов выносливости для простого и сложного напряженных состояний будет обратно пропорционально отношению амплитуд эффективных

касательных напряжений:  $x_c = \frac{A_{-1}}{A_c},$

(20)

где  $A_{-1}$  — предельная амплитуда эффективных касательных напряжений для симметричного одноосного растяжения-сжатия;  $A_c$  — амплитуда эффективных касательных напряжений для сложного напряженного состояния.

Амплитуда  $A_c$  определяется:

$$A_c = \frac{t_{\varepsilon(max)} - t_{\varepsilon(min)}}{2}. \tag{21}$$

Согласно формуле (21) получим: (22)

$$\left. \begin{aligned} t_{\varepsilon(max)} &= t_{v(окм)}^{max} + h s_{v(окм)}^{max} = y_a s_{iv(min)}^0 + h l_a s_{iv(max)}^0; \\ t_{\varepsilon(max)} &= t_{v(окм)}^{min} - h s_{v(окм)}^{min} = y_a s_{iv(min)}^0 - h l_a s_{iv(min)}^0. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Так как напряжения изменяются по симметричному циклу, тогда:

$$s_{iv(max)}^0 = s_{ia}^0; s_{iv(min)}^0 = -s_{ia}^0.$$

С учетом этого выражения (2.35) принимают вид: (23)

$$\left. \begin{aligned} t_{\varepsilon(max)} &= y_a s_{ia}^0 + h l_a s_{ia}^0; \\ t_{\varepsilon(min)} &= -y_a s_{ia}^0 + h l_a s_{ia}^0. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Таким образом, получим:

$$A_c = y_a s_{ia}^0. \quad (24)$$

Для определения амплитуды  $A_{-1}$  рассмотрим одноосное растяжение-сжатие с напряжением  $s_{1v(max)}^{p-c} = s_{iv(max)} = s_{iv}^0 k_{i(max)}$ .

При  $s_{2v}^{p-c} = s_{3v}^{p-c} = 0$  и, согласно выражениям (23 и 24), получим:

$$k_1^{p-c} = 1; k_2^{p-c} = k_3^{p-c} = 0, y_a^{p-c} = \frac{\sqrt{2}}{3}.$$

Переходя к амплитудным напряжениям:

$$s_{1a}^{p-c} = s_{ia(max)} = s_{ia(max)}^0 k_{i(max)}.$$

Подставляя вместо  $\psi_a$  значение  $y_a^{p-c}$ , а вместо  $s_{ia}^0$  значение  $s_{1a}^{p-c}$ , находим амплитуду эффективных касательных напряжений для одноосного растяжения-сжатия:

$$A_{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} s_{ia}^0 k_{i(max)} = \frac{\sqrt{2}}{3} s_{-1} \quad (25)$$

т.е.  $s_{ia}^0 k_{i(max)} = s_{-1}$ .

Таким образом:

$$x_c = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{k_{i(max)}}{y_a},$$

(26)

где  $k_{i(max)} = \frac{s_{ia(max)}}{s_{ia}^0}$  - наибольшее значение из трех величин  $k_1; k_2; k_3$ .

Выбираем в качестве основного - наибольшее амплитудное главное напряжение  $s_{ia}^0 = s_{1a}$ , то  $k_{i(max)} = 1$ :

$$x_c = \frac{\sqrt{2}}{2y_a}. \quad (27)$$

Далее рассмотрим случай, когда напряжения на главных площадках

трехосного напряженного состояния изменяются во времени синфазно и по несимметричным циклам. В этом случае, кроме напряжений  $\sigma_{1v}, \sigma_{2v}, \sigma_{3v}$  изменяющихся по симметричным циклам с амплитудными напряжениями соответственно  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a} > \sigma_{3a}$ , будут возникать средние (постоянные) напряжения  $\sigma_{1m}, \sigma_{2m}, \sigma_{3m}$ . Выразим среднее напряжение через предел выносливости при одноосном симметричном цикле:

$$\left. \begin{aligned} s_{1m} &= m_1 s_{-1}; \\ s_{2m} &= m_2 s_{-1}; \\ s_{3m} &= m_3 s_{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Для амплитудных напряжений, как и ранее, сохраняются соотношения (28). Запишем средние напряжения на октаэдрической площадке:

$$\begin{aligned} s_{m(окт)} &= \frac{1}{3}(s_{1m} + s_{2m} + s_{3m}) = \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3) s_{-1}; \\ t_{m(окт)} &= \frac{1}{3} \sqrt{(s_{1m} - s_{2m})^2 + (s_{2m} - s_{3m})^2 + (s_{3m} - s_{1m})^2} = \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{(m_1 - m_2)^2 + (m_2 - m_3)^2 + (m_3 - m_1)^2} s_{-1}. \end{aligned}$$

Введем обозначения: (29)

$$\left. \begin{aligned} y_m &= \frac{1}{3} \sqrt{(m_1 - m_2)^2 + (m_2 - m_3)^2 + (m_3 - m_1)^2}; \\ l_m &= \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Таким образом:  $t_{m(окт)} = y_m s_{-1}; s_{m(окт)} = l_m s_{-1}$ . (30)

Циклические напряжения на октаэдрической площадке записываются как сумма средних напряжений (30) и напряжений, изменяющихся во времени по симметричному циклу: (31)

$$\left. \begin{aligned} t_{c(окт)} &= t_{m(окт)} + t_{v(окт)} = y_m s_{-1} + y_a s_{iv}^0; \\ s_{c(окт)} &= s_{m(окт)} + s_{v(окт)} = l_m s_{-1} + l_a s_{iv}^0. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Эффективное октаэдрическое напряжение согласно формуле (32) соответствует:  $t_{эс} = t_{c(окт)} \pm h' s_{c(окт)}$ .

Амплитуду эффективных касательных октаэдрических напряжений для несимметричного цикла определим:  $A_{mc} = \frac{t_{эс}^{max} - t_{эс}^{min}}{2}$ , (33)

Таким образом: (34)

$$\left. \begin{aligned} t_{эс}^{max} &= y_m s_{-1} + y_a s_{iv(max)}^0 + h_0 l_m s_{-1} + h l_a s_{iv(max)}^0; \\ t_{эс}^{min} &= y_m s_{-1} + y_a s_{iv(min)}^0 - (h_0 l_m s_{-1} + h l_a s_{iv(min)}^0). \end{aligned} \right\} \quad (5.35)$$

Коэффициент  $\eta_0$  относится к средним (постоянным) напряжениям, коэффициент  $\eta$  к напряжениям, изменяющимся по симметричному циклу. Если учесть, что  $s_{iv(max)}^0 = s_{ia}^0$ ;  $s_{iv(min)}^0 = -s_{ia}^0$ , получим: (35)

$$\left. \begin{aligned} t_{эс}^{max} &= y_m s_{-1} + y_a s_{ia}^0 + h_0 l_m s_{-1} + h l_a s_{ia}^0; \\ t_{эс}^{min} &= y_m s_{-1} - y_a s_{ia}^0 - (h_0 l_m s_{-1} + h l_a s_{ia}^0). \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Согласно (35) отношению предела выносливости при сложном напряженном состоянии, когда главные напряжения изменяются по несимметричному циклу, к пределу выносливости при одноосном растяжении-сжатии по симметричному циклу, получим:

$$x_{cm} = \frac{A_{-1}}{A_{mc}}. \quad (36)$$

Таким образом:  $x_{cm} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{s_{ia}^0 k_{i(max)}}{(y_a s_{ia}^0 + h_0 l_m s_{-1})}$ .

Если учесть, что  $s_{ia}^0 k_{i(max)} = \sigma_{-1}$ , получим:

$$x_{cm} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{k_{i(\max)}}{(y_a + h_0 l_m k_{i(\max)})}. \quad (37)$$

Величина  $x_m = \frac{x_{cm}}{x_c}$  представляет собой относительное изменение предела выносливости только за счет постоянных (средних) напряжений.

Подставив значения  $x_{cm}$  и  $x_c$ , получим:

$$x_m = \frac{y_a}{y_a + h_0 l_a k_{i(\max)}}. \quad (38)$$

Если за основное амплитудное напряжение принять наибольшее, то есть  $S_{ia}^0 = \sigma_{1a}$ , то получаем  $k_{i(\max)} = 1$ . В этом случае:

$$\left. \begin{aligned} x_{cm} &= \frac{\sqrt{2}}{3(y_a + h_0 l_m)}; \\ x_m &= \frac{y_a}{y_a + h_0 l_a}. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Рассмотрим случай, когда, кроме действующих (рабочих) асимметрично изменяющихся во времени напряжений, в детали имеются остаточные постоянные напряжения. Последние суммируются с рабочими напряжениями  $\sigma_m$ . Обозначим суммарные постоянные напряжения  $\sigma_n$ , а остаточные  $\sigma_o$  получим:  $S_{1n} = S_{1m} + S_{1o}$ ;  $S_{2n} = S_{2m} + S_{2o}$ ;  $S_{3n} = S_{3m} + S_{3o}$ .

Как и средние рабочие напряжения  $\sigma_m$ , остаточные напряжения  $\sigma_o$ , выразим через предел выносливости при одноосном симметричном цикле:

$$S_{1o} = n_1 S_{-1}; \quad S_{2o} = n_2 S_{-1}; \quad S_{3o} = n_3 S_{-1}.$$

Таким

образом:  $S_{1n} = (m_1 + n_1) S_{-1}$ ;  $S_{2n} = (m_2 + n_2) S_{-1}$ ;  $S_{3n} = (m_3 + n_3) S_{-1}$ .

Используя вышеизложенные теоретические исследования, получим:

$$X_{сн} = \frac{\sqrt{2}k_{i(\max)}}{3(y_a + h_0 I_n k_{i(\max)})}, \quad (40)$$

$$I_n = \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3 + n_1 + n_2 + n_3).$$

Формула (40) дает относительную величину предела выносливости при сложном напряженном состоянии, когда главные напряжения изменяются во времени синфазно и по несимметричному циклу. При этом постоянные напряжения складываются из средних рабочих напряжений и постоянных остаточных. За единицу измерения принят предел выносливости при симметричном одноосном цикле, чтобы определить влияние остаточных напряжений, найдем отношение  $X_{см}$  и  $X_{сн}$ :

$$X_{см} = \frac{y_a + h_0 I_m k_{i(\max)}}{y_a + h_0 I_n k_{i(\max)}}. \quad (41)$$

Формула (41) определяет влияние остаточных напряжений при сложном напряженном состоянии, если рабочие напряжения изменяются синфазно по несимметричным циклам (за единицу измерения принят предел выносливости при сложном напряженном состоянии с несимметричными циклами).

При определении влияния остаточных напряжений для случая, когда рабочие напряжения изменяются во времени синфазно по симметричным циклам, необходимо в формуле (2.53) принять  $I_m = 0$  и  $I_n = I_0 = n_1 + n_2 + n_3$ .

Таким образом: 
$$X_{ос} = \frac{y_a}{y_a + h_0 I_0 k_{i(\max)}}. \quad (42)$$

Формула (42) определяет относительную величину предела выносливости при сложном напряженном состоянии с постоянными остаточными напряжениями и рабочими напряжениями, изменяющимися



по симметричным циклам (за единицу измерения принят предел выносливости при сложном напряженном состоянии с симметричными циклами). А если за единицу измерения принять предел выносливости при одноосном симметричном цикле, то влияние остаточных напряжений записывается выражением:

$$x_{oc}^* = \frac{A_{-1}}{A_{oc}}. \quad (43)$$

где  $A_{oc}$  — амплитуда эффективных касательных октаэдрических напряжений для несимметричного цикла при сложном напряженном состоянии, когда средними напряжениями являются только остаточные напряжения. Она определяется по формуле:

$$A_{oc} = y_a s_{ia}^0 + h_0 l_0 s_{-1}. \quad (44)$$

Таким образом, получим:

$$x_{oc}^* = \frac{\sqrt{2} s_{ia}^0 k_{i(\max)}}{3(y_a s_{ia}^0 + h_0 l_0 s_{-1})}.$$

Если учесть, что  $\sigma_{-1} = s_{ia}^0 k_{i(\max)}$ , получим:

$$x_{oc}^* = \frac{\sqrt{2} k_{i(\max)}}{3(y_a + h_0 l_0 k_{i(\max)})}. \quad (45)$$

При определении коэффициентов  $x_{сн}$ ,  $x_{сн}$ ,  $x_{oc}$  и  $x_{oc}^*$  удобно принять за основное амплитудное напряжение величину наибольшего главного амплитудного напряжения  $s_{ia}^0 = s_{1a}$ . Тогда  $k_{i(\max)} = 1$  и получаем формулы для определения относительных величин пределов выносливости при наличии остаточных напряжений:

(46)

$$\left. \begin{aligned} x_{cn} &= \frac{\sqrt{2}}{3(y_a + h_0 l_n)}; \\ x_{cm} &= \frac{y_a + h_0 l_m}{y_a + h_0 l_n}; \\ x_{oc} &= \frac{y_a}{y_a + h_0 l_0}; \\ x_{cn}^* &= \frac{\sqrt{2}}{3(y_a + h_0 l_0)}. \end{aligned} \right\} (4)$$

Из всех коэффициентов, входящих в эти выражения, только  $\psi_a$  не инвариантен по отношению к выбранным площадкам и напряжениям, действующим на них в опасной точке. Коэффициент  $\psi_a$  должен определяться только через главные амплитудные напряжения  $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}, \sigma_{3a}$ , а все коэффициенты  $\lambda$  — через первый инвариант тензора средних (постоянных) напряжений.

Поэтому при вычислении пределов выносливости необходимо определить главные амплитудные напряжения  $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}$  и  $\sigma_{3a} (\sigma_{1a} > \sigma_{2a} > \sigma_{3a})$  и, принимая в качестве основного амплитудного напряжения  $S_{ia}^0 = S_{1a}$ , найти коэффициенты  $k_1 = S_{1a} / S_{1a}; k_2 = S_{2a} / S_{1a}; k_3 = S_{3a} / S_{1a}$ , коэффициент  $y_a = \frac{1}{3} \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - k_1)^2}$ . Затем в рассматриваемой точке определяются рабочие средние напряжения  $\sigma_{xm}; \sigma_{ym}; \sigma_{zm}$  и остаточные нормальные напряжения  $\sigma_{xo}; \sigma_{yo}; \sigma_{zo}$  на произвольных площадках. По этим напряжениям можно вычислить коэффициенты  $\lambda_m; \lambda_o; \lambda_n$ .

$$I_m = m_1 + m_2 + m_3 = \frac{S_{1m}}{S_{-1}} + \frac{S_{2m}}{S_{-1}} + \frac{S_{3m}}{S_{-1}} = \frac{1}{S_{-1}} (S_{1m} + S_{2m} + S_{3m}).$$

Учитывая инвариантность, получим:

(47)

$$I_m = \frac{1}{S_{-1}} (S_{xm} + S_{ym} + S_{zm}) = \frac{1}{S_{-1}} (S_{1m} + S_{2m} + S_{3m});$$

$$I_o = \frac{1}{S_{-1}} (S_{xo} + S_{yo} + S_{zo}) = \frac{1}{S_{-1}} (S_{1o} + S_{2o} + S_{3o});$$

$$I_n = \frac{1}{S_{-1}} (S_{xm} + S_{ym} + S_{zm} + S_{xo} + S_{yo} + S_{zo}) =$$

$$= \frac{1}{S_{-1}} (S_{1m} + S_{2m} + S_{3m} + S_{1o} + S_{2o} + S_{3o}).$$

Коэффициент  $\eta_o$  определяется через предельные напряжения при растяжении  $\sigma_p$ , сжатии  $\sigma_c$  или при кручении  $\tau_k$ .

Направление главных постоянных напряжений по отношению к направлению главных амплитудных напряжений не имеет значения при определении влияния напряженного состояния в системе покрытие-основа на усталостную прочность восстановленных изделий.

При комбинированном способе обработки в детали возникают остаточные напряжения, которые будут создавать объемное (трехосное) напряженное состояние. Это напряженное состояние характеризуется остаточными главными напряжениями  $\sigma_{1o}$ ,  $\sigma_{2o}$ ,  $\sigma_{3o}$ . В процессе эксплуатации будут дополнительно возникать рабочие переменные напряжения, которые, чаще всего, носят циклический характер. Ниже рассмотрим три типичных варианта нагружения детали при эксплуатации и, соответствующие им, изменения рабочих напряжений.

Рассмотрим случай, когда на восстановленную комбинированным способом обработки деталь с остаточными напряжениями  $\sigma_{1o}$ ,  $\sigma_{2o}$ ,  $\sigma_{3o}$  действуют рабочие напряжения, возникающие от переменного крутящего момента и действующие по несимметричному циклу (рис. 3, а).

В данном случае главные напряжения, возникающие от постоянных касательных напряжений  $\tau_m$  соответствуют:  $S_{1m} = t_m$ ;  $S_{3m} = -t_m$ ;  $S_{2m} = 0$ .

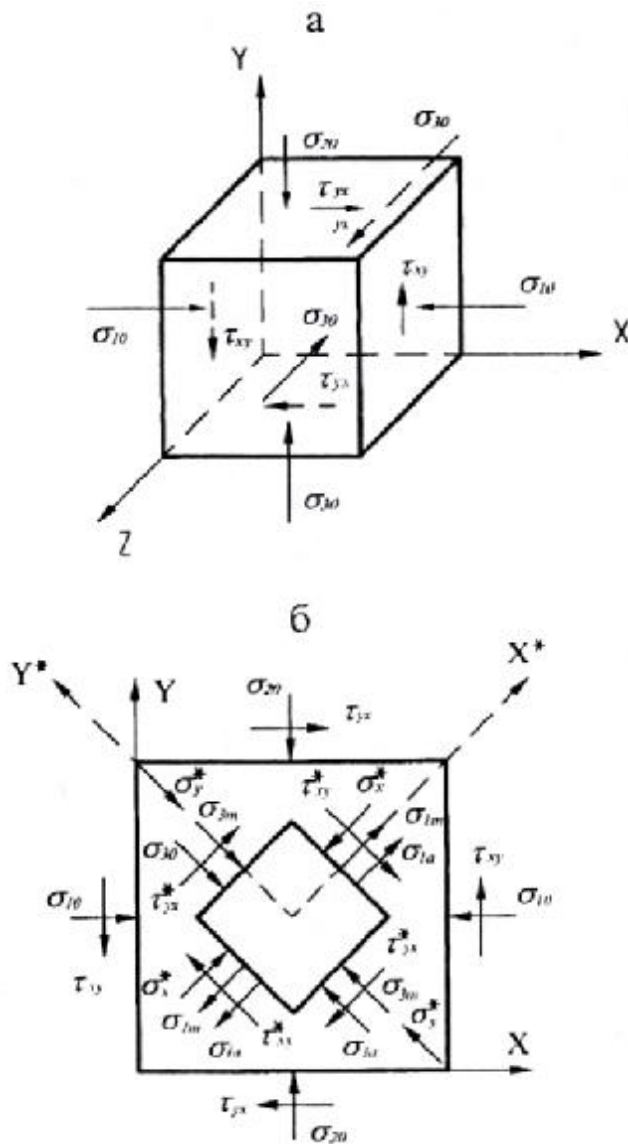


Рисунок 3. - Схемы действия остаточных главных  $\sigma_o$  и рабочих  $\tau$  напряжений, возникающих от переменного крутящего момента и действующих по несимметричному циклу (а), и приведенных к площадкам, перпендикулярным осям  $X^*$  и  $Y^*$  (б)

и остаточные напряжения приводятся к площадкам, перпендикулярным осям  $X$ ;  $Y$ ;  $Z$ :

Главные амплитудные напряжения, возникающие от переменных касательных напряжений, соответствуют:  $s_{1a} = t_a$ ;  $s_{3a} = -t_a$ ;  $s_{2a} = 0$ .

В данном случае  $\sigma_{1a}$  и  $\sigma_{3a}$ , в один и тот же момент времени будут противоположного знака. Если временно не учитывать остаточные напряжения  $\sigma_{1o}$ ,  $\sigma_{2o}$ ,  $\sigma_{3o}$ , тогда площадки, по которым действуют главные напряжения  $\sigma_{im}$  и  $\sigma_{ia}$ , направлены под углом  $45^\circ$  к осям  $X$  и  $Y$  (рис. 3, б). Площадка, перпендикулярная оси  $Z$ , остается неизменной, так как  $\sigma_{2m} = \sigma_{2a} = 0$ .

Поскольку расчет ведется по отношению к площадкам, на которых действуют главные амплитудные напряжения, то

$$s_x^* = s_{1o} \cos^2 45^\circ + s_{1o} \sin^2 45^\circ = \frac{1}{2}(s_{1o} + s_{2o});$$

$$s_y^* = s_{2o} \cos^2 45^\circ + s_{1o} \sin^2 45^\circ = \frac{1}{2}(s_{1o} + s_{2o});$$

$$s_z^* = s_{3o};$$

$$t_{xy}^* = \frac{s_{1o} - s_{2o}}{2}.$$

Определим влияние остаточных напряжений на усталостную прочность детали. Примем за основное амплитудное напряжение  $\sigma_{1a}$ . Тогда

$$s_{ia}^o = s_{1a} = t_a. \text{ Согласно (5.18) получим: } k_1 = \frac{s_{1a}}{s_{ia}^o} = 1, k_2 = 0, k_3 = \frac{s_{3a}}{s_{ia}^o} = -1:$$

$$y_a = \frac{1}{3} \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - k_1)^2} = \frac{\sqrt{6}}{3}.$$

Коэффициент, учитывающий постоянные напряжения, соответствует:

$$l_m = \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3) = \frac{1}{3s_{-1}}(s_{1m} + s_{2m} + s_{3m}) = 0,$$

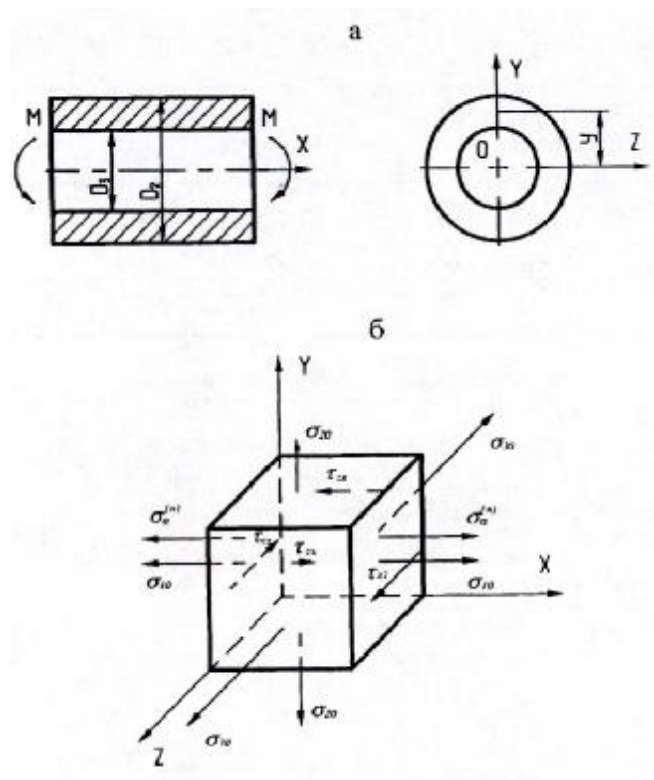
Коэффициент, учитывающий остаточные напряжения, соответствует:

$$l_o = \frac{1}{3}(n_1 + n_2 + n_3) = \frac{1}{3s_{-1}}(s_x^* + s_y^* + s_z^*).$$

В нашем случае  $k_{i(max)} = k_1 = 1$ . Подставляя значения этих коэффициентов, получим:

$$x_{om} = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{6} + h_o \left( \frac{s_{1o} + s_{2o} + s_{3o}}{s_{-1}} \right)}.$$

Остаточные нормальные напряжения можно не приводить к площадкам, по которым действуют главные амплитудные напряжения, так как сумма нормальных напряжений в данной точке величина инвариантная.



В данном случае решим задачу, когда на восстановленную комбинированным способом обработки деталь действуют рабочие напряжения, возникающие от изгибающего момента и действующие по симметричному циклу, а касательные напряжения от крутящего момента изменяются по отнулевому циклу (рис. 4 а). Остаточные напряжения  $\sigma_{1o}$ ,  $\sigma_{2o}$ ,  $\sigma_{3o}$  возникающие при КСО, определяются по ранее приведенным формулам.

Рисунок 4. - Схемы нагружения цилиндрической детали (а) и действия остаточных главных  $\sigma_o$  и рабочих  $\tau$  напряжений, возникающих от изгибающего момента (б)

Напряжения от изгибающего момента в любой точке наплавленного покрытия соответствуют:

$$S_a^{(H)} = \frac{M_n \cdot y E_n}{E_n J_n + E_o J_o},$$

где  $M_n$  — изгибающий момент относительно оси Z;  $y$  — расстояние от нейтральной оси Z до той точки, в которой определяется напряжение;  $E_n$  — модуль упругости материала наплавленного покрытия;  $E_o$  — модуль упругости материала основы;  $J_n$  — момент инерции площади поперечного сечения наплавленного покрытия;  $J_o$  — момент инерции поперечного сечения обрабатываемой детали.

В нашем случае:  $J_o = \frac{p R_3^4}{4}$ ;  $J_n = \frac{p R_2^4}{4} - \frac{p R_3^4}{4}$ ,

где  $R_2$  и  $R_3$  — радиус детали с покрытием и без покрытия, соответственно.

Напряжения в любой точке сечения основы детали составляют:

$$s_a^{(c)} = \frac{M \cdot y E_o}{E_n J_n + E_o J_o}.$$

Касательные напряжения от крутящего момента в любой точке наплавленного покрытия:

$$t^{(n)} = \frac{M_k \cdot r E_n}{E_n J_{rn} + E_o J_{ro}}.$$

где  $M_k$  — крутящий момент;  $p$  — расстояние от центра до тон точки, и которой определяется напряжение;  $J_{pn}$  — полярный момент инерции наплавленного покрытия;  $J_{po}$  — полярный момент обрабатываемой детали.

$$J_{ro} = \frac{p R_3^4}{2}; J_{rn} = \frac{p R_2^4}{2} - \frac{p R_3^4}{2}.$$

Касательные напряжения в материале детали:

$$t^{(c)} = \frac{M_k \cdot r E_o}{E_n J_{rn} + E_o J_{ro}}.$$

Так как касательные напряжения изменяются по отнулевому циклу, получим:  $t_m^{(n)} = t_a^{(n)} = \frac{t^{(n)}}{2}$ ;  $t_m^{(c)} = t_a^{(c)} = \frac{t^{(c)}}{2}$ .

Рассмотрим напряжения в некоторой точке наплавленного и упрочненного слоя покрытия (рис. 4, б). Когда амплитудные напряжения действуют только в плоскости XZ, то главные амплитудные напряжения соответствуют:

$$s_{a(\max/\min)} = \frac{s_a^{(n)}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(s_a^{(n)}\right)^2 + 4\left(t_a^{(n)}\right)^2}.$$

$$s_{1a} = s_{a(\max)} = \frac{s_a^{(H)}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(s_a^{(H)})^2 + 4(t_a^{(H)})^2};$$

$$s_{2a} = 0;$$

$$s_{3a} = s_{a(\min)} = \frac{s_a^{(H)}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(s_a^{(H)})^2 + 4(t_a^{(H)})^2}.$$

Примем за основное амплитудное напряжение  $s_{ia}^0 = s_{1a}$ . Тогда коэффициенты  $k_1 = 1, k_2 = 0, k_3 = s_{3a} / s_{1a}, k_{i(\max)} = 1$ :

$$y_a = \frac{1}{3} \sqrt{1 + \left(\frac{s_{3a}}{s_{1a}}\right)^2 + \left(\frac{s_{3a}}{s_{1a}} - 1\right)^2} = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{(s_a^{(H)})^2 + 2(t_a^{(H)})^2}}{\left[\sqrt{s_a^{(H)} + (s_a^{(H)})^2 + 4(t_a^{(H)})^2}\right]}.$$

Средние главные напряжения соответствуют:

$$s_{1m} = t_m^{(H)}; s_{2m} = 0; s_{3m} = -t_m^{(H)}.$$

Таким образом:

$$I_m = \frac{1}{3s_{-1}} (s_{1m} + s_{2m} + s_{3m}) = 0;$$

$$I_o = \frac{1}{3s_{-1}} (s_{1o} + s_{2o} + s_{3o}).$$

Определим влияние остаточных напряжений на усталостную прочность материала покрытия. Для произвольной точки материала основы получим аналогичную формулу для  $X_{om}$ , только вместо  $s_a^{(H)}$  и  $t_a^{(H)}$  будут фигурировать  $s_a^{(c)}$  и  $t_a^{(c)}$ . При конкретных значениях напряжений оптимальным решением является определение численных значений коэффициентов  $\psi_a, \lambda_m$  и  $\lambda_n$  и использование для вычисления  $X_{om}$ .

На деталь, имеющую остаточные напряжения после комбинированного способа обработки, действуют только одноосные напряжения  $\sigma_a$ , изменяющиеся по симметричному циклу.



Таким образом:  $s_{1a} = s_a; s_{2a} = 0; s_{3a} = 0; s_{ia}^0 = s_{1a}; k_1 = 1; k_2 = 0;$   
 $k_3 = 0; k_{i(\max)} = 1.$

Коэффициент, учитывающий амплитудное напряжение:  $y_a = \frac{\sqrt{2}}{3}.$

Коэффициент, учитывающий остаточные напряжения:

$$l_o = \frac{1}{3s_{-1}}(s_{1o} + s_{2o} + s_{3o}).$$

Тогда влияние остаточных напряжений на предел выносливости восстановленных и упрочненных деталей можно выразить:

$$x_{oc} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2} + h_o \frac{(s_{1o} + s_{2o} + s_{3o})}{s_{-1}}}.$$

Таким образом, пользуясь полученными формулами, можно определить влияние остаточных напряжений на усталостную прочность при любом напряженном состоянии, возникающем в процессе эксплуатации восстановленной и упрочненной детали комбинированным способом обработки.

**Библиографический список**

1. Мрочек Ж.А. Остаточные напряжения /Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др.; Под ред. С.С. Макаревича. – Мн.: УП «Техно-принт», 2003. – 352 с.
2. Горохова М.Н., Барковский Ю.Б. // Комбинированный метод электромагнитной наплавки и поверхностного пластического деформирования. Ремонт, восстановление, модернизация. – Москва, 2007. - №1. - С. 12-14.
3. Горохова М.Н. Граничные условия при обкатывании роликами при комбинации наплавки и пластического деформирования // Сборник докладов и материалов 9 конгресса «Кузнец – 2009»: «Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного производства и обработки материалов давлением». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. - С. 221-225.
4. Горохова М.Н., Пучин Е.А., Бышов Н.В., Борычев С.Н. Нанесение износостойких покрытий комбинированными способами обработки в условиях малых ремонтных предприятий: монография. – Рязань: тираж 300 экз., издательство РГАТУ, 2012. – 331 с.
5. Горохова М.Н., Полищук С.Д., Чурилов Д.Г., Горохов А.А., Симонова Н.В. Восстановление и упрочнение деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле: монография. – Рязань: тираж 300 экз., издательство РГАТУ, 2012. – 162 с.
6. Горохова М.Н., Бачурин С.Н., Бышов Д.Н., Абрамов Ю.Н., Горохов А.А. Нанесение износостойких покрытий электромагнитной наплавкой: монография. – Рязань: тираж 300 экз., издательство РГАТУ, 2012. – 206 с.
7. Горохова М.Н. Распределение удельных нормальных давлений в радиально-окружной плоскости ролика при поверхностном пластическом деформировании / М.Н. Горохова, С.Д. Полищук, Ю.Н. Абрамов, Д.Н. Бышов, А.А. Горохов // Политематический сетевой электронный научный

журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – №07(81)