УДК 669.046:539.374 DOI 10.31649/2311-1429-2019-2-130-137

Ю. В. Човнюк [1]
В. Б. Довгалюк[2]
О. М. Скляренко[2]

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ХВИЛЕУТВОРЕНЬ У ТВЕРДИХ ДЕФОРМОВАНИХ Й КАПІЛЯРНО ПОРИСТИХ ТІЛАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПЛАСТИЧНОЇ ТЕЧІЇ

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ
[2]Київський національний університет будівництва та архітектури

У роботі обґрунтована модель хвилеутворень у твердих деформованих й капілярно-пористих тілах за наявності пластичної течії у них. Показано, що самоорганізація релаксаційних процесів, які протікають у деформованих твердих та капілярно-пористих тілах на концентраторах напружень може призводити до виникнення автохвиль, які можна спостерігати як хвилі зсувів. На початкових стадіях деформування стійкої синхронізації елементарних актів пластичної деформації ще не відбувається, тому найбільш чітко хвилі деформації спостерігаються на ділянці зміцнення деформаційної кривої. У матеріалах, які мають різку границю текучості перехід до скоррельованого протікання релаксаційних процесів відбувається шляхом переміщення смуг Чернова-Людерса. При цьому особливу роль відіграє поворотна компонента деформації, котра досягає максимуму на фронті смуги. Аккомодаційні повороти синхронізують роботу концентраторів напружень у різних зернах/порах тіла чи на границях останніх, створюючи умови для формування авто хвиль деформації.

Ключові слова: хвиля деформації, капілярно-пористе тіло, релаксація, пластична течія, напруження, акомодація.

Постановка задачі

Зараз існує велика кількість експериментальних та теоретичних даних [1-3] про те, що без урахування явищ у ансамблях деформаційних дефектів макроскопічна зміна форми та руйнування твердих та капілярно-пористих тілах (КПТ) описані бути не можуть. Це знайшло, зокрема, відображення у інтенсивно розвинутому у теперішній час багаторівневому підході до аналізу пластичної деформації [2, 3], де остання розглядається як процес, що одночасно розвивається на кількох взаємозв'язаних, взаємообумовлених, але не таких, що зводяться один до одного ієрархічних структурних рівнях. При цьому принцип аддиктивності внесків індивідуальних носіїв деформації (дислокацій) може бути застосований лише у межах макроскопічного й мезоскопічного рівнів, тобто на масштабах до 10 мкм [2]. У той же час процеси, які забезпечують макроскопічну пластичність і руйнування матеріалів, розвиваються вже на більш високих (рівні зерен/пор), супер-структурному й макроскопічному рівнях. Напевно, цим й можна пояснити відносний неуспіх у трактуванні фізичної природи величин, що визначають критерії міцності (наприклад, граничне напруження (σ_b), коефіцієнт концентрації напружень (K_{1c}) та ін.) в межах теорії дислокацій. З'явились роботи [3, 4], де теоретичний аналіз процесів, які відбуваються на вищих структурних рівнях, дав обнадійливі результати щодо опису макроскопічної пластичності, а також навіть технологічних змін форми тіла.

Однак експериментальне забезпечення досліджень на рівні зерен/пор, на макроскопічному структурному рівнях залишається недостатнім. У першу чергу це обумовлено тим, що необхідна методика, яка забезпечує при полі зору порядку 100мм2 точність не гірше 0,1…10 мкм, чого традиційні методи фізики пластичності й міцності не дозволяють здійснити. Крім того, відсутні обґрунтовані фізико-механічні моделі процесів пластичної течії твердих деформованих тіл та КПТ як хвильових процесів.

Аналіз публікацій по темі дослідження

У роботі [13] використаний метод спекл-інтерферометрії, котра дає можливість зафіксувати поле зміщень по всій робочій поверхні деформованого макроскопічного зразка [5]. На нашу думку, у цій ситуації доцільно використати метод КВЧ (крайньо-високочастотної) рефлектометрії зразків (КПТ) за допомогою хвиль електромагнітної природи мм-діапазону (нетеплової інтенсивності) з несучою частотою $f = 60$ ГГц.

У роботі [13] досліджувались плоскі зразки крупнозернистого (розмір зерна 10мкм) сплаву Fe+3%Si й сталі 10Г2Ø з зерном крупністю 80 мкм із розмірами робочої частини 50x10x0,3 й 50x10x1 мм^2 відповідно. Їх активно розтягували з постійною швидкістю $\dot{\varepsilon} = 3 \cdot 10^{-5} c^{-1}$ на жорсткій випробувальній машині Instron-1185. На певних ділянках діаграм навантаження здійснювалась реєстрація 5…8 спектограм. Ці діаграми реєструвались в умовах пластичної течії матеріалів реєструвались в умовах пластичної теції матеріалв, а приріст деформації за умови фіксації кожної спеклограми складав 0,2%. Розшифрування спеклограми так, як це описано у роботі [5] давало можливість визначити вектори зміщень точок по всій робочій поверхні зразка з кроком 1мм. Аналізували у [13] компоненту тензору деформації ε_{ij}, яка є ε_{xy} - зсувом, а також ω_z-що є поворотом навколо вісі (z), нормальної до робочої поверхні об’єкта. Саме ці компоненти тензора ε_{ij} були фізично найбільш визначені (детерміновані). Побудова залежностей ε_{xy}(x), $\omega_z(\mathrm{x})$, що відповідають повздовжній вісі зразка (вісь x – повздовжна вісь розтягу зразка), за кількома послідовно знятими спеклограмами дозволила авторам [13] прослідкувати еволюцію поля дисторсій при розвитку деформацій.

Зокрема, було встановлено, що при деформуванні зразка зі сплаву Fe+3%Si вказані вище залежності мають пульсуючий характер. Причому зміна зсувів та поворотів відбувається синфазно. Максимуми й мінімуми ε_{xy} та ω_z при зростанні загальної деформації $\varepsilon_{заг}$ зміщуються за координатами так, що для довільно обраної точки зразка залежності ε_{xy} та/чи ω_z від часу *t* теж є періодичними. Отже, розподіл пластичної деформації зразка, який навантажується з постійною швидкістю, є циклічним як у просторі, так і у часі, тобто представляє собою хвилю.

За даними експериментів, проведених з Fe+3%Si сплавом, були визначені період T_{pv} й довжина λ_{pv} хвилі деформації, а за їх комбінацією – швидкість $v_{pv} = \lambda_{pv}/T_{pv}$. Встановлено, що $\lambda_{pv} = 5 \pm 2$мм, $T_{pv} \approx 300$с, $v_{pv} = 1{,}7 \cdot 10^{-5}$м/с. Подальший аналіз показав, що швидкість v_{pv} не залежить від розмірів зразка, розмірів зерен й зростає із зростанням швидкості навантаження $\dot{\varepsilon}$. Довжина хвилі λ_{pv} від швидкості навантаження не залежить, але геометричні й структурні параметри зразка справляють на неї вплив. Так у роботах [7,8], де хвильовий характер пластичної деформації спостерігався при активному розтягу алюмінія та аморфного сплаву $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$, були помічені лінійна залежність λ_{pv} від поперечного перерізу зразка й логарифмічна від розміру зерна.

Суттєво інший характер еволюції поля дисторсій спостерігався у [13] при деформуванні сталі з малим вмістом вуглецю. Відомо, що на майданчику текучості у цьому матеріалі деформація розвивається шляхом переміщення однієї чи кількох смуг Чернова-Людерса [9]. Вважають, що при цьому основна деформація локалізована поблизу фронту смуги. Перед фронтом зсуви відсутні, матеріал практично не деформований. Аналіз поля деформації у [13], який відповідає майданчику текучості показав наявність значних зсувів як за фронтом смуги Чернова-Людерса, так і перед ним. Величини їх у обох випадках виявились одного порядку.

Яскраво виражена циклічність зсувів, як при деформуванні сплаву Fe+3%Si, відсутня. На залежності $\omega_z(\mathrm{x})$ спостерігається різкий максимум, котрий співпадає з положенням фронту смуги Чернова-Людерса. У випадку двох смуг, які розповсюджуються назустріч одна одній, спостерігається два екстремуми ω_z протилежного знаку. Після проходження смуги Чернова-Людерса впродовж усього зразка-закінчення майданчика текучості й переходу до стадії зміцнення - екстремуми поворотів анігілюють й розподіли ε_{xy} та ω_z набувають виду, аналогічного тому, що спостерігається для сплаву Fe+3%Si.

Описаним вище способом для цієї стадії деформування також бути визначені довжина хвилі $\lambda_{pv} = 6 \pm 1$мм, швидкість $v_{pv} \approx 2{,}3 \cdot 10^{-5}$м/с. Слід також підкреслити, що швидкість v_{pv} була одного порядку зі швидкістю розповсюдження фронту смуги Чернова-Людерса.

Таким чином, квазістатична деформація сталей, а також інших матеріалів [8] (у т.ч. КПТ), носить, на нашу думку хвильовий характер. Ці хвилі не є пружними, оскільки швидкість останніх

$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (G- модуль зсуву, ρ - щільність матеріалу) й за порядком величин складає приблизно 10^3м/с. Не можна їх ототожнювати й з хвилями пластичності Кольського [10], котрі виникають при ударному навантаженні, розповсюджуючись за швидкістю, яка пропорціональна $\sqrt{\frac{\theta}{\rho}}$ (тут $\theta = \partial b / \partial \varepsilon$, b - напруження, ε - деформація, θ - коефіцієнт зміцнення), що складає приблизно 10^2м/с.

Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні фізико-механічної моделі, що описує виникнення хвилеподібних рухів у твердих деформованих й капілярно-пористих тілах (КПТ) при їх квазістатичній деформації за наявності у останніх пластичних течій.

Виклад повного змісту дослідження

Припущення про можливість існування хвильових явищ за умов стаціонарного характеру навантаження виказані авторами теорії вихрового механічного поля [11]. Вони отримали диференціальні рівняння хвиль зміщень й поворотів, котрі, однак, не розв'язані для конкретних початкових умов, наприклад, випадки плоского деформування зразків, тому не можуть бути безпосередньо співвіднесені з експериментальними даними роботи [13].

Для розуміння про те, що відбувається і як формується хвилі пластичної деформації у твердих й КПТ, напевно, слід знову звернутись до уявлень про структурні рівні. Структурні рівні виникають як результат колективної поведінки сильно взаємодіючих один з одним елементарних для даного рівня носіїв пластичної деформації [2,3]. Результат такої поведінки проявляє себе у формуванні й еволюції субструтктур. У таких умовах з неминучістю робота джерел носіїв деформації стає скоррельованою, само реалізованою. Тоді хвилі пластичної деформації у КПТ (у твердих деформованих тілах [13]) можуть представляти обою автохвилі. Дійсно, як це розглядається у роботі [3], у зв'язку з неоднорідністю поля напружень пластична деформація теж є неоднорідною й розвивається локалізовано у областях концентрації напружень. При цьому кожний акт пластичної течії – релаксаційний процес, у результаті котрого відбувається перерозподіл напружень у об'єкті за рахунок переміщення носіїв деформації. Швидкості змін напруження деформації у області макроскопічного концентратора напружень можуть бути виражені рівняннями Фоккера-Планка [12]:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = \dfrac{d\sigma}{dt} = \dfrac{\sigma_0 - \sigma}{T} - g \cdot \sigma \cdot \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon} = \dfrac{d\varepsilon}{dt} = -\dfrac{\varepsilon}{\tau} + \dfrac{\sigma}{\eta}; \end{cases} \tag{1}$$

тут σ_0 - рівень напружень на концентраторі, до якого вони релаксують; Т- час релаксації напружень; g - константа; $\tau = \frac{\eta}{G}$ – касації деформаційних процесів; η - динамічна в'язкість системи (КПТ, зокрема).

Математична обробка полів зміщень зазвичай включає отримання залежностей *u(x), v(x), u(y), v(y)* (тут *x* – повздовжня вісь зразка, що розтягується; *y* – поперечна вісь у площині робочої частини; *u* – складова вектора зміщення $\vec{r}$ колінеарна з *x*; *v* – складова вектора $\vec{r}$, ортогональна до *n*), котрі апроксимуються сплайнами, а потім диференціюються по координатам. Такий підхід дозволяє розраховувати всі ці компоненти тензора дисторсії для плоского випадку, як симетричні, так й антисиметричні [6]:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{Vmatrix} \varepsilon_{xx}\varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yy} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 0 & \omega_z \\ -\omega_z & 0 \end{Vmatrix}, \tag{2}$$

де $\varepsilon_{xx} = \partial u/\partial x$ локальне видовження матеріалу (КПТ); $\varepsilon_{yy} = \partial v/\partial y$ - локальне звуження; $\varepsilon_{xy} = (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})/2$ - зсув, $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$; $\omega_z = (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})/2$ - поворот навколо вісі *z*, яка є нормальною до робочої поверхні об'єкта (КПТ).

Саме залежності $\varepsilon_{xy}(x)$ й $\omega_z(x)$, котрі відповідають повздовжній вісі зразка, як фізично найбільш визначені (детерміновані) вивчались й аналізувались у подальшому у [13] прослідкувати еволюцію поля дисторсій по мірі розвитку деформації і зробити відповідні висновки й чисельні оцінки параметрів хвиль пластичної деформації у твердих деформованих тілах.

Аналіз системи рівнянь (1) методами, поданими, наприклад, у роботі [12] дає характеристичне рівняння виду:

$$p^2 + \left\{\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right\} \cdot p + \frac{2g\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{T \cdot \tau} = 0, \tag{3}$$

де p - корінь цього рівняння для розв'язку системи (1) у виді $\sigma = \sigma_m \cdot \exp(pt)$ $\varepsilon = \varepsilon_m \cdot \exp(pt)$. Рівняння (3) має три типи розв'язків:

А) $p_{1,2}$ - дійсні числа, які знаходяться зі співвідношень:

$$p_{1,2} = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right) \pm$$

$$\pm \left\{ \frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4} - \left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right) \right\}^{1/2}, \tag{4}$$

при цьому

$$\frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4} > \left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right); \tag{5}$$

у цьому випадку на концентраторі КПТ відбуваються монотонно затухаючі релаксаційні процеси напружень і деформацій, які описуються експонціанальною кривою $\sim \exp[p_{1,2} \cdot t], p_{1,2} < 0;$

Б) $p_1 = p_2$

$$p^* = p_1 = p_2 = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right), \tag{6}$$

при цьому

$$\frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4} = \left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right) \tag{7}$$

у цьому випадку на концентраторі КПТ відбуваються монотонно затухаючі релаксаційні процеси напружень і деформацій, які описуються експонціанальною кривою $\sim \exp[p^* \cdot t], p^* < 0;$

В) $p_{1,2}$ - дійсні числа, тобто: $p_{1,2} = Rep_{1/2} + i \cdot I_m p_{1/2}, i^2 = -1$, знаходяться зі співвідношень:

$$p_{1,2} = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right) \pm$$

$$\pm i \cdot \left\{\left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right) - \frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4}\right\}^{1/2}, \quad (8)$$

при цьому

$$\frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4} < \left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right); \quad (9)$$

у цьому випадку на концентраторі КПТ відбуваються монотонно затухаючі релаксаційні процеси напружень і деформацій, які затухають у часі за експоненціальним законом $\sim \exp\{Rep_{1,2} \cdot t\}$, $Rep_1 = Rep_2$, $(Rep_1, Rep_2) < 0$, а частота цих релаксаційних коливань визначається формулою:

$$\Omega = \left\{\left(2g\frac{\sigma_0}{\eta} + \frac{1}{(T \cdot \tau)}\right) - \frac{\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + g \cdot \sigma_0 \cdot T/\eta\right)^2}{4}\right\}^{1/2}, \quad (10)$$

У реально деформованому твердому тілі чи КПТ концентратори напружень взаємодіють один з одним через поля випромінюваних при релаксації дефектів. (зазначимо, що твердих деформованих тілах концентраторами напружень виступають зерна матеріалу, а у КПТ – пори; носіями пластичних деформацій, течій є дефекти матеріалу або дислокації). Тоді швидкості змін напружень і деформацій повинні залежати не тільки від часу *t,* але й від координат точок зразка. Виникає розподілена система [12] виду:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = \dfrac{\sigma_0 - \sigma}{T} - g \cdot \sigma \cdot \varepsilon + D_\sigma \cdot \dfrac{\partial^2 \sigma}{\partial r^2}; \\ \dot{\varepsilon} = -\dfrac{\varepsilon}{\tau} + \dfrac{\sigma}{\eta} + D_\varepsilon \cdot \dfrac{\partial^2 \varepsilon}{\partial r^2}; \end{cases}, \quad (11)$$

тут r - координата розглядуваної точки, а D_σ й D_ε - константи, які описують розповсюдження відповідно напружень і деформацій у КПТ.
Розшукуємо розв'язки цієї системи (11) у вигляді:

$$\sigma = \sigma_m \cdot \exp(p \cdot t) \cdot \exp\left(\frac{2i\pi r}{\lambda}\right);$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot \exp(p \cdot t) \cdot \exp\left(\frac{2i\pi r}{\lambda}\right), \quad (12)$$

де p визначається з рівності:

$$\left[p+\frac{1}{T}+\frac{g\sigma_0\tau}{\eta}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\sigma\right]\cdot\left[p+\frac{1}{\tau}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\varepsilon\right]=-g\sigma_0/\eta, \tag{13}$$

Корені рівняння (13) визначаються зі співвідношень:

$$\begin{cases} p^2+m_1\cdot p+m_2=0;\ \ m_1=\left\{\frac{1}{T}+\frac{g\sigma_0\tau}{\eta}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\sigma+\frac{1}{\tau}+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\varepsilon\right\}; \\ m_2=\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\sigma+\frac{g\sigma_0\tau}{\eta}+\frac{1}{T}\right]\cdot\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\cdot D_\varepsilon+\frac{1}{\tau}\right]+g\sigma_0\eta; \\ p_{1,2}=-\frac{m_1}{2}\pm\left\{\frac{m_1^2}{4}-m_2\right\}^{1/2}; \end{cases}, \tag{14}$$

якщо $\frac{m_1^2}{4}-m_2<0$, тоді корені $p_{1,2}$ рівняння (13) комплексно спряжені. Оскільки $g\sigma_0/\eta>0$, тоді у інтервалі довжин хвиль λ, який задовольняє умові:

$$\frac{4\pi^2}{u_1}\le\lambda^2\le\frac{4\pi^2}{u_2}, \tag{15}$$

де:

$$u_{1,2}=\left(\frac{1}{T}+\frac{g\sigma_0\tau}{\eta}-\frac{1}{\tau}\pm\sqrt{g\sigma_0/\eta}\right)/(D_\sigma-D_\varepsilon), \tag{16}$$

Корені $p_{1,2}$ рівняння (13) є комплексно спряженими. Тоді напруження й деформації у КПТ є хвилями пластичної течії, що затухають по амплітуді у часі за законом $\sim\exp\left\{-\frac{m_1}{2}\cdot t\right\}$, а частота цих хвиль складає величину:

$$\tilde{\Omega}=\left(m_2-\frac{m_1^2}{4}\right)^{1/2}, m_2>\frac{m_1^2}{4}. \tag{17}$$

Отже, при певному співвідношенні констант τ, T, η, g, D_σ, D_ε і виконанні умови (16) диференціальні рівняння (11) описують двокомпонентну хвилю напружень і деформацій, яка розповсюджується по зразку КПТ. Конкретні параметри такої хвилі повинні визначатись граничними умовами задачі, конкретним механізмом деформації, температурно-швидкісними умовами навантаження, а також пружними постійними навантажуваного об’єкта (КПТ).

Висновки

1. Самоорганізація релаксаційних процесів, які протікають у деформованому твердому тілі та КПТ на концентраторах напружень, може призводити до виникнення у таких тілах автохвиль, що й спостерігається у роботі [13] як хвилі зсувів.
2. На початкових стадіях деформування стійкої синхронізації елементарних актів пластичної деформації ще не відбувається, тому найбільш чітко хвилі деформації можуть спостерігатись на ділянці зміцнення деформаційної кривої матеріалу.
3. У матеріалах, КПТ з різкою границею текучості перехід до скорельованого протікання релаксаційних процесів відбувається, на нашу думку, шляхом переміщення смуг Чернова-

Людерса. Причому особливу роль тут відіграє поворотна компонента (ω_ε), котра досягає максимуму на фронті смуги.

4. Аккомодаційні попороти синхронізують роботу концентраторів напружень у різних зернах твердого деформованого тіла й порах КПТ чи на границях останніх, створюючи умови для деформування авто хвиль деформації.
5. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів напружено-деформованого стану твердих тіл, КПТ, які знаходяться під впливом квазістатичного навантаження, яке супроводжується пластичною течією і виникаючими хвилеподібними процесами деформації матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение маталлов. – М.: Металлургия, 1986.-224с.
2. Владимиров В. И. – В кн.: Вопросы теории дефектов в кристалах. – Ленинград: Наука, 1987.- С.43-57.
3. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриндев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел.. – Новосибирск: Наука, 1986. – 226с.
4. Лихачев В. А., Шудегов В. Е.//Металлофизика. – 1980.-Т.2.-№4.-С.3-15;1980.-Т.2.-№5.-С.3-12;1982.-Т.1.-№1.-С.3.7.
5. Панин В. Е. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Мних Н. М.// Физика метал лов и материаловедение (ФММ).-1988.-Т.66.-№5.-С.1005-1009.
6. Панин В. Е. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Мних Н. М.// ДАН СССР.-1989.-Т.308.-№6.С.1375-1379.
7. Panin V., Zuev L., Danilov V., - In: Collected abstracts of XII European crystallographic meeting.-V.I. – Moscow: Inst. Crystallography AS USSR, 1989. – P.138,139.
8. Фролов К. В,, Панин В. Е., Зуев Л.Б. и др.// Известия вузов. Физика.-1990.-№2.-С.17-35.
9. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1965.-431с.
10. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. – М.: ИЛ, 1955.-192с.
11. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Егорушкин В. Е. и др.// Известия вузов. Физика. – 1987.-№1.-С.34-51.
12. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернявский Д. С. Математическое маделирование в биофизике.-М.: Наука, 1975.-343с.
13. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Мних Н. М., Олемской А. И. Пластическое течение как волновой процесс// Известия вузов. Черная металлургия.-1990.-№10.-С.79-81.

REFERENCES

1. Rybin V. V. Bol'shiye plasticheskiye deformatsii i razrusheniye matallov. – M.: Metallurgiya, 1986.-224s.
2. Vladimirov V.I. – V kn.: Voprosy teorii defektov v kristalakh. – Leningrad: Nauka, 1987.- S.43-57.
3. Panin V. Ye., Likhachev V.A., Grindev YU.V. Strukturnyye urovni deformatsii tverdykh tel.. – Novosibirsk: Nauka, 1986. – 226s.
4. Likhachev V. A., Shudegov V.Ye.//Metallofizika. – 1980.-T.2.-№4.-S.3-15;1980.-T.2.-№5.-S.3-12;1982.-T.1.-№1.-S.3.7.
5. Panin V. Ye. Zuyev L.B., Danilov V.I., Mnikh N.M.// Fizika metal lov i materialovedeniye (FMM).-1988.-T.66.-№5.-S.1005-1009.
6. Panin V. Ye. Zuyev L.B., Danilov V.I., Mnikh N.M.// DAN SSSR.-1989.-T.308.-№6.S.1375-1379.
7. Panin V., Zuev L., Danilov V., - In: Collected abstracts of XII European crystallographic meeting.-V.I. – Moscow: Inst. Crystallography AS USSR, 1989. – P.138,139.
8. Frolov K. V,, Panin V.Ye., Zuyev L.B. i dr.// Izvestiya vuzov. Fizika.-1990.-№2.-S.17-35.
9. Mak Lin D. Mekhanicheskiye svoystva metallov.-M.: Metallurgiya, 1965.-431s.
10. Kol'skiy G. Volny napryazheniy v tverdykh telakh. – M.: IL, 1955.-192s.
11. Panin V. Ye., Grinyayev YU.V., Yegorushkin V.Ye. i dr.// Izvestiya vuzov. Fizika. – 1987.-№1.-S.34-51.
12. Romanovskiy YU.M., Stepanova N.V., Chernavskiy D.S. Matematicheskoye madelirovaniye v biofizike.-M.: Nauka, 1975.-343s.
13. Zuyev L.B., Danilov V. I., Mnikh N. M., Olemskoy A. I. Plasticheskoye techeniye kak volnovoy protsess// Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya.-1990.-№10.-S.79-81.

Човнюк Юрій Васильович – канд. техн. наук, доцент, професор Міжнародної Кадрової Академії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, e-mail: Dicteruk@ukr.net.

Довгалюк Володимир Борисович – канд. техн. наук., професор, дійсний член Академії будівництва України, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, e-mail: 2280170@ukr.net. ORCID 0000-0002-4836-5354.

Скляренко Олег Михайлович – канд. техн. наук, професор, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, e-mail: Dicteruk@ukr.net.

Ю. В. Човнюк[1]

В. Б. Довгалюк[2]

О. М. Скляренко[2]

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЛНООБРАЗОВАНИЙ В ТВЕРДЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ И КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ

[1]Киевский национальный университет строительства и архитектуры
[2]Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

В работе обоснована модель хвилеутворень в твердых деформированных и капиллярно-пористых телах при наличии пластического течения в них. Показано, что самоорганизация релаксационных процессов, протекающих в деформированных твердых и капиллярно-пористых телах на концентраторах напряжений может приводить к возникновению автоволн, которые можно наблюдать как волны оползней. На начальных стадиях деформирования устойчивой синхронизации элементарных актов пластической деформации еще не происходит, поэтому наиболее четко волны деформации наблюдаются на участке укрепления деформационного кривой. В материалах, которые имеют резкую границу текучести переход к скоррельованого протекания релаксационных процессов происходит путем перемещения полос Чернова-Людерса. При этом особую роль играет поворотная компонента деформации, которая достигает максимума на фронте полосы. Аккомодационного повороты синхронизируют работу концентраторов напряжений в различных зернах / порах тела или на границах последних, создавая условия для формирования авто волн деформации.

Ключевые слова: волна деформации, капиллярно-пористое тело, релаксация, пластическая течение, напряжение, аккомодация.

Човнюк Юрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент, профессор Международной Кадровой Академии, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, e-mail: Dicteruk@ukr.net.
Довгалюк Владимир Борисович – канд. техн. наук., профессор, действительный член Академии строительства Украины, Киевский национальный университет строительства и архитектуры,. Киев, e-mail: 2280170@ukr.net.
Скляренко Олег Михайлович – канд. техн. наук, профессор, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, e-mail: Dicteruk@ukr.net.

YU. Chovnyuk[1]
V. Dovhalyuk[2]
O. Sklyarenko[2]

MODELING AND ANALYSIS OF WAVES IN SOLID DEFORMED AND CAPILLARY POORS IN THE PRESENCE OF PLASTIC FLUID

[1]Kiev National University of Civil Engineering and Architecture
[2]National University of Life Sciences and Natural Resources of Ukraine

The model of waveforms in solid deformed and capillary-porous bodies in the presence of plastic flow in them is grounded in the work. It has been shown that the self-organization of relaxation processes occurring in deformed solids and capillary-porous bodies at stress concentrators can lead to the occurrence of self-waves, which can be observed as shear waves. In the initial stages of deformation of stable synchronization of elementary acts of plastic deformation does not occur, so most clearly the waves of deformation are observed in the area of strengthening of the deformation curve. In materials that have a sharp boundary of fluidity, the transition to a correlated flow of relaxation processes occurs by moving Chernova-Luders bands. The rotational component of the deformation, which reaches a maximum at the front of the strip, plays a special role. Accomodation turns synchronize the work of stress concentrators in different grains / pores of the body or at the borders of the latter, creating the conditions for the formation of auto-deformation waves.

Keywords: deformation wave, capillary-porous body, relaxation, plastic flow, stress, accommodation.

Chovnyuk Yurii – Cand. tech. Associate Professor, Professor at the International Personnel Academy, National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine, e-mail: Dicteruk@ukr.net.
Dovgalyuk Volodymyr – Cand. tech. Professor, Full Member, Academy of Civil Engineering of Ukraine, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, e-mail: 2280170@ukr.net.
Sklyarenko Oleg – Cand. tech. of Sciences, Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, e-mail: Dicteruk@ukr.net.