

Л.М.Симонян, В.Е.Пигуль

РАСЧЕТ НАЖИМНЫХ УСИЛИЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ
ДЕТАЛЕЙ

В настоящей работе делается попытка дать аналитически обоснованный выбор оптимальной величины нажимного усилия, обеспечивающего необходимую толщину упрочняемого слоя при поверхностном пластическом деформировании накаткой.

Выбор оптимального нажимного усилия должен производиться с учетом обеспечения соответствующего напряженного состояния в поверхностном слое детали, вызывающего необходимую пластическую его деформацию. При этом расчетное нажимное усилие на площадке контакта инструмент-деталь должно привести к пластической деформации на заданной глубине. В то же время необходимо, чтобы напряженное состояние и величина деформаций от сжимающего усилия не превосходили критического состояния материала, при котором нарастание деформации может происходить без роста сопротивлений.

по данным ЦНИИТМАШ, наибольшая эффективность упрочнения достигается при соблюдении условия

$$\frac{t}{r} = 0,10 - 0,15, \quad (1)$$

где t - толщина упрочненного слоя;
 r - радиус упрочняемой детали.

В настоящее время для поверхностного пластического упрочнения деталей используется накатной инструмент различной геометрии, обеспечивающий первоначальное касание с деталью по линии и в точке. Рассмотрим оба случая.

1. первоначальное касание детали и инструмента по линии. Прямоугольную систему координат $OXYZ$ расположим так, чтобы ось OY совпала с образующей касания (с продольной осью опорной площадки), а ось OZ была перпендикулярна к этой площадке.

Тогда напряжения определяются по следующим формулам /1/:

$$\sigma_{1i} = \frac{2q}{\pi a} \left(1 - \frac{\operatorname{sh} \alpha}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \alpha + \sin^2 \beta}}\right) e^{-\alpha} \sin \beta; \quad (2)$$

$$\sigma_{2i} = \frac{2q}{\pi a} e^{-\alpha} \sin \beta \frac{\lambda}{\lambda + c} \quad ; \quad (3)$$

$$\sigma_{3i} = \frac{2q}{\pi a} \left(1 + \frac{\operatorname{sh} \alpha}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \alpha + \sin^2 \beta}}\right) e^{-\alpha} \sin \beta. \quad (4)$$

Здесь λ и c - постоянные упругости по Ламе, равные

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}; \quad c = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad ;$$

a - полуширина площадки контакта при сжатии инструмента и детали:

$$a = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \psi \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (5)$$

Здесь μ_1, μ_2 - коэффициенты Пуассона инструмента и детали;

E_1, E_2 - модули упругости;

r_1, r_2 - радиусы ролика и детали;

q - удельная (погонная) нагрузка.

В формуле (5) a выражают в виде

$$a = k \sqrt{q}$$

где k - числовой коэффициент.

Пользуясь формулами (2), (3), (4), можно определить значения σ_{1i} , σ_{2i} и σ_{3i} в произвольных точках поверхностного слоя как некоторую функцию от величины удельной нагрузки. Для этого определяем эллиптические координаты t_i , приняв $X = 0$; следовательно, $\frac{x}{a} = 0$ и $z = h_i(a)$, где h_i - произвольно задаваемая численная величина 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и т.д.

$$t_i = \frac{1}{2} \left[x^2 + z^2 a^2 + \sqrt{(x^2 + z^2 a^2)^2 + 4a^2 z^2} \right] \quad (6)$$

Значение α и $\operatorname{sh} \alpha$ в формулах (2), (3), (4) определяется как

$$\operatorname{sh} \alpha = \frac{\sqrt{t_i}}{a} \quad (7)$$

а значение $\operatorname{Sin} \beta = 1$, так как $\beta = 90^\circ$.

Вычислив $\sigma_{1i} = f(\varphi)$, $\sigma_{2i} = f(\varphi)$, $\sigma_{3i} = f(\varphi)$, можно по четвертой теории прочности определить приведенные напряжения:

$$\sigma_{\text{пр}i} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_1 \sigma_3} \quad (8)$$

Для обеспечения процессов упрочнения на необходимой глубине поверхностного слоя должно быть соблюдено условие:

$$\sigma_{\text{пр}i} \geq \sigma_T \quad (9)$$

где σ_T - предел текучести материала детали при растяжении.

Очевидно, что условие (9) обеспечивается выбором соответствующих значений φ , по величине которых можно установить необходимое усилие нажатия ролика на деталь:

$$P = \varphi \sigma \quad (10)$$

где σ - длина контактной линии.

Значения приведенных напряжений можно также вычислить по формулам, предложенным Ф.А.Опейко [2]:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{3i} - \sigma_{1i}}{K\sqrt{1+K^2f^2}} - f \frac{(\sqrt{1+K^2f^2} - Kf)\sigma_{3i} + (\sqrt{1+K^2f^2} + Kf)\sigma_{1i}}{\sqrt{1+K^2f^2}} \quad (11)$$

Здесь K - коэффициент, учитывающий соотношение главных напряжений:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \right)^2}} \quad (12)$$

Максимальное значение K при $M = 0,5$ $K = 1,154$;

f - коэффициент внутреннего трения на площадке сдвига; он равен

$$f = 0,443 \left(\sqrt{\frac{HB}{\tau_{0*}}} - 2,84 - 0,472 \right) \quad (13)$$

В формуле (13) τ_{0*} - разрушающее напряжение сдвига, определяемое при испытании образцов материала упрочняемой детали:

$$\tau_{0*} \approx \frac{\sigma_{12}}{2} \quad (14)$$

где σ_{12} - временное сопротивление прочности материала при растяжении.

2. Для случая первоначального контакта накатного инструмента и детали в точке полуширина площадки контакта определится по формуле /2/:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{z_1 z_2}{r_1 + r_2} P \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (15)$$

Здесь P - нажимное усилие.

Главные напряжения находятся из равенств:

$$\sigma_{11} = \frac{3Pz}{4\pi a^3} \left(3a z \operatorname{ctg} \frac{a}{\sqrt{t}} - \frac{a}{\sqrt{t}} \frac{3t + 2a^2}{t + a^2} \right); \quad (16)$$

$$\sigma_{22} = \frac{3Pz}{4\pi a^3} \left[3a z \operatorname{ctg} \frac{a}{\sqrt{t}} - \frac{a}{\sqrt{t}} \frac{3t^2 + 4at^2 + a^2 z^2 t + 4a^4 z^2}{(t + a^2)(t^2 + a^2 z^2)} \right] \quad (17)$$

$$\sigma_{33} = -\frac{3Pz}{2\pi a^2} \frac{a}{\sqrt{t}} \frac{a^2 z^2}{t^2 + a^2 z^2} \quad (18)$$

Эллиптические координаты вычисляются по формуле:

$$t = \frac{1}{2} [x^2 + y^2 + z^2 - a^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2}] \quad (19)$$

Зададимся значениями координат X , Y и Z . Так как максимальное значение напряжений будет иметь место по центру площадки контакта, по положим $X = 0$; $Y = 0$, а значения Z будем задавать:

$$Z = h_i(a)$$

Приведенные напряжения вычисляем по формулам (8) или (II), величина которых также должна удовлетворять условию (9).

В ы в о д ы

1. Предлагаемый метод позволяет устанавливать оптимальное усилие накатки в зависимости от необходимой толщины наклепанного слоя.
2. Усилия накатки определяются с учетом геометрии деталей, инструмента и механических свойств материала упрочняемых изделий.

Л и т е р а т у р а

1. Беляев Н.М. Труды по теории упругости и пластичности. Госиздат технико-теоретической литературы. М., 1957.
2. Опейко Ф.А. Расчет на контактную прочность. Вопросы сельскохозяйственной механики. Минск, 1965.