ІІІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.319

О. Г. Попович, канд. техн. наук В. Г. Шевченко

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

АНАЛІЗ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ОБЛАСТІ КОНТАКТУ

Проведено аналіз розподілу інтенсивності напружень по глибині при стисканні двох тіл у залежності від кривизн їхніх поверхонь. Отримано співвідношення зусиль деформування при попередньому та остаточному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням робочими тілами різних розмірів.

Ключові слова: *поверхневий шар, інтенсивність напружень, сила деформування, кривизна поверхні, площадка контакту.*

Вступ

За умов експлуатації поверхневий шар деталі зазнає найбільш сильних впливів: механічного, хімічного, електрохімічного, теплового тощо. Тому до поверхневого шару ставляться більш високі вимоги, ніж до основної маси матеріалу деталі.

Для підвищення опору деталей втомі в сучасному машинобудуванні використовують зміцнення поверхневим пластичним деформуванням. У результаті такого зміцнення в поверхневому шарі матеріалу деталі кристаліти пластично деформуються, утворюється кристалографічна текстура, виникають сприятливі залишкові напруження стиску.

Відомо, що зі збільшенням товщини шару із залишковими напруженнями стиску та з підвищенням їх величин до певного рівня здатність деталі чинити опір втомі зростає [1]. Для підвищення зміцнювального ефекту від поверхневого пластичного деформування збільшують у допустимих межах силу деформування, а також застосовують два (іноді – три) робочі ходи. При цьому сила деформування не повинна перевищувати критичного значення, за якого відбувається перенаклеп поверхні деталі.

Залишкові напруження стиску після зміцнення поверхневим пластичним деформуванням в один робочий хід досягають екстремуму у більшості випадків на деякій відстані від поверхні деталі [2]. У тонкому прошарку безпосередньо під поверхнею деталі наводяться або незначні за величиною залишкові напруження стиску, або навіть залишкові напруження розтягу. Крім того, прошарок із кристалітами, що отримали в результаті зміцнення найбільшу пластичну деформацію, зазвичай знаходиться також на деякій відстані від поверхні деталі [3].

За умови роботи деталі при змінних напруженнях зародження втомних тріщин найчастіше починається саме з поверхні. Ці міркування дають підставу для визначення режимів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням, які б дозволили сформувати в деталі поверхневий шар із вдосконаленим розподілом залишкових напружень.

Мета роботи – аналітичне знаходження такого співвідношення параметрів поверхневого пластичного деформування при попередньому та остаточному зміцненні деталі, яке є бажаним з точки зору вдосконалення розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі.

Зміст і результати дослідження

Згідно з умовою початку пластичного деформування Губера-Мізеса [4] пластична деформація у розглядуваному об’ємі пружно-пластичного тіла починається тоді, коли інтенсивність напружень σ_{int} у цьому об’ємі досягає границі текучості матеріалу σ_T. Значення σ_{int} можна виразити через головні напруження σ_1, σ_2, σ_3 за формулою:

$$\sigma_{int} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2}. \qquad (1)$$

У главі 6 літературного джерела [5] наведено формули (137), за допомогою яких при пружному стисканні двох тіл можна визначати головні напруження в точках на осі Oh, яка проходить через центр площадки контакту тіл, що стискаються, перпендикулярно до цієї площадки. З цих формул і формули (1) випливає, що при конкретному значенні коефіцієнта Пуассона ν відношення $\frac{\sigma_{int}}{p_0}$ можна розглядати як функцію аргументів $\frac{h}{a}$ і $\frac{b}{a}$. Тут і далі через p_0 будемо позначати найбільший на площадці контакту тиск, який має місце в її центрі; a і b – довжини відповідно більшої та меншої півосей еліптичного контуру площадки контакту (рис. 1); h – глибина, що відраховується від поверхні тіла до точки на осі Oh, в якій визначаємо величину σ_{int}.

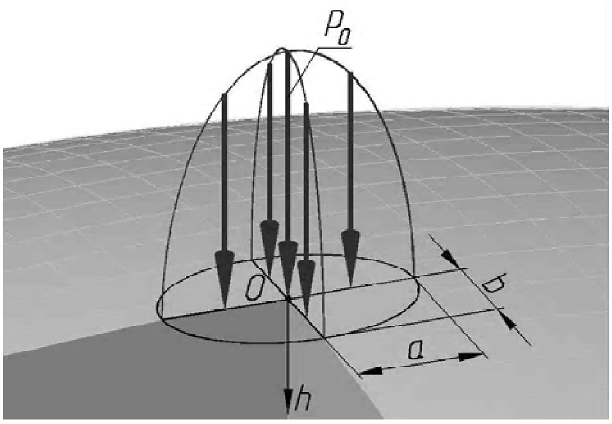

Рис. 1. Площадка контакту

Відношення півосей еліпса пов'язано з його ексцентриситетом e формулою:

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1-e^2}\,.$$

Ексцентриситет e еліптичної площадки контакту знаходять як корінь трансцендентного рівняння (71) глави 6 джерела [5]. З цього рівняння та формул (58) глави 6 джерела [5] випливає, що він залежить тільки від величин головних кривизн та кута між площинами головних кривизн поверхонь розглядуваних тіл у точці їх первинного контакту.

Користуючись виразами (73) і (75) глави (6) джерела [5], формули для a і p_0 можна подати у такому вигляді:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\cdot L(e)}{\pi\cdot(1-e^2)}\cdot\frac{\eta\cdot Q}{\kappa}}\,; \qquad (2)$$

$$p_0 = \frac{1}{2}\cdot\sqrt[3]{\frac{3\cdot\sqrt{1-e^2}}{\pi\cdot\left(L(e)\right)^2}\cdot\frac{\kappa^2\cdot Q}{\eta^2}}\,, \qquad (3)$$

де κ – сума головних кривизн поверхонь тіл, що стискаються, в точці контакту перед прикладанням стискаючої сили $\overline{Q}$;

$$L(e) = \int_0^{\pi/2}\sqrt{1-e^2\cdot\sin^2\phi}\,d\phi\,;$$

$$\eta = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\,;$$

де E_1 і E_2, ν_1 і ν_2 – відповідно модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона тіл, що стискаються.

Задаючи різні значення аргументу $\frac{b}{a}$ в інтервалі від нуля до одиниці, ми побудували при $\nu = 0{,}3$ графіки залежності відносного значення інтенсивності напружень $\frac{\sigma_{int}}{p_0}$ від відносної глибини $\frac{h}{a}$ (рис. 2). Аналіз цих графіків показує, що при пружному стисканні двох тіл максимум інтенсивності напружень σ_{int}^{max} знаходиться на певній глибині h^{max} під центром площадки контакту. Шляхом чисельного вирішення рівняння

$$\frac{d\left(\sigma_{int}/p_0\right)}{d\left(h/a\right)} = 0$$

для різних значень $\frac{b}{a}$ ми знаходили відповідні їм значення відносних глибин $\frac{h^{max}}{a}$, при яких інтенсивність напружень досягає максимуму σ_{int}^{max}.

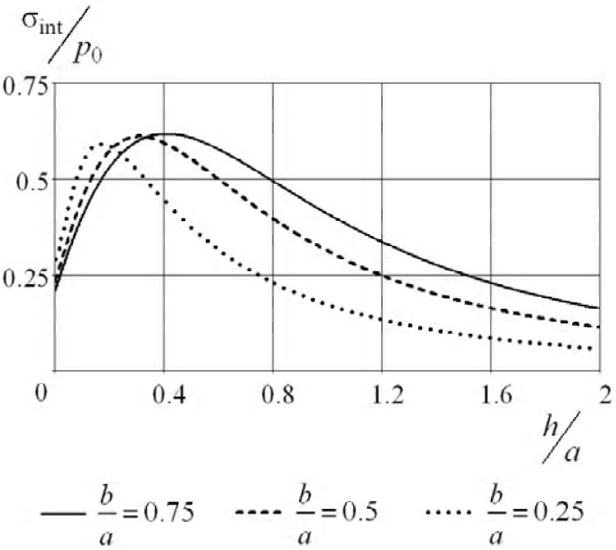

Рис. 2. Графіки залежності відносного значення інтенсивності напружень від відносної глибини для різних співвідношень півосей площадки контакту

Тоді величини $h^{\max}$ і $\sigma_{\text{int}}^{\max}$ можна представити таким чином:

$$h^{\max} = \psi_h \cdot a\,; \tag{4}$$

$$\sigma_{\text{int}}^{\max} = \psi_\sigma \cdot p_0\,, \tag{5}$$

де ψ_h і ψ_σ – функції, що залежать від величини відношення півосей $\frac{b}{a}$ еліптичної площадки контакту, тобто від величини $\sqrt{1-e^2}$.

Графіки функцій $\psi_h \frac{b}{a}$ і $\psi_\sigma \frac{b}{a}$, отриманих чисельним методом при $\nu = 0{,}3$, ми зобразили на рис. 3 і рис. 4 відповідно.

Підставивши у вирази (4) і (5) формули (2) і (3) відповідно, дістанемо:

$$h^{\max} = \psi_h \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot L(e)}{\pi \cdot (1-e^2)} \cdot \frac{\eta \cdot Q}{\kappa}}\,; \tag{6}$$

$$\sigma_{\text{int}}^{\max} = \frac{\psi_\sigma}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \sqrt{1-e^2}}{\pi \cdot \left(L(e)\right)^2} \cdot \frac{\kappa^2 \cdot Q}{\eta^2}}\,. \tag{7}$$

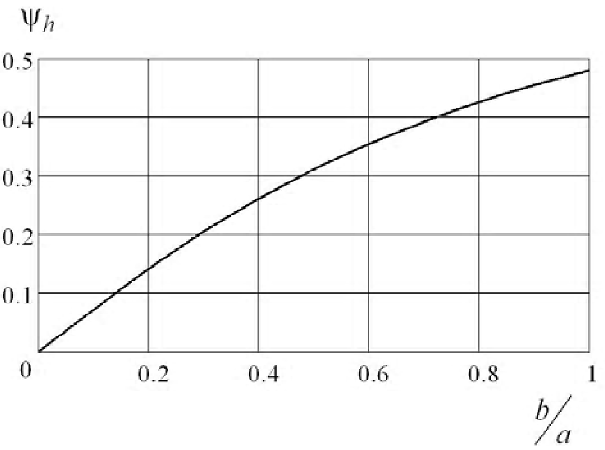

Рис. 3. Графік функції $\psi_h \frac{b}{a}$

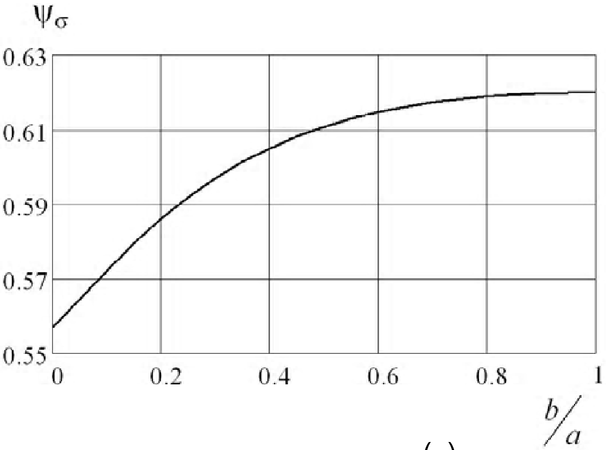

Рис. 4. Графік функції $\psi_\sigma \left(\frac{b}{a}\right)$

Розглянемо випадки пружного притискання до деталі робочого тіла зміцнювального інструменту з більшими головними радіусами кривизни робочої поверхні та робочого тіла з меншими головними радіусами кривизни робочої поверхні. Величини, які стосуються більшого робочого тіла, будемо супроводжувати індексом «*R*», а величини, що стосуються меншого робочого тіла, – індексом «*r*». Матеріали більшого та меншого робочих тіл однакові, тоді $\eta_R = \eta_r = \eta$.

Прирівнявши вирази для максимальних значень інтенсивності напружень у випадках притискання до деталі більшого та меншого робочих тіл, можна визначити співвідношення відповідних сил Q_R і Q_r, з якими треба притискати до деталі ці робочі тіла.

Зокрема, якщо робочі тіла мають такі значення радіусів кривизни робочих поверхонь, що ексцентриситети площадок контакту робочих тіл з деталлю в обох випадках однакові ($e_R = e_r = e$), то зазначене співвідношення сил притискання виглядатиме просто:

$$\frac{Q_r}{Q_R} = \frac{\kappa_R^2}{\kappa_r^2}\,. \tag{8}$$

При цьому для глибин $h_R^{\max}$ і $h_r^{\max}$, на яких інтенсивність напружень досягатиме максимального значення в цих випадках, з формули (6) отримаємо співвідношення:

$$\frac{h_r^{\max}}{h_R^{\max}} = \sqrt[3]{\frac{\kappa_R}{\kappa_r} \cdot \frac{Q_r}{Q_R}} = \frac{\kappa_R}{\kappa_r}\,.$$

Співвідношення (8) можна рекомендувати як орієнтовне для визначення відношення сили притискання робочого тіла до деталі при остаточному зміцненні до відповідної сили при попередньому зміцненні за умови, що площадки контакту робочих тіл з деталлю в обох випадках мають близькі значення ексцентриситету.

Суми головних кривизн κ_R і κ_r визначаються формулами:

$$\kappa_R = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\,;$$

$$\kappa_r = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\,,$$

де R_1 і R_2, r_1 і r_2 та ρ_1 і ρ_2 – головні радіуси кривизни поверхонь відповідно більшого робочого тіла, меншого робочого тіла та деталі в точці контакту перед прикладанням стискаючої сили $\overline{Q}$.

В окремому випадку притискання до деталі робочих тіл зі сферичними робочими поверхнями

($R_1 = R_2 = R$, $r_1 = r_1 = r$), радіуси яких малі у порівнянні з радіусами кривизни поверхні деталі, тобто

$$\rho_1 >> R > r\ , \quad \rho_2 >> R > r$$

(наприклад, невеликі кулі або алмазні вигладжувачі), контури площадок контакту будуть близькими до колових,

$$e_R \approx e_r \approx 0\ .$$

При цьому формули для κ_R і κ_r спростяться до

$$\kappa_R \approx \frac{2}{R}\ , \quad \kappa_r \approx \frac{2}{r}\ ,$$

а орієнтовне співвідношення сил деформування при попередньому та при остаточному зміцненні набуде вигляду:

$$\frac{Q_r}{Q_R} = \frac{r^2}{R^2}\ .$$

Окремо розглянемо випадок притискання до циліндричної деталі циліндричного ролика, вісь якого паралельна до осі деталі. Півширина прямокутної смуги контакту визначається за формулою [5]:

$$b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\eta \cdot f}{\frac{1}{R_ц} + \frac{1}{\rho_ц}}}\ ,$$

де f – нормальне до поверхні деталі зусилля, що припадає на одиницю довжини твірної циліндра;

$R_ц$ та $\rho_ц$ – радіуси циліндричного ролика та циліндричної деталі відповідно.

Найбільший на площадці контакту тиск, що має місце на її осьовій лінії, визначається формулою [5]:

$$p_0 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{f}{\eta} \cdot \left(\frac{1}{R_ц} + \frac{1}{\rho_ц} \right)}\ .$$

Максимум інтенсивності напружень дорівнює

$$\sigma_{int}^{\max} = 0{,}577 \cdot p_0 = = 0{,}577 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{f}{\eta} \cdot \frac{\rho_ц + R_ц}{R_ц \cdot \rho_ц}}\ . \qquad (9)$$

Він має місце на глибині

$$H^{\max} = 0{,}7 \cdot b = = 0{,}7 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \eta \cdot f \cdot \frac{R_ц \cdot \rho_ц}{\rho_ц + R_ц}} \qquad (10)$$

під осьовою лінією площадки контакту.

З формули (9) випливає, що для рівності максимальних значень інтенсивності напружень у випадках притискання до циліндричної деталі більшого та меншого циліндричних роликів з радіусами $R_ц$ і $r_ц$ відповідно, необхідно задовольнити співвідношенню:

$$\frac{f_r}{f_R} = \frac{r_ц}{R_ц} \cdot \frac{\rho_ц + R_ц}{\rho_ц + r_ц}\ . \qquad (11)$$

При цьому для глибин $H_R^{\max}$ і $H_r^{\max}$, на яких інтенсивність напружень досягатиме максимального значення в цих випадках, з формули (10) отримаємо співвідношення:

$$\frac{H_r^{\max}}{H_R^{\max}} = \frac{r_ц}{R_ц} \cdot \frac{\rho_ц + R_ц}{\rho_ц + r_ц}\ .$$

Спираючись на формули (6) і (7) або (9) і (10), можна показати, що глибина, на якій інтенсивність напружень первинно досягне границі текучості матеріалу при збільшенні сили, з якою стискуються розглядувані тіла, буде тим більшою, чим більші радіуси кривизни контактуючих поверхонь цих тіл. Тому, використовуючи для поверхневого пластичного деформування інструменти, в яких робочі тіла мають різні радіуси кривизни робочих поверхонь, можна наводити в поверхневому шарі деталі залишкові напруження стиску з екстремумом на різній глибині.

Застосовуючи скінченноелементне моделювання, ми дослідили процес деформування поверхневого шару деталі з пружно-пластичного матеріалу при обкочуванні її поверхні лише одним та послідовно двома циліндричними роликами з різними радіусами. Величини нормальних до поверхні деталі зусиль f_R та f_r, що прикладалися до циліндричних роликів відповідно з більшим та з меншим радіусами, задовольняли співвідношенню (11).

У цій роботі ми дотримувались загальноприйнятого в механіці правила знаків для напружень: напруження розтягу вважаються додатними, а напруження стиску – від’ємними. Словосполучення «величина залишкового напруження стиску» слід розуміти як абсолютну величину, тобто модуль залишкового напруження стиску.

Моделювання показало, що після зміцнення деталі більшим роликом, який притискали до деталі з нормальним до її поверхні більшим зусиллям, у деталі сформувався поверхневий шар завтовшки $H_{зміцн}$ з напруженнями стиску, екстремум яких знаходиться на глибині $H_{екстр}$ під поверхнею деталі. Якщо після вказаного попереднього зміцнення провести остаточне зміцнення деталі меншим роликом, притискаючи його до деталі з нормальним до її поверхні меншим зусиллям, то в приповерхневому прошарку завтовшки $H_{екстр}$ зростуть величини залишкових напружень стиску. Оскільки залишкові напруження стиску, особливо в приповерхневому прошарку, уповільнюють зародження та розвиток втомних тріщин, то проведення попереднього та остаточного зміцнення у зазначений вдосконалений спосіб забезпечить деталі підвищену втомну довговічність.

Висновки

На основі аналізу напруженого стану в області контакту тіл, що стискаються, запропоновано формулу, яка визначає співвідношення зусиль деформування при попередньому та остаточному зміцненні деталі робочими тілами відповідно з більшими та з меншими головними радіусами кривизни робочих поверхонь.

Проведення попереднього та остаточного зміцнення у зазначений спосіб дозволить сформувати в деталі поверхневий шар із залишковими напруженнями стиску, причому в приповерхневому прошарку цього шару величини залишкових напружень стиску будуть збільшені. В результаті зміцнювальний ефект від поверхневого пластичного деформування буде підвищено.

У подальших дослідженнях буде продовжено теоретичний аналіз вибору параметрів поверхневого пластичного деформування та проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

Список літератури

1. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Каледин Б. А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием / Б. А. Каледин, П. А. Чепа ; под ред. Ю. В. Скорынина. – Минск : Наука и техника, 1974. – 232с.
3. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки : пер. с польск. / В. Пшибыльский ; под. ред. А. Ф. Пименова. – М. : Металлургия, 1991. – 479 с.
4. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Расчеты на прочность в машиностроении Т. 2. / [С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев и др.] ; под ред. С. Д. Пономарева. – М. : Машгиз, 1958. – 974 с.

Одержано 16.03.2011

Попович А.Г., Шевченко В.Г. Анализ упрочнения поверхностным пластическим деформированием на основе исследования напряженного состояния в области контакта

Проведен анализ распределения интенсивности напряжений по глубине при сжатии двух тел в зависимости от кривизн их поверхностей. Получено соотношение усилий деформирования при предварительном и окончательном упрочнении поверхностным пластическим деформированием рабочими телами разных размеров.

Ключевые слова: *поверхностный слой, интенсивность напряжений, сила деформирования, кривизна поверхности, площадка контакта.*

Popovich A., Shevchenko V. Surface strain hardening analysis on the basis of the stressed state in contact region research

Analysis of the through-thickness stress intensity distribution is made for compression of two bodies depending on their surface curvatures. The ratio between deforming forces at the preliminary and final surface strain hardening by means of working elements of different size is obtained.

Key words: *surface layer, stress intensity, deforming force, surface curvature, contact area.*