

УДК 621.73.011

Ярошенко Т. В.
Сивак І. О.**СТУПІНЬ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ ТА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ
В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ ОБКОЧУВАННЯ ТОРОЇДАЛЬНИМ
РОЛИКОМ**

В процесі експлуатації деталей машин в більшості випадків в поверхневому шарі виникають розтягуючі напруження, які обумовлюють несприятливу схему напружено-деформованого стану і сприяють зародженню та росту тріщин. Робочі напруження розтягу, що мають місце при експлуатації деталі, можна компенсувати залишковими напруженнями стиску, які виникають при поверхневій пластичній деформації. Метод поверхневої пластичної деформації обкочування роликом відомий уже давно, але і досі залишається проблема в виборі раціональних режимів обробки. Так, як поверхнєве пластичне деформування ефективно в основному для деталей, що сприймають навантаження, то шляхом створення в поверхневих шарах залишкових напружень стиску можливе регулювання рівня напружень в деталі в робочих умовах.

Рівень залишкових напружень стиску, що виникають в поверхневих шарах деталі, залежать від параметрів процесу поверхневої пластичної деформації. З одного боку, вони не повинні бути мінімальними, так як при реальних умовах експлуатації деталі сам процес ППД може виявитись безкорисним, а з іншого боку, високий рівень залишкових напружень стиску приводить до виникнення тріщин деталі.

В даний час можна вважати загально признаними три основних критерії, по яких оцінюється ефективність поверхневого пластичного деформування – це величина і розподіл залишкових напружень в поверхневому шарі, фізичне зміцнення металу поверхневого шару та рівень пошкодженості поверхневого шару металу. Указані фактори однозначно визначаються фізико-механічними властивостями матеріалу деталі та параметрами процесу обкочування.

В роботах [1, 2] розвивається і узагальнюється розрахунково-феноменологічний підхід, запропонований Радченко В. П. та Саушкіним М. Н., по схемі складного напруженого стану після застосування поверхневої пластичної деформації, що дозволяє визначити тривимірне розподілення полів залишкових напружень і пластичних деформацій в зміцненому шарі циліндричної деталі по одній експериментально вимірній компоненті залишкових напружень. Однак для розв'язання поставленої задачі однієї компоненти залишкових напружень недостатньо.

У роботі [3] розглянуто особливості застосування методу поверхневого пластичного деформування як одного з технологічних прийомів підвищення контактної міцності деталей машин та встановлено рівень залишкових навантажень у деталях машин при поверхневому пластичному деформуванні виходячи з геометричних характеристик при вдавлюванні ролика в плоску поверхню. Проте, на технологічну спадковість деталі, крім глибини зміцненого шару та рівня залишкових напружень, впливає також величина використаного ресурсу пластичності ψ .

Метою роботи є визначення інтенсивності напружень, величини та закону розподілу залишкових напружень в поверхневому шарі деталі та величини використаного ресурсу пластичності після поверхневої пластичної деформації.

В даній роботі отримано розв'язок задачі визначення залишкових напружень для вдавлювання тороїдального ролика в плоску поверхню (сталь 30ХГСА, $\sigma_T = 500$ МПа). Стальний тороїдальний ролик (рис. 1), діаметром $D_p = 2R_{11} = 50$ мм та радіусами робочого профілю $R_{12} = 5$ мм, $R_{12} = 10$ мм, $R_{12} = 15$ мм вдавлювався з силою $P = 10$ кН ($E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$).

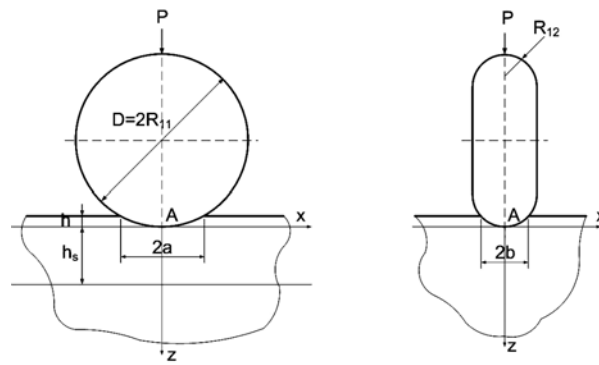


Рис. 1. Схема вдавливання торієдального ролика в плоску поверхню

Використовуючи методику [3, 4] визначили розподіл напружень σ_x , σ_y , σ_z та залишкових напружень $\sigma_{зал}$ по глибині z поверхневого шару та на глибині пластичної деформації h_s , для трьох різних контурних радіусів: $R_{12} = 5$ мм, $R_{12} = 10$ мм, $R_{12} = 15$ мм. Розрахунок здійснювався за формулами (1–9):

$$\sigma_x = -\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P}{(a^2 - b^2)} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{z^2 + b^2}{z^2 + a^2}} + 2 \frac{x}{a} \cdot (L - K) - 2\mu \cdot \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{z^2 + b^2}{z^2 + a^2}} + \frac{z}{a} \left(\frac{a^2}{b^2} L - K \right) \right) \right); \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P}{(a^2 - b^2)} \cdot \left(-1 + \frac{a^2 b^2 + z^2 (2a^2 - b^2)}{\sqrt{(z^2 + a^2)(z^2 + b^2)}} - 2 \frac{z}{a} \cdot \left(\frac{a^2}{b^2} (L - K) \right) + 2\mu \cdot \left[1 - \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{z^2 + b^2}{z^2 + a^2}} + \frac{z}{a} (L - K) \right] \right); \quad (2)$$

$$\sigma_z = -\frac{3}{2\pi} \cdot \frac{P}{\sqrt{(z^2 + a^2)(z^2 + b^2)}}, \quad (3)$$

$$\text{де } K(e, \gamma) = \int_0^\gamma \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}; \quad L(e, \gamma) = \int_0^\gamma \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi; \quad \gamma = \text{arcctg} \frac{z}{a}; \quad e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2.$$

$$h_s = b \cdot \left[\frac{4}{5 \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} + 3} \cdot \left(\frac{P}{a \cdot b \cdot \sigma_T} - \frac{17}{6 + \ln \left(\frac{b}{a} \right)} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln \left(\frac{b}{a} \right)}}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = -n \varepsilon_z; \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = -m \varepsilon_z. \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\ln h}{h_s} h e^{\frac{\ln h}{h_s} \cdot z}, \quad (7)$$

$$\text{де } n = \frac{\left(\frac{b}{a} \right)^2}{1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2}; \quad h = \frac{P - P_0}{10 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot R_{np}}; \quad P_0 = 11 \exp \left[1,9 \left(5 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_T - 1 \right)^{0,668} \right] \cdot \left(\frac{R_{np}}{5} \right)^2;$$

$$P_{np} = \frac{1}{2A} \sqrt{\frac{A}{B}}; \quad A = \frac{1}{2R_{11}}; \quad B = \frac{1}{2R_{21}}; \quad R_{np} = \frac{\omega}{2A}.$$

Для коректного визначення залишкових напружень, залишаючись в рамках теорії малих пружно-пластичних деформацій, залишкову осьову деформацію варто визначати на границі пружної і пластичної областей $z = h_s$. Залишкові напруження стиску визначали за формулою:

$$\sigma_{зал} = \frac{E \cdot \varepsilon_z}{z}. \quad (8)$$

Інтенсивність напружень розраховували за формулою:

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}. \quad (9)$$

В результаті розрахунків з використанням програми MathCAD, отримано наступні результати, які представлені на рис. 2, 3 та 4.

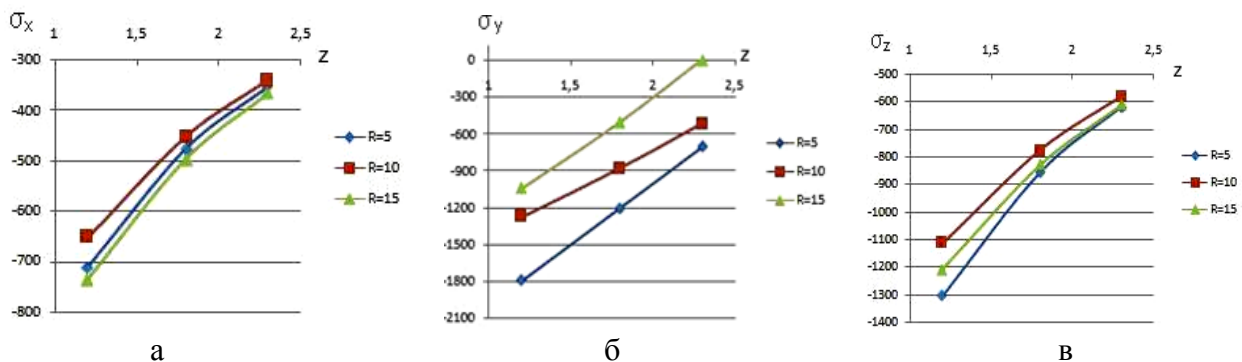


Рис. 2. Розподіл σ_x (а), σ_y (б), σ_z (в) по глибині поверхневого шару

Із розподілу напружень σ_x , σ_y , σ_z по глибині поверхневого шару при контурному радіусі $R_{12} = 5$ мм, $R_{12} = 10$ мм і $R_{12} = 15$ мм, приведених на (рис. 2), впливає, що геометричні характеристики торіодального ролика мало впливають на величину та розподіл компонент тензора напружень. Дані результати залежностей σ_x , σ_y , σ_z використовували в подальшому для визначення залишкових напружень стиску $\sigma_{xзал}$ та показників напруженого стану [5]:

$$\eta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_u}; \quad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (10)$$

Величину використаного ресурсу пластичності ψ в поверхневому шарі металу визначали за критерієм руйнування [5]:

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u^*}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (11)$$

де e_p – гранична деформація; $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій; e_u – ступінь деформації.

Для побудови траєкторії навантаження в координатах e_u , η , μ_σ значення η і μ_σ розраховували за формулами (10), а величину e_u визначали із кривої течії сталі 30ХГСА по величині σ_u , яку розраховували за формулою (9).

В результаті розрахунків за формулою (11) встановлено, що величина ψ зростає із збільшенням глибини вдавлювання і має найбільші значення в точці А поверхневого шару (див. рис. 1). При максимальній глибині вдавлювання значення ψ в цій точці зростають від $\psi = 0,22$ до $\psi = 0,28$ із зменшенням контурного радіуса від $R_{12} = 15$ мм до $R_{12} = 5$ мм.

В даний час встановлено, що при $\psi \leq 0,4$ в пластично деформованому металі відсутні термодинамічно стійкі ефекти, які погіршують його експлуатаційні характеристики. Тому розглянуті режими обкочування тороїдальним роликком можна рекомендувати для зміцнення поверхневого шару металу.

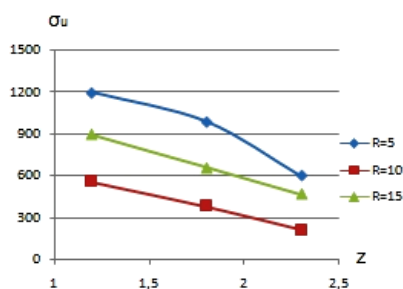


Рис. 3. Розподіл σ_u по глибині поверхневого шару

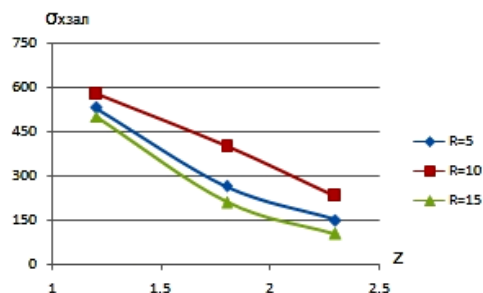


Рис. 4. Розподіл залишкових напружень стиску $\sigma_{зал}$ по глибині поверхневого шару

Інтенсивність напружень зростає із зменшенням контурного радіуса. При зменшенні контурного радіуса від $R_{12} = 15$ мм до $R_{12} = 5$ мм інтенсивність напружень зростає практично в два рази (див. рис. 3). Залишкові напруження є стискуючими і поширюються на достатню глибину. Вплив вибраних розмірів та геометрії тороїдальних роликків на величину та розподіл залишкових напружень незначний (див. рис. 4).

ВИСНОВКИ

Інтенсивність напружень (величина зміцнення) σ_u зі збільшенням глибини вдавлювання в поверхневий шар зменшуються при усіх контурних радіусах $R_{12} = 5$ мм, $R_{12} = 10$ мм, $R_{12} = 15$ мм та зростає із зменшенням величини контурного радіуса.

Встановлено, що для інтервалу значень контурних радіусів $R_{12} = (5...15)$ мм їх вплив на розподіл залишкових напружень незначний. Однак, при збільшенні R_{12} від $R_{12} = 5$ мм до $R_{12} = 10$ мм залишкові напруження зростають, а при подальшому збільшенні R_{12} до значень $R_{12} = 15$ мм залишкові напруження зменшуються. Величина використаного ресурсу пластичності зростає із зменшенням R_{12} .

ЛІТЕРАТУРА

1. Саушкин М. Н. Схема расчета полей остаточных напряжений в цилиндрическом образце с учетом организации процесса поверхностного пластического деформирования / М. Н. Саушкин, О. С. Афанасьева, Е. В. Дубовова, Е. А. Просвиркина // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 1 (16). – С. 85–89. – (Сер.: «Физ.-мат. науки»).
2. Саушкин М. Н. Феноменологический подход к моделированию напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном слое цилиндрического изделия / М. Н. Саушкин В. А. Кирпичев, В. А. Смыслов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 1 (18). – С. 159–168. – (Сер.: «Физ.-мат. науки»).
3. Иоргачев В. Д. Определение уровня остаточных напряжений в деталях машин при их поверхностном пластическом деформировании / В. Д. Иоргачев, П. А. Линчевский // Труды Одесского политехнического университета. – 2003. – Вып. 1(19). – С. 18–21.
4. Дрозд М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Маталин, Ю. И Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 219 с.
5. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ. – Вінниця, 2005. – 204 с.

Ярошенко Т. В. – аспірант ВНТУ;

Сивак І. О. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

E-mail: yarochenko_tania@mail.ru