УДК 539.375
Б.К.Гануліч, В.О.Оніщук
Луцький національний технічний університет

ПРО РЕЛАКСАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ БІЛЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ НОРМАЛЬНОГО ВІДРИВУ

У статті доходиться до висновку, що біля вершини тріщини нормального відриву у металічних матеріалах релаксаційні процеси приводять напружений стан до однорідного всестороннього розтягу. На користь такого висновку свідчить експеримент на розтяг і кругення зразків з м'якими прошарками, цим експериментом підтверджується можливість повної релаксації дотичних (з сувних) напружень у металах, коли нормальні (розтягуючі) перевищують межу текучості.

Ключові слова: *тріщина відриву, релаксація дотичних напружень, смуги плинності, критерій появи смуги плинності.*

Розгляд і модельне представлення процесів, що відбуваються біля вершин тріщин, є неминучим при поясненні природи міцності металів. Релаксація напружень у згаданих областях відіграє вирішальну роль у формуванні напружено-деформованого стану об'єму біля вершини тріщини і, таким чином, у формуванні тріщиностійкості металічних матеріалів.

У статті доходиться до висновку, що при появі біля вершини тріщини нормального відриву (тип І) пластичних деформацій у вигляді двох, симетричних відносно площини тріщини, прямолінійних смуг текучості передує стан рівномірного всестороннього розтягу. На користь такого висновку проводиться експеримент на розтяг і кручення зразків з м'якими прошарками, цим експериментом підтверджується можливість повної релаксації дотичних (зсувних) напружень в металах, коли нормальні (розтягуючі) перевищують межу текучості.

Експерименти показують [1,2], що у багатьох випадках на певній стадії деформування пластичні деформації в металах локалізуються в окремих шарах текучості. При однорідному розтязі ці шари відомі як смуги Людерса-Чернова. Смуги Людерса-Чернова з'являються завжди раптово, маючи при цьому порівняно велику довжину. Можливо допустити, що локалізація пластичних деформацій в лініях (поверхнях у тривимірному випадку) текучості є фундаментальною властивістю металів, яка відображає ту обставину, що пластична деформація є результатом незворотних зсувів-просковзувань і тому відбувається в об'ємі зі скінченими, обмеженими знизу, розмірами.

Найочевидніша і найпростіша умова появи пластичної деформації у вигляді окремої лінії текучості $l(x,y)=0$ (мається на увазі плоска деформація) записується у формі [3]

$$\int_0^{d_0} \tau_{nl}\,dl = \tau_s d_0, \tag{1}$$

де d_0 – характеристика металу, константа, що залежить від швидкості навантаження та температури: τ_{nl} – дотичне напруження, яке діє на елемент dl лінії ковзання (що має з'явитись), причому до появи лінії ковзання значення τ_{nl} визначається методами лінійної теорії пружності; $n=n(x,y)$ – нормаль до лінії текучості $l(x,y)=0$; τ_s – границя текучості металу при зсуві (при заданій температурі і швидкості навантаження).

Природньо, що лінія текучості $l(x,y)$ з'явиться там і тоді, де і коли значення функціоналу

$$T\big(l(x,y)\big)=\int_l (\tau_s-\tau_{nl})\,dl, \qquad |l|\ge d_0 \tag{2}$$

буде мінімальним і рівним нулю.

У роботі [3] на основі допущень (1) і (2) показано, що моменту появи смуги (прямої лінії) текучості $y=kx+q$ передує напружений стан, що описується функцією напружень Ері у вигляді

$$\begin{aligned}\varphi(x,y) = C_1\left(-x\sin\alpha + (y-q)\cos\alpha\right)\left(x\cos\alpha + (y-q)\sin\alpha\right)^2 + \\ + C_2\left(-x\sin\alpha + (y-q)\cos\alpha\right)\left(x\cos\alpha + (y-q)\sin\alpha\right) + \\ + C_3\left(-x\sin\alpha + (y-q)\cos\alpha\right),\end{aligned} \tag{3}$$

де C_1, C_2, C_3 – довільні функції, що відповідають вимогам, які накладаються на $\varphi(x,y)$; $\alpha = arcgk$.

Якщо вибрати нову систему координат x_1Oy_1 так, щоб смуга пластичності лежала на осі Ox_1 , то формула (3) перетворюється до вигляду

$$\varphi(x_1,y_1) = C_1(y_1)x_1^2 + C_2(y_1)x_1 + C_3(y_1) \tag{4}$$

Згідно (4) компоненти напружень будуть

$$\begin{aligned}\sigma x_1 &= \frac{\partial^2\varphi}{\partial y_1^2} = C_1''(y_1)x_1^2 + C_2''(y_1)x_1 + C_3''(y_1), \\ \sigma y_1 &= \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1^2} = 2C_1(y_1), \\ \tau_{x_1y_1} &= -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1\partial y_1} = -2C_1'(y_1)x_1 + C_2'(y_1).\end{aligned} \tag{5}$$

В рамках формул (4) і (5) є можливим зробити остаточні висновки про перерозподіл (релаксацію) напружень біля вершини тріщини нормального відриву, де, як відомо [1,2], пластичні деформації на певній стадії навантаження локалізуються у двох, симетричних відносно площини тріщини, смугах текучості. Проте такий аналіз вимагає нових допущень: про геометрію вершини тріщини (яка в цьому випадку вже буде мати скінченну кривизну), про умови на смугах текучості і т.д. Але при певній умовності одержання формул (4) і (5) такий аналіз буде непереконливим. Оскільки напруження (5) не відповідають відомому розв'язку у пружній постановці задачі для тіла з тріщиною, де компоненти тензора напружень мають особливість $\left(x^2+y^2\right)^{-\frac{1}{4}}$, то вимагається експериментальне підтвердження можливості релаксації (перерозподілу) напружень біля вершини тріщини.

При навантаженні тіла з тріщиною локальний критерій текучості досягається в точці безпосередньо біля вершини тріщини, і, при збільшенні навантаження σ , в деякій малій області, що оточує вершину тріщини. Оскільки пластична деформація це завжди результат зсувів-просковзувань одних частин тіла відносно інших, то сусідні області металу, де критерій текучості ще не досягнутий, перешкоджають появі та розвитку пластичних деформацій, внаслідок чого повинен відбуватись перерозподіл (релаксація) напружень.

Думка про те, що при досягненні границі текучості металу в умовах одноосного однорідного розтягу дотичні напруження частково або й повністю релаксують, вперше була висловлена ще Максвелом. Хід його міркувань неважко зрозуміти, якщо подумки відтворити такий експеримент. Візьмемо тонкостінну (тонкостінну для забезпечення однорідного напруженого стану) трубку із ідеально пружно-пластичного матеріалу. При розтязі у матеріалі трубки з'являться пластичні деформації, коли $\sigma = \sigma_s$ (σ_s – границя текучості при розтязі). При крученні пластичні деформації з'являються, якщо $\tau = \tau_s$ (τ_s – границя текучості при зсуві). При одночасному прикладенні розтягуючих і скручуючих зусиль момент появи пластичних деформацій опишеться деякою випуклою дугою, що з'єднує точки $A(\sigma_s, 0)$ і $B(0, \tau_s)$. При $\sigma \geq \sigma_s$ для закручування трубки не потрібно ніяких зусиль $(\tau = 0)$, що й свідчитиме про повну релаксацію дотичних напружень.

В реальних матеріалах при одноосному розтязі однорідних зразків створити ситуацію $\sigma > \sigma_s$ неможливо, а якщо врахувати, що всім реальним матеріалам властиве деформаційне зміцнення, то, як наслідок, неможливо ні підтвердити, ні забезпечити припущення про повну релаксацію дотичних напружень. Стан $\sigma \geq \sigma_s$ вдалось відтворити при випробуваннях зразків з м'якими прошарками [4], де експериментально показано, що при розтягуючих напруженнях, більших від границі текучості металу, дотичні в ньому відсутні, тобто повністю релаксують.

Якщо допустити відповідність напруженого стану м'якого прошарку в зварному зразку [4] напруженому стану області металу біля вершини тріщини, то на основі висновку про повну релаксацію дотичних напружень ($\tau_{x_1y_1}=0$, а також $\tau_{xy}=0$) із формул (5) одержується: $C_1'(y_1)=0$, $C_2'(y_1)=0$. Звідки $C_1(y_1)=a$, $C_2(y_1)=b$, $a,b-const$. Отже, функція напружень (4) має вигляд

$$\varphi(x_1,y_1)=ax_1^2+bx_1+C_3(y_1) \qquad (6)$$

при цьому bx_1 можна опустити, оскільки цей доданок не впливає на напружений стан. У вихідній системі координат xOy ($x_1=lx+my,\quad y_1=-mx+ly,\quad l=\cos\alpha,\quad m=\sin\alpha$)

$$\varphi(x,y)=a(lx+my)^2+C_3(-mx+ly) \qquad (7)$$

Із вимоги $\tau_{xy}=0$ витікає $C_3(-mx+ly)=a(-mx+ly)^2$.

Таким чином $$\varphi(x,y)=a(x^2+y^2),\quad \sigma_x=\sigma_y=2a, \qquad (8)$$

тобто біля вершини тріщини нормального відриву до появи смуг текучості релаксаційні процеси приводять напружений стан до стану всестороннього рівномірного розтягу.

Одержаний висновок про стан рівномірного всестороннього розтягу біля вершини тріщини нормального відриву, можливо, не має практичного значення, бо, як справедливо стверджують автори роботи [5], "…зв'язок між різноманітними параметрами, що характеризують геометрію і напружено-деформований стан у вершині тріщини і які можуть бути покладені в основу формулювань критеріїв руйнування, не представляють особливого інтересу, оскільки в кінцевому рахунку всі вони виявляються вираженими через коефіцієнт інтенсивності напружень". Проте можна допустити, що застосування зразків із м'якими прошарками дозволяє відтворювати "перенапружений" стан околу вершини тріщини в однорідно напруженому об'ємі достатньо великих розмірів і, тим самим, розширює можливості вивчення процесу руйнування металів.

1. Леонов М.Я., Витвицький П.М., Ярема С.Я. Полости пластичности при растяжении пластинок с трещиновидным концентратором. //ДАН СССР.-1963.-148, №3.-С.541-544.
2. Витвицкий П.М., Панасюк В.В., Ярема С.Я. Пластические деформации в окрестности трещин и критерии разрушения. //ПП.-1973.-№2.-С.3-18.
3. Ганулич Б.К. О развитии пластических деформаций в локальных слоях текучести. //ПП.-1988.-№3.-С.73-76.
4. Похмурский В.И., Ганулич Б.К., Иваницкий Б.Л. О релаксации касательных напряжений в металлах. //ФХММ.-1987.-№3.-С.124-125.
5. Об условии в конце трещины/ Л.А.Галин, Я.Б.Фридман, Г.П.Черепанов, В.М.Морозов, В.З.Партон //ДАН СССР.-1969.-187.-№4.-С.754-757.