УДК 539.001.5

А. Я. КУЛІЧЕНКО, А. Р. МІЛЯНИЧ (Львівська філія ДІІТу)

ТЕОРІЯ РУЙНУВАННЯ ОРТОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИГЛЯДІ ЗАЛИШКІВ ЗАСТИГЛОГО ПЕКУ В КОТЛАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЦИСТЕРН

Для визначення умов руйнування ізотропних матеріалів при тривісному напруженому стані запропоновано більшу кількість критеріїв та наведено припущення, що для визначення умов руйнування ортотропних матеріалів можна застосовувати енергію формозмінення.

Ключові слова: пек, руйнування, матеріал, напруження, деформація, коефіцієнт, форма, енергія

«У вагонне депо Дрогобич (Львівська залізниця) для зачистки та утилізації залишків з під пеку прибули вагони (цистерни) №№ 57343808, 57267155, 57267460, 57267437, 57343428, 57343824, 57343667, 57316077, 57343345, 57267502 типу 5700 моделі 15-1482, які є власністю державного підприємства «Новояворівське державне підприємство «Екотрансенерго» і приписані до станції Шкло (Львівська залізниця).

Факт передачі вагонів та наявності залишків пеку підтверджується Актом від 29.09.2011 р., згідно якого у цистернах виявлені залишки вантажу, а саме: в цистерні № 57343808 залишок становив 2634 кг; в цистерні № 57267155 залишок становив 1987 кг; в цистерні № 57267460 залишок становив 1987 кг; в цистерні № 57267437 залишок становив 1987 кг; в цистерні № 57343428 залишок становив 2634 кг; в цистерні № 57343824 залишок становив 1987 кг; в цистерні № 57343667 залишок становив 1987 кг; в цистерні № 57316077 залишок становив 2671 кг; в цистерні № 57343345 залишок становив 2467 кг; в цистерні № 57267502 залишок становив 2467 кг.» [1].

До проведення досліджень і роботи над даною статтею наштовхнув процитований вище висновок компетентної експертної комісії, де наведена кількість залишків, та візуального спостереження за процесом видалення із котлів залізничних цистерн застиглого пеку, що проводився на промивально-пропарювальній станції (ППС) вагонного депо Дрогобич. Складність технологічного процесу видалення застиглого пеку в першу чергу полягала у складності руйнування його монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

Відомо, що пек – це тверда або в'язка маса чорного кольору, яка залишається від перегонки кам'яного вугілля, торф'яного або деревного дьогтю, сірки, смоли тощо. Застосовується для виготовлення покрівельного гідроізоляційного матеріалу. Попередній аналіз фізико-механічних властивостей, наприклад кам'яновугільного пеку, та дослідження його структури дали підставу вважати, що пек можна віднести до ортотропних матеріалів.

На даний час для матеріалів, яким властиві ортогональні міцнісні та пружні характеристики, ще недостатньо розроблені, створені і впроваджені надійні методи, які дозволяють визначати умови руйнування таких матеріалів при складному тримірному напруженому стані. Потреби проектувальників задовольняли методи розрахунку умов руйнування при простих розтягуючи, стискуючих та згинаючих навантаженнях. У даному представленому дослідженні припускається, що енергія формозмінення являє собою розумну основу для опису непружної поведінки ортотропного матеріалу для випадку, коли головні напруження за напрямом співпадають з осями матеріалу. Авторами запропонований простий алгебраїчний метод умов руйнування.

Виведення критерію руйнування. Розглянемо елементарний одиничний куб матеріалу (рис. 1).

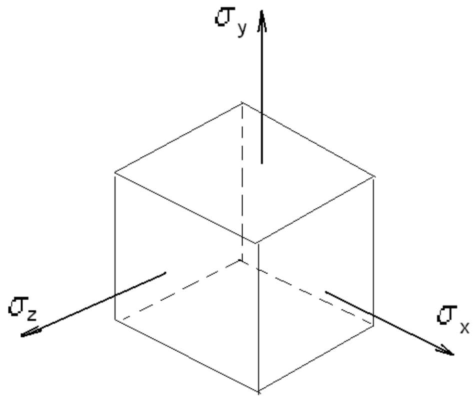

Рис. 1

Геометричні осі матеріалу співпадають з ортогональними осями *X, Y, Z*. Напружений стан визначається напруженнями σ_x, σ_y та σ_z. Згідно закону Гука пружні деформації матимуть вигляд [2]:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{xy}\frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xz}\frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_y &= -\mu_{yx}\frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{yz}\frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_z &= -\mu_{zx}\frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{zy}\frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

де E – модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга); μ – коефіцієнт Пуассона.

Необхідно визначити дев'ять пружних сталих матеріалу, тобто шість коефіцієнтів μ та три E.

У пружному випадку запас пружної енергії не повинен залежати від порядку прикладення напружень. Отримуємо шість рівнянь:

$$U_{xyz} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_x\sigma_y}{E_y}\mu_{xy} - \frac{\sigma_x\sigma_z}{E_z}\mu_{xz} - \frac{\sigma_y\sigma_z}{E_z}\mu_{yz}; \quad (2a)$$

$$U_{xzy} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_x\sigma_z}{E_z}\mu_{xz} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{E_y}\mu_{xy} - \frac{\sigma_z\sigma_y}{E_y}\mu_{zy}; \quad (2b)$$

$$U_{yxz} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_y\sigma_x}{E_x}\mu_{yx} - \frac{\sigma_y\sigma_z}{E_z}\mu_{yz} - \frac{\sigma_x\sigma_z}{E_z}\mu_{xz}; \quad (2c)$$

$$U_{yzx} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_y\sigma_z}{E_z}\mu_{yz} - \frac{\sigma_y\sigma_x}{E_x}\mu_{yx} - \frac{\sigma_z\sigma_x}{E_x}\mu_{zx}; \quad (2d)$$

$$U_{zxy} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_z\sigma_x}{E_x}\mu_{zx} - \frac{\sigma_z\sigma_y}{E_y}\mu_{zy} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{E_y}\mu_{xy}; \quad (2e)$$

$$U_{zyx} = 0,5\cdot\left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z}\right) - \frac{\sigma_z\sigma_y}{E_y}\mu_{zy} - \frac{\sigma_z\sigma_x}{E_x}\mu_{zx} - \frac{\sigma_y\sigma_x}{E_x}\mu_{yx}. \quad (2f)$$

Оскільки всі енергії в лівій частині рівнянь (2) є рівними, шість величин, які далі будуть наведені, також повинні бути рівними

$$\frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}}{E_z} + \frac{\mu_{yz}}{E_z}; \quad (3a)$$

$$\frac{\mu_{xz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{zy}}{E_y}; \quad (3b)$$

$$\frac{\mu_{yx}}{E_x} + \frac{\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{xz}}{E_z}; \quad (3c)$$

$$\frac{\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{yx}}{E_x} + \frac{\mu_{zx}}{E_x}; \quad (3d)$$

$$\frac{\mu_{zx}}{E_x} + \frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y}; \quad (3e)$$

$$\frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{zx}}{E_x} + \frac{\mu_{yx}}{E_x}. \quad (3f)$$

Для цього необхідно, щоб:

$$\frac{\mu_{yz}}{E_z} = \frac{\mu_{zy}}{E_y}; \quad (4a)$$

$$\frac{\mu_{xz}}{E_z} = \frac{\mu_{zx}}{E_x}; \quad (4b)$$

$$\frac{\mu_{xy}}{E_y} = \frac{\mu_{yx}}{E_x}. \quad (4c)$$

Це означає, що дев'ять пружних сталих не є незалежними. Достатньо шести незалежних констант матеріалу, як можна очікувати із того факту, що кожне рівняння енергії (2) має лише шість констант. Далі, розв'язуємо рівняння (4) відносно трьох коефіцієнтів Пуассона:

$$\mu_{yx} = \frac{E_x}{E_y}\mu_{xy}; \tag{5a}$$

$$\mu_{zx} = \frac{E_x}{E_z}\mu_{xz}; \tag{5b}$$

$$\mu_{zy} = \frac{E_y}{E_z}\mu_{yz}. \tag{5c}$$

Із рівняння (1), застосовуючи (5), отримуємо деформації:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{xy}\frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xz}\frac{\sigma_z}{E_z}; \tag{6a}$$

$$\varepsilon_y = -\mu_{xy}\frac{\sigma_x}{E_y} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{yz}\frac{\sigma_z}{E_z}; \tag{6b}$$

$$\varepsilon_z = -\mu_{xz}\frac{\sigma_x}{E_z} - \mu_{yz}\frac{\sigma_y}{E_z} + \frac{\sigma_z}{E_z}. \tag{6c}$$

Енергію викривлення форми можна визначити, відокремлюючи від загальної енергії деформування ту частину, яка пов'язана лише із зміною об'єму наведеного на рис. 1 кубічного елемента матеріалу. Зміна об'єму від впливу напружень σ_x, σ_y та σ_z, якщо знехтувати членами другого порядку, матиме наступний вигляд

$$\Delta V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \tag{7}$$

Такі ж зміни об'єму можна досягнути при напруженнях σ_x^*, σ_y^* та σ_z^* без зміни форми, якщо напруження, відмічені зірочками, вибрані так, що викликані ними деформації ε^* у трьох напрямках є однаковими:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}. \tag{8}$$

Система напружень із зірочкою визначається наступними рівняннями:

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma_x^*}{E_x} - \mu_{xy}\frac{\sigma_y^*}{E_y} - \mu_{xz}\frac{\sigma_z^*}{E_z}; \tag{9a}$$

$$\varepsilon^* = -\mu_{xy}\frac{\sigma_x^*}{E_y} + \frac{\sigma_y^*}{E_y} - \mu_{yz}\frac{\sigma_z^*}{E_z}; \tag{9b}$$

$$\varepsilon^* = -\mu_{xz}\frac{\sigma_x^*}{E_z} - \mu_{yz}\frac{\sigma_y^*}{E_z} + \frac{\sigma_z^*}{E_z}. \tag{9c}$$

Енергія, яка пов'язана із зміною об'єму, становитиме:

$$U_{\Delta V} = 0{,}5\cdot\left(\sigma_x^* + \sigma_y^* + \sigma_z^*\right)\cdot\varepsilon^*. \tag{10}$$

Розв'язуючи рівняння (9) відносно напружень із зірочкою, одержуємо:

$$\sigma_x^* = \varepsilon^*\frac{\left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} + \frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}}{E_y}\right)}{\left(\frac{1}{E_xE_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_xE_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - \frac{2\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_yE_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_yE_z}\right)}; \tag{11a}$$

$$\sigma_y^* = \varepsilon^*\frac{\left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{yz}}{E_x}\right)}{\left(\frac{1}{E_xE_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_xE_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - \frac{2\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_yE_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_yE_z}\right)}; \tag{11b}$$

$$\sigma_z^* = \varepsilon^*\frac{\left(\frac{E_z}{E_xE_y} - \frac{E_z\mu_{xy}^2}{E_y^2} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{yz}}{E_x}\right)}{\left(\frac{1}{E_xE_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_xE_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - 2\frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_yE_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_yE_z}\right)}. \tag{11c}$$

Додаємо між собою всі рівняння системи (11):

$$\sigma_x^* + \sigma_y^* + \sigma_z^* = \frac{\left[\begin{array}{l} \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} - \\ -\frac{E_z}{E_y^2}\mu_{xy} + 2\cdot\left(\frac{\mu_{yz}}{E_x} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y}\right) + \\ +2\cdot\left(\frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z}\right) \end{array}\right]\cdot\varepsilon^*}{\left[\begin{array}{l} \frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - \\ -2\frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \end{array}\right]}. \tag{12}$$

Деформацію ε^* визначаємо із залежностей (8) і (6):

$$\varepsilon^* = (1/3)\cdot\left[\begin{array}{l} +\sigma_x\cdot\left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{xz}}{E_z}\right) \\ +\sigma_y\cdot\left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{yz}}{E_y}\right) \\ +\sigma_z\cdot\left(\frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_z}\right) \end{array}\right]. \tag{13}$$

Для енергії зміни об’єму із рівнянь (10), (12) і (13) одержуємо:

$$U_{\Delta V} = \frac{\left[\begin{array}{l} +\sigma_x\cdot\left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{xz}}{E_z}\right) \\ +\sigma_y\cdot\left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{yz}}{E_z}\right) \\ +\sigma_z\cdot\left(\frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{zx}}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_x}\right) \end{array}\right]^2 \times \left[\begin{array}{l} \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} \\ -\frac{E_z}{E_y}\mu_{xy} + 2\cdot\left(\frac{\mu_{yz}}{E_x} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y}\right) \\ +2\cdot\left(\frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z}\right) \end{array}\right]}{18\cdot\left[\begin{array}{l} \frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} \\ -2\cdot\frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_x} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \end{array}\right]}. \tag{14}$$

Тоді енергію викручування форми отримаємо, віднімаючи вираз (14) із залежності (2а):

$$U_{ВИКР.Ф.}=\begin{bmatrix} 0{,}5\cdot\begin{pmatrix} \frac{\sigma_x^2}{E_x} \\ +\frac{\sigma_y^2}{E_y} \\ +\frac{\sigma_z^2}{E_z} \end{pmatrix} \\ -\frac{\sigma_x\sigma_y}{E_y}\mu_{xy} \\ -\frac{\sigma_{xz}}{E_z}\mu_{xz} \\ -\frac{\sigma_y\sigma_z}{E_z} \end{bmatrix}-\frac{\begin{bmatrix} \sigma_x\left(\frac{1}{E_x}-\frac{\mu_{xy}}{E_y}-\frac{\mu_{xz}}{E_z}\right) \\ +\sigma_y\left(\frac{1}{E_y}-\frac{\mu_{xy}}{E_y}-\frac{\mu_{yz}}{E_z}\right) \\ +\sigma_z\left(\frac{1}{E_z}-\frac{\mu_{xz}}{E_z}-\frac{\mu_{yz}}{E_z}\right) \end{bmatrix}^2\times\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x}+\frac{1}{E_y}+\frac{E_z}{E_xE_y}-\frac{\mu_{yz}^2}{E_z}-\frac{\mu_{xz}^2}{E_z} \\ -\frac{E_z}{E_y^2}\mu_{xy}+2\cdot\left(\frac{\mu_{yz}}{E_x}+\frac{\mu_{xz}}{E_y}+\frac{\mu_{xy}}{E_y}\right) \\ +2\cdot\left(\frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y}+\frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y}+\frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z}\right) \end{bmatrix}}{18\cdot\begin{bmatrix} \frac{1}{E_xE_y}-\frac{\mu_{yz}^2}{E_xE_z}-\frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} \\ -2\frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_yE_z}-\frac{\mu_{xz}^2}{E_yE_z} \end{bmatrix}}. \quad (15)$$

Представлений авторами метод визначення умов руйнування ґрунтується на припущенні, що гранична величина енергії формо змінення є постійною при всіх комбінаціях напружень σ_x, σ_y та σ_z. Для застосування критерію руйнування необхідно мати шість пружних констант і одне значення границі міцності при простому розтягу, яке дозволяє визначити величину граничної енергії.

Рівняння (15) приводиться до звичайного виразу енергетичної теорії міцності ізотропних матеріалів, якщо припускати, що:

$$E_x = E_y = E_z = E;$$

$$\mu_{xy} = \mu_{xz} = \mu_{yz} = \mu;$$

$$U_{ВИКР.Ф.}=\frac{1+\mu}{6E}\cdot\begin{bmatrix} \left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+ \\ +\left(\sigma_x-\sigma_z\right)^2+ \\ +\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Хоча на початку даної роботи було констатовано, що пек можна віднести до ортотропних матеріалів, все ж таке твердження є суперечливим і не остаточним, оскільки за своєю природою даний матеріал має низку розбіжностей у своїй характеристиці, що ставить під сумнів поставлене нами остаточне твердження. Із ряду технічних причин досить важко чітко визначитись із характеристикою даного ізотропного матеріалу, тому з метою створення «універсальності» запропонованої теорії, автори розглядають її і для напівортотропного матеріалу.

Застосування теорії руйнування для напівортотропного матеріалу. В якості прикладу практичного застосовування виразу (15) розглянемо матеріал з однаковими властивостями у двох напрямах і відмінними у третьому. Припускаємо далі, що напруження є також однаковими у цих двох напрямах і відрізняються в третьому напрямі. Такі умови можуть існувати у посудинах сферичної форми, до яких можна віднести і корпус залізничної цистерни.

Нехай S_τ - границя міцності в тангенціальному напрямі при одновісному напруженні

$$\sigma_\tau = \sigma_x = \sigma_y;$$

$$\sigma_r = \sigma_z;$$

$$E_\tau = E_x = E_y;$$

$$E_r = E_z;$$

$$\alpha = \mu_{xy};$$

$$\beta = \mu_{xz} = \mu_{yz}.$$

Граничну величину енергії викривлення форми визначаємо із рівняння (15), припускаючи,що $\sigma_x = S_\tau$ та $\sigma_y = \sigma_z = 0$:

$$U_{ГРАНИЧ.} = \frac{S_\tau^2}{2E_r} \cdot \left\{ 1 - \frac{\left[1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1-\alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \right\}. \tag{17}$$

Енергію викривлювання для напівортотропного матеріалу при $\sigma_\tau = \sigma_x = \sigma_y$ та $\sigma_r = \sigma_z$ також отримуємо із виразу (15):

$$U_{ВИКР.Ф.} = \frac{\sigma_\tau^2}{2E_\tau} \left\{ \begin{array}{l} +2 \cdot (1+\alpha) + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right)^2 \frac{E_r}{E_\tau} - 4\beta \cdot \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right) \frac{E_\tau}{E_r} \\ - \frac{\left[2 \cdot \left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right) + (1 - 2\beta) \cdot \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right) \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1-\alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \end{array} \right\}. \tag{18}$$

Прирівнюючи значення енергії викривлення форми, згідно виразу (18), і граничну енергію з виразу (17), отримуємо вираз для розрахунку шуканої величини напруження руйнування:

$$\sigma_\tau^{\text{руйнув.}} = S_\tau \cdot \sqrt{ \frac{ 1 - \frac{\left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right)^2 \cdot \left[(1-\alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} }{ \left[\begin{array}{l} +2 \cdot (1-\alpha) \\ + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right)^2 \frac{E_\tau}{E_r} \\ -4 \cdot \beta \frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \frac{E_\tau}{E_r} \end{array} \right] - \frac{\left[2 \cdot \left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right) + (1 - 2\beta) \frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1-\alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} } } \tag{19}$$

Висновок

У представленому дослідженні отриманий вираз для енергії формозмінення, знехтувавши в загальній енергії деформування ту частину, яка пов'язана з однаковою зміною об'єму при відсутності явища викривлення форми. Із наведеного матеріалу видно, що руйнування відповідає досягненню границі пружності, коли зсув у деякій точці кристалографічної площини переходить границю лінійної відповідності між напруженням і деформацією.

Припускається, що гранична величина енергії викривлення форми, яка описується рівнянням (15), є сталою при всіх комбінаціях σ_x, σ_y та σ_z де застосовується дев'ять пружних сталих матеріалу, хоча традиційно прийнято вважати, що для визначення величини граничної енергії викривлення форми необхідно лише шість пружних сталих матеріалу і одну границю текучості. Автори вважають, що прийняті допущення сприяють полегшенню у проведенні розрахунків і нададуть можливість запропонованій теорії руйнування ортотропних матеріалів бути більш доступною при практичному застосовуванні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Висновок № 2141/2385 комплексної залізнично-транспортної та хімічної експертизи за позовом Державного територіально-галузевого об'єднання «Львівська залізниця» від 26.10.2011, м. Львів [Текст].
2. Фесик, С. П. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / С. П. Фесик. – 2-е изд. – К.: Будівельник, 1982. – 280 с.

Надійшла до редколегії 08.12.2011.
Прийнята до друку 14.12.2011.

А. Я. КУЛИЧЕНКО, А. Р. МИЛЯНИЧ

ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ ОСТАТКОВ ЗАСТЫВШЕГО ПЕКА В КОТЛАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН

Для определения условий разрушения изотропных материалов при трехосном напряженном состоянии предложено большее количество критериев и предположено, что для определения условий разрушения ортотропных материалов можно применять энергию формоизменения.

Ключевые слова: пек, разрушение, материал, напряжение, деформация, коэффициент, форма, энергия

A. Ya. KULICHENKO, A. R. MILYANYCH

THEORY OF DESTRUCTION OF ORTHOTROPIC MATERIALS AS THE SOLIDIFIED PITCH RESIDUES IN RAILWAY TANK BOILERS

To determine the conditions of destructing isotropic materials under triaxial stress state more criteria are proposed and it is suggested that for determining the conditions of destructing orthotropic materials the distortion energy can be used.

Keywords: pitch, destruction, material, stress, strain, factor, form, energy