



Сивак Р. І.

Вінницький
національний аграрний
університет

Sivak R. I.

Vinnytsia National
Agrarian University

УДК 621.73.011

НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Запропоновано метод оцінки ймовірності появи макротріщин в поверхневому шарі при немонотонній поверхневій пластичній деформації, коли мають місце проміжні розвантаження або знакозмінні деформації.

Ключові слова: пластична деформація, поверхневий шар, розвантаження.

Поверхня як в макроскопічному, так і в мікроскопічному відношенні є одним із основних дефектів трьохмірної структури твердого тіла. Руйнування і пластична деформація твердого тіла також пов'язані з явищами, які протікають на поверхнях розділу. Дуже часто руйнування починається з мікротріщин, які легше виникають на цих поверхнях. Звідси виникає потреба у забезпеченні високої якості поверхонь деталей і покращенні фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. Але при пластичній деформації металів наряду з процесами зміцнення ідуть процеси пластичного розрихлення. Останнім часом встановлено, що при значеннях використаного ресурсу пластичності більших 0,3-0,4 в пластично деформованому шарі виникають термодинамічно стійкі дефекти, які не заліковуються при послідовних термообробках. Тому при поверхневому пластичному деформуванні дуже важливо, щоб ступінь деформації поверхневого шару не перевищила тих значень, при яких використаний ресурс пластичності більший критичного. При імпульсному пластичному деформуванні має місце немонотонна пластична деформація, при якій процес накопичення пошкоджень має ряд особливостей. Тому механізм накопичення і заліковування пошкоджень при немонотонній пластичній деформації повністю не встановлений і на даний час немає єдиної точки зору відносно оцінки деформуємістості металів при немонотонному навантаженні [1,2,3,4,5].

Згідно Г.А. Смірнову-Аляєву [6] пластичну деформацію можна вважати монотонною, якщо

в процесі формозмінення головні вісі тензора швидкостей деформацій співпадають з одними і тими ж матеріальними волокнами, а головні швидкості видовжень не міняють знак. Друга умова монотонності полягає в незмінності за весь процес деформування величини параметра Надаї-Лодє для швидкостей деформацій.

Перша умова монотонності протікання процесу пластичної деформації не виключає можливості значних поворотів головних осей відносно любої нерухомої системи координат, але ця умова припускає можливість вибору для даної частинки такої переносної системи координат, відносно якої повороти головних осей тензора швидкостей деформацій будуть дорівнювати нулю або залишатимуться вельми малими.

Друга умова монотонності рівносильна умові незмінності відношень головних компонент швидкостей деформацій. Тобто компоненти швидкостей деформацій пропорційні одному і тому ж параметру. В подальшому немонотонною будемо вважати деформацію, для якої не виконується тільки перша умова, так як друга умова - це умова простого навантаження.

Якщо перша умова монотонності виконується, а показники напруженого стану η і μ_σ в процесі пластичної деформації змінюються, то в цьому випадку траєкторія навантаження задається залежністю $e_u(\eta, \mu_\sigma)$ або шляхами деформування $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$ і для розрахунку використаного ресурсу пластичності можна використовувати критерії в основу яких покладено гіпотезу про скалярну природу пошкоджень [1,2,3,4].

Якщо в процесі навантаження головні напрямлення тензора швидкостей деформацій повертаються і не співпадають з одними і тими



ж волокнами, то ступінь немонотонності можна оцінити наступним шляхом [4]. Якщо позначити через ω_1 швидкість обертання матеріальної частинки в процесі деформації, а через ω_2 – швидкість обертання головних осей тензора швидкостей деформацій, то умову монотонності можна записати в вигляді $\omega_1 = \omega_2$, а ступінь немонотонності визначити як інтеграл

$$\omega = \int_0^t (\omega_1 - \omega_2) d\tau, \quad (1)$$

де ω є кількісною характеристикою розвитку немонотонності деформації.

Квазімонотонною називають таку деформацію, при якій поворот матеріальних частинок відносно головних осей тензора швидкостей деформацій відбувається в одному напрямі, тобто $\omega_1 \neq \omega_2$, але $\text{sign}(\omega_1 - \omega_2) = \text{const}$.

Знакозмінною будемо називати деформацію при якій напрям обертання матеріальної частинки відносно головних осей тензора швидкостей деформацій змінюється на протилежний, тобто $\omega_1 \neq \omega_2$ і $\text{sign}(\omega_1 - \omega_2) = \text{var}$. Вся траєкторія знакозмінного навантаження може бути представлена в виді ділянок монотонної або квазімонотонної деформації, на границях яких монотонність навантаження матеріальних частинок порушується.

При імпульсному пластичному деформуванні поверхонь деталей машин має місце поверхнева пластична деформація, яка обумовлена ударами частинок робочого середовища. На перший погляд в даному випадку немонотонність пластичної деформації обумовлена тільки проміжними розвантаженнями. Однак, необхідно відмітити, що коли імпульс стиску, який має місце при ударі, поширюється в пружному середовищі і доходить до вільної від напружень поверхні деталі, то він при відбитті від границі розділу породжує імпульс розтягу, який має таку ж форму як і імпульс стиску і поширюється назад від границі. Результируюче напруження на границі завжди дорівнює нулю, але в прилягаючому до поверхні шарі з'являються напруження розтягу, які при відповідних умовах можуть привести до руйнування [9]. Тому для оцінки деформуємістості поверхневого шару при ударній поверхневій пластичній деформації необхідно враховувати і напруження розтягу, тобто розглядати процес деформації як знакозмінний.

Модель накопичення пошкоджень при немонотонному навантаженні ґрунтується на гіпотезі, що пошкодження мають направлений характер і описуються тензором другого рангу. Компоненти цього тензора визначаються механікою протікання пластичної деформації

поверхневого шару в конкретному технологічному процесі, історією навантаження, а також матеріальними функціями, які описують фізико-механічні властивості матеріалу.

Введемо, додержуючись О.А. Ілюшина [7] і Г.Д. Деля [5] тензор пошкоджень ψ_{ij} , компоненти якого визначали наступним шляхом

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) \beta_{ij} de_u, \quad (2)$$

де $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$ – матеріальна функція, яка характеризує чутливість матеріалу до схеми напруженого стану та законів його зміни;

$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$ – показник напруженого стану;

$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – середнє напруження; σ_u –

інтенсивність напружень; e_u – ступінь деформації; μ_σ – параметр Надаї Лоде.

Компоненти направляючого тензора β_{ij} дорівнюють

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}. \quad (3)$$

З співвідношень теорії течії

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\sigma_u} S_{ij} \quad (4)$$

випливає, що

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \beta_{ij} = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\sigma_u} \quad (5)$$

або [8]

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{S_{ij}}{\sigma_u} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{S_{ij}}{\sqrt{\frac{3}{2}} \tau} = S_{ij}^0, \quad (6)$$

де ε_{ij} – компоненти тензора деформацій; S_{ij} –

компоненти девіатора напружень; S_{ij}^0 –

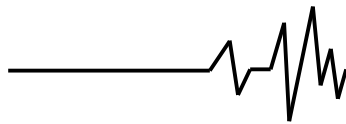
компоненти направляючого тензора напружень.

Тому (2) можна переписати в вигляді

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) S_{ij}^0 de_u \quad (7)$$

або при великих кривизнах траєкторій деформацій (ізломах)

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) S_{ij}^0 f(\omega) de_u, \quad (8)$$



де ψ_{ii} – головні компоненти тензора пошкоджень; S_{ij}^0 – головні компоненти, направляючого тензора, який визначає напрям головних осей тензора напружень; $f(\omega)$ – функція, яка характеризує вплив ступеня немонотонності навантаження і залежить від кривизни траєкторії деформацій.

В фізиці твердого тіла є аналог тензору ψ_{ij} – тензор густини дислокацій, який також можна розглядати як пошкодження. Обидва тензори є девіаторами.

Вважається, що руйнування настає при умові, коли деяка функція інваріантів тензора Ψ_{ij} досягає певного значення. Перший інваріант цього тензора дорівнює нулю. Нехтуючи впливом третього інваріанту, запишемо умову руйнування в вигляді [5]

$$\Psi_{ij}\Psi_{ij}=\text{const} \quad (9)$$

Підінтегральні функції в (2),(7) можна нормувати таким чином, щоб замість умови (9) задовольнити прийнятій в феноменологічній теорії умові

$$\Psi_{ij}\Psi_{ij}=1 \quad (10)$$

Щоб визначити вид функції $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$ розглянемо просте навантаження, при якому $\beta_{ij}, S_{ij}^0, \eta, \mu_\sigma$ залишаються постійними, а $f(\omega)=1$ тоді

$$\Psi_{ij} = \beta_{ij} \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) de_u = \beta_{ij} \varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma), \quad (11)$$

$$\text{де } \varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) de_u.$$

Так як $S_{ij}^0 S_{ij}^0 = 1$, із (10) випливає, що при руйнуванні, коли $e_u = e_p$, $\varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = 1$. Крім того

$$\varphi(0, \eta, \mu_\sigma) = 0. \quad (12)$$

Задовольняючи цим умовам припустимо, що

$$\varphi = \sum_{k=1}^m b_k \left(\frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right)^{n_k}, \quad \sum b_k = 1, \quad n_k > 0, \quad (13)$$

тут $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхня граничних деформацій.

Функція $f(\omega)$ залежить від кривизни траєкторії деформацій і визначається експериментально. Критерій деформуємі (10) можна рекомендувати для визначення допустимих значень ступеней деформацій матеріалу поверхневого шару, при яких величина використаного ресурсу пластичності у

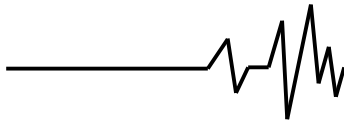
поверхневому шарі не перевищуватиме значень 0,3 – 0,4, а ступінь зміцнення є максимальною. Розглянута методика дозволяє призначати необхідні режими поверхневої пластичної деформації для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик матеріалу поверхневого шару.

Список використаних джерел

1. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – Киев: Выща школа, 1983. – 175с .
3. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М: Металлургия, 1970. – 229 с.
4. Богатов А.А Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирецкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
5. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла / Г.Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – №11 – С.28–32.
6. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов/ Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
7. Ильюшин А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильюшин, Б.Е. Победра. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
8. Сивак И.О. Пластичность металла при немонотонном деформировании / И.О. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск: ДГМА. – 1998. – вып.4. – С. 258–261.
9. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение / Г. Кольский, Д. Рейдер // Разрушение, Т.1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М.: Мир, 1973. – С. 570–608.

Список джерел в транслітерації

1. Del D. Tekhnologicheskaya mekhanika / G.D. Del. – М.: Mashinostroyeniye, 1978. – 174 s.
2. Ogorodnikov V.A. Otsenka deformiruyemosti metallov pri obrabotke davleniyem / V.A. Ogorodnikov. – Kiyev: Vyshcha shkola, 1983. – 175s.



3. Kolmogorov V.L. Napryazheniya, deformatsii, razrusheniye / V.L. Kolmogorov. – M: Metallurgiya, 1970. – 229 s.

4. Bogatov A.A. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniyem / A.A. Bogatov, O.I. Mizhiritskiy, S.V. Smirnov. – M.: Metallurgiya, 1984. – 144 s.

5. Del D. Plastichnost deformirovannogo metalla / D. Del // Fizika i tekhnika vysokikh davleniy. – 1982. – №11 – S. 28–32.

6. Smirnov-Alyayev A. Mekhanicheskiye osnovy plasticheskoy obrabotki metallov / A. Smirnov-Alyayev. – L.: Mashinostroyeniye, 1968. – 272 s.

7. Ilyushin A.A. Osnovy matematicheskoy teorii termovyazkouprugosty / A.A. Ilyushin, B.Ye. Pobedrya. – M.: Nauka, 1970. – 280 s.

8. Sivak I.O. Plastichnost metalla pri nemonotonnoy deformirovaniy / I.O. Sivak // Sovershenstvovaniye protsessov i oborudovaniya obrabotki davleniyem v metallurgii i mashinostroyenii. – Kramatorsk: DGMA. – 1998. – vyp.4. – S. 258–261.

9. Kolskiy G., Reyder D. Volny napryazheniy i razrusheniye / G. Kolskiy, d Reyder // Razrusheniye, T.1. Mikroskopicheskiye i

makroskopicheskiye osnovy mekhaniki razrusheniya. – M.: Mir, 1973. – S. 570–608.

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Аннотация. Предложен метод оценки вероятности появления макротрещин в поверхностном слое при немонотонной поверхностной пластической деформации, когда имеют место промежуточные разгрузки или знакопеременные деформации.

Ключевые слова: пластическая деформация, поверхностный слой, разгрузка.

ACCUMULATION OF DAMAGE DURING PULSED PLASTIC DEFORMATION OF THE SURFACE LAYER

Annotation. The method of an estimation of probability of occurrence makrosplit in a superficial layer is offered at not monotonous superficial plastic deformation, if the intermediate unloadings or signvariable of deformation take place.

Key words: plastic deformation, surface layer, unloading.