

**ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ ПОПЕРЕДНЬОЮ  
УЛЬТРАЗВУКОВОЮ ОБРОБКОЮ**

*Наведено узагальнення синтезної теорії пластичності на визначення межі пластичності матеріалу, який зазнав попередньої ультразвукової обробки. Одержано аналітичну залежність межі пластичності від тривалості та амплітуди напруження акустичного опромінення, яка добре узгоджується з експериментальними даними.*

1. В останні роки ультразвукова обробка металів і сплавів застосовується як один з прогресивних методів технологічних обробок. Численні експериментальні дані [6, 8] свідчать про те, що озвучування відпалених металів призводить до їхнього зміцнення – збільшення межі пластичності. Ультразвукове зміцнення дослідно зареєстровано для золота, срібла, міді, алюмінію, нікелю тощо [8].

Перевага ультразвукової обробки над пластичним деформуванням полягає в тому, що акустичне опромінення не викликає залишкової деформації оброблюваного зразка [2, 4, 6].

Ультразвукові коливання генерують значну кількість дислокацій. Електронно-мікроскопічні дослідження [3, 6] показують, що розподіл дислокацій є вкрай нерівномірним: спостерігаються ділянки з практично вихідною дислокаційною структурою, однак, є зерна, у яких густина дислокацій набагато перевищує вихідну. Дислокації, як правило, зосереджені у витягнутих клубкових сплетіннях і містять велику густину сходинок. Спостерігаються дрібні дислокаційні петлі. Велике число дислокацій скупчується біля границь зерен та інших дефектів структури. Поряд з підвищенням густини дислокацій значно збільшується концентрація вакансій (на декілька порядків вище, ніж при статичному деформуванні), які утворюються при взаємодії дислокацій (перетині, рекомбінації).

Достатня для генерації дислокацій амплітуда осцилюючого напруження  $\sigma_{m0}$  складає для різних матеріалів приблизно 0.3÷0.85 від статичної межі пластичності  $\sigma_S$ . Як показано в експериментах [6] над кристалами Cu, Ni, NaCl та LiF, величина  $\sigma_{m0}$  залежить від амплітуди та температури озвучування і не залежить від його частоти в діапазоні 15÷35 кГц.

Дослідження кінетики збільшення інтенсивності дефектів при ультразвуковому опроміненні показує [6], що густина дислокацій  $N_d$  зростає з часом витримки в ультразвуковому полі  $\tau$  лише до певного моменту  $\tau_n$ , після чого її значення виходить на усталений рівень. Вихід кривої  $N_d(\tau)$  на насичення зумовлений гальмуванням дії джерел Франка – Ріда напруженнями від дислокацій, які були породжені раніше. Також відбувається процес анігіляції дислокацій протилежних знаків, утворених у процесі вібраційного навантаження джерелами, розміщеними в паралельних атомних площинах, внаслідок чого густина дислокацій підтримується на фіксованому рівні. Чим більша межа пластичності відпаленого матеріалу, тим більша тривалість акустичного опромінення до моменту виходу залежності  $N_d(\tau)$  на сталий рівень [6]. Зниження амплітуди та температури ультразвукового опромінення призводить до збільшення часу  $\tau_n$ . При сталому часі опромінення величина  $N_d$  зростає зі збільшенням амплітуди ультразвукового напруження  $\sigma_m$  [6].

Акустичне зміцнення пропорційне до густини породжених ультразвуком дислокацій [3]. Тому межа  $\sigma_S^u$  пластичності матеріалу, який зазнав попередньої ультразвукової обробки, як функція  $\tau$  і  $\sigma_m$  поводить себе подібно до  $N_d$ . Графіки залежностей  $\sigma_S^u(\tau)$  і  $\sigma_S^u(\sigma_m)$  [6] наведено на рис. 1, 2.

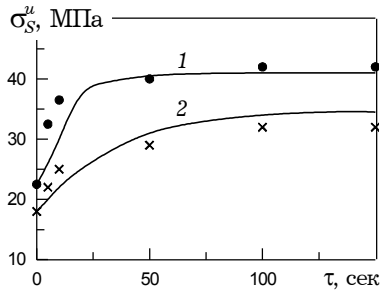


Рис. 1

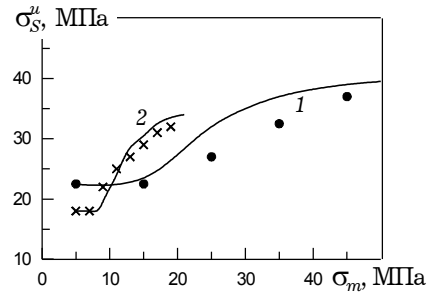


Рис. 2

**2.** Опис залежності межі пластичності від тривалості та напруження ультразвукового опромінення здійснимо в рамках синтезної теорії пластичності [1]. Поверхня пластичності – сфера в тривимірному підпросторі  $\mathbb{R}^3$  п'ятивимірного простору  $\mathbb{R}^5$  девіаторів Ільюшина [5], що відповідає умові Губера – Мізеса

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 2/3 \sigma_S^2, \quad (1)$$

де  $S_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , – компоненти вектора навантаження  $\mathbf{S}$ .

У рамках синтезної теорії у кожній точці сфери (1) будується дотична до неї площина [1]. В результаті цього утворюється множина дотичних площин, які обгинають поверхню пластичності. Про формозміну поверхні пластичності судять за рухом і розміщенням цих дотичних площин. Кожна площина переміщується паралельно сама до себе.

Відстань до площин визначається такою формулою [1]:

$$H^2 = \varphi + 2/3 \sigma_S^2, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – інтенсивність деформації. Якщо вектор навантаження своїм вістрям досягає дотичної площини, то для неї маємо

$$H = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} \cos \lambda = (S_1 n_1 + S_2 n_2 + S_3 n_3) \cos \lambda, \quad (3)$$

де  $\mathbf{n}$  та  $\mathbf{N}$  – одиничні, нормальні до дотичної площини вектори, які задають її орієнтацію у  $\mathbb{R}^3$  і  $\mathbb{R}^5$  відповідно;  $\lambda$  – кут між векторами  $\mathbf{n}$  та  $\mathbf{N}$  [1, 5, 7]. Компоненти вектора навантаження задаються таким чином [1, 7]:

$$S_1 = \sqrt{3/2} S_{xx}, \quad S_2 = S_{xx}/\sqrt{2} + \sqrt{2} S_{yy}, \quad S_3 = \sqrt{2} S_{xz}, \quad (4)$$

де  $S_{ij}$ ,  $i, j = x, y, z$ , – компоненти тензора девіатора напружень.

Величина  $H$  характеризує зміцнення матеріалу.

Початок утворення незворотної деформації символізує умова, що вектор навантаження досягнув своїм вістрям першої дотичної площини [1].

**3.** Здійснимо узагальнення синтезної теорії пластичності на аналітичне описання зміцнення матеріалу після ультразвукової обробки. Оскільки акустичне опромінення зміцнює матеріал, то введемо у формулу (2) доданок  $I_u$ , залежний від параметрів ультразвукової обробки, який збільшує величину  $H$ :

$$H^2 = \varphi + 2/3\sigma_S^2 + (I_u)^2. \quad (5)$$

З огляду на експериментально одержані закономірності зміцнення матеріалу при дії ультразвуку задамо  $I_u$  так:

$$I_u = V_1 |\mathbf{S}_u|^{V_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_3 |\mathbf{S}_u| \Theta}{\sigma_S} t\right) \right] \mathbf{U} \cdot \mathbf{N}. \quad (6)$$

У формулі (6)  $\mathbf{S}_u$  – вектор, координати якого утворені значеннями амплітуд напружень, що виникають при дії ультразвуку;  $\mathbf{U} = \mathbf{S}_u / |\mathbf{S}_u|$  – одиничний вектор, який задає лінію дії вектора ультразвукових напружень в  $\mathbb{R}^3$ ;  $\tau$  і  $\Theta$  – тривалість і гомологічна температура озвучування відповідно;  $V_i = \text{const}$  – сталі матеріалу,  $i = 1, 2, 3$ .

Оскільки акустичне опромінення не викликає залишкової деформації оброблюваного зразка ( $\varphi = 0$ ), то формула (5) набуває такого вигляду:

$$H^2 = \sigma_S^2 + (I_u)^2. \quad (7)$$

Отже, введення в розгляд  $I_u$  задає залежність ступеню зміцнення матеріалу від трьох параметрів ультразвукової обробки: амплітуди осцилюючого напруження, тривалості та температури озвучування.

На основі зроблених узагальнень дослідимо зміну межі пластичності при одноосному розтязі від попередньої ультразвукової обробки, при якій генеруються напруження розтягу-стиску. При цьому з огляду на співвідношення (4) вектор  $\mathbf{S}_u$  має такі компоненти:  $(\sqrt{2/3} \sigma_m, 0, 0)$ , де  $\sigma_m$  – амплітуда осцилюючого напруження. Враховуючи, що  $n_3 = \sin \beta$  (кут  $\beta$  відраховується від площини  $S_2OS_3$  до вектора  $\mathbf{n}$  [7]), скалярний добуток у (6) дорівнює  $\sin \beta \cos \lambda$ , а формули (6) і (7) набудуть такого вигляду відповідно:

$$I_u = V_1 (\sqrt{2/3} \sigma_m)^{V_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_3 \sqrt{2/3} \sigma_m \Theta}{\sigma_S} \tau\right) \right] \sin \beta \cos \lambda,$$

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} \sigma_S^2 + \left[ V_1 (\sqrt{2/3} \sigma_m)^{V_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_3 \sqrt{2/3} \sigma_m \Theta}{\sigma_S} \tau\right) \right] \sin \beta \cos \lambda \right]^2}. \quad (8)$$

Співвідношення (8) означає, що відстань до площин в процесі ультразвукового опромінення збільшується, тобто площини здійснюють переміщення. Поверхня пластичності, як обвідна системи дотичних до неї площин, набуває еліпсоподібної форми (рис. 3).

Якщо після ультразвукового опромінення проводити статичний розтяг, то вектор навантаження на основі (3) має такі координати:  $\mathbf{S}(\sqrt{2/3} \sigma_x, 0, 0)$ . Початок пластичного деформування настане тоді, коли вектор  $\mathbf{S}$  досягне першої площини. Для цієї площини маємо, що  $\beta = \pi/2$ ,

$\lambda = 0$ . Тому згідно з (4)  $H = \sqrt{2/3} \sigma_x$ . Отже, межа пластичності  $\sigma_S^u$ , якій

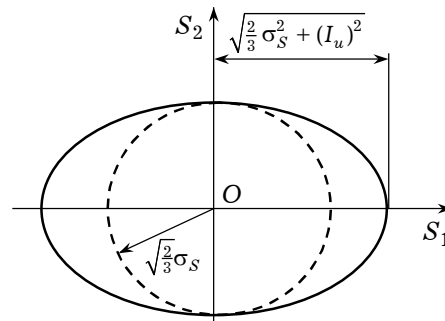


Рис. 3

передувала ультразвукова обробка, визначається зі співвідношення (8) при  $\beta = \pi/2$  та  $\lambda = 0$ :

$$\sigma_S^u = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2}{3} \sigma_S^2 + \left[ V_1 (\sqrt{2/3} \sigma_m)^{V_2} \left( 1 - \exp \left( - \frac{V_3 \sqrt{2/3} \sigma_m \Theta}{\sigma_S} \tau \right) \right) \right]^2}. \quad (9)$$

З рівності (9) випливає, що після озвучування межа пластичності зростає на величину  $I_u$ , що якісно відображає закономірності зміни  $\sigma_S^u$  як функції напруження і тривалості ультразвуку. Справді, член

$$\exp \left( - \frac{V_3 \sqrt{2/3} \sigma_m \Theta}{\sigma_S} \tau \right)$$

прямує до нуля з ростом часу  $\tau$  і значення  $\sigma_S^u$  зростає до певної величини, після чого стабілізується на сталому рівні. Чим більшою є амплітуда напруження ультразвукових коливань  $\sigma_m$  і температура озвучування  $\Theta$ , тим швидше відбудеться зріст  $\sigma_S^u$  до сталого рівня. Чим більшою є межа пластичності відпаленого матеріалу  $\sigma_S$ , тим тривалішим повинно бути акустичне опромінення для досягнення акустичного насичення. Якщо попередня ультразвукова обробка не проводилася ( $I_u = 0$ ), то  $\sigma_S^u = \sigma_S$ .

На основі співвідношення (9) побудовано графічні залежності межі пластичності міді та алюмінію від амплітуди напруження і тривалості поздовжніх коливань розтягу-стиску ультразвукової частоти (рис. 1, 2). Співставлення розрахункових і експериментальних кривих проводилися для зразків, які в своїй центральній частині мали зменшений відносно решти довжини діаметр поперечного перерізу [6]. Враховуючи синусоїдний характер розподілу амплітуд ультразвукового напруження по довжині зразка, можна вважати, що при реалізації стоячої хвилі амплітуда напружень центральної частини зразка залишається сталою. Добре узгодження розрахункових і дослідних кривих свідчить не лише про якісне, але й кількісне узгодження аналітично одержаних результатів з експериментом. Це дає змогу прогнозувати значення такої механічної характеристики матеріалу, як межа пластичності, залежно від параметрів попередньої ультразвукової обробки.

1. Андрусик Я. Ф., Русинко К. Н. Пластическое деформирование упрочняющихся материалов при нагружении в трехмерном подпространстве пятимерного пространства девиаторов // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1993. – № 2. – С. 92–101.
2. Базелок Г. Я., Козырский Г. Я., Полоцкий И. Г., Петрунин Г. А. Действие предварительного ультразвукового облучения на высокотемпературную ползучесть и микротвердость меди // Физика металлов и металловедение. – 1970. – 29, № 3. – С. 508–511.
3. Белостоцкий В. Ф., Полоцкий И. Г. Размножение дислокаций и вакансий в никеле и молибдене при облучении ультразвуком // Металлофизика. – 1976. – Вып. 63. – С. 81–89.
4. Демченко Л. В., Козырский Г. Я., Кононенко В. А., Мордюк Н. С. К вопросу о природе высокотемпературной ползучести твердых растворов, подвергнутых ультразвуковой обработке // Металлофизика. – 1976. – Вып. 63. – С. 51–54.
5. Ильюшин А. А. Пластичность. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
6. Кулемин А. В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 199 с.
7. Русинко А. К. Математичний опис пластичної деформації металів з одночасним ультразвуковим опроміненням // Машинознавство. – 1999. – № 12(30). – С. 16–18.
8. Харитонович М. В., Эскин Г. И. Ультразвук в процессах пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Изд-во ВИЛС, 1970. – 111 с.

**УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ  
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*Приведено обобщение синтезной теории пластичности на определение границы пластичности материала, который был подвергнут предварительной ультразвуковой обработке. Получена аналитическая зависимость границы пластичности от длительности и амплитуды напряжения акустического облучения, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.*

**STRENGTHENING OF METALS BY PRELIMINARY  
ULTRASONIC TREATMENT**

*The work presents generalization of the plasticity synthesis theory on the determination of material plasticity limit that was preliminary ultrasonically treated. The analytic dependence of plasticity limit on the duration and acoustic radiation stress amplitude, which is in good agreement with the experimental data, is obtained.*

Нац. ун-т «Львів. політехніка», Львів

Одержано  
27.02.02