

## ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЛІНІЙНОГО І ПЛОСКОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В УМОВАХ ЗМІННИХ ТЕМПЕРАТУР

*Анализируются результаты экспериментального исследования упрочнения материалов при пластическом деформировании в условиях линейного и плоского напряженного состояния при переменных температурах. Предложены уравнения, описывающие изменение сопротивления и эволюцию поверхности текучести материалов, чувствительных и нечувствительных к истории температурного воздействия.*

*The results are analyzed of the experimental investigation into the material hardening during plastic deformation under the linear and two-dimensional stress states and variable temperatures. The equations are proposed that describe the variation of resistance characteristics and evolution of the yield surface of materials, which are both sensitive and non-sensitive to the history of thermal treatment.*

### Вступ.

Дослідження законів зміцнення матеріалів, спричиненого пластичним деформуванням за неізотермічного навантаження, має важливе значення як для розвитку теорій пластичності і міцності, так і для розробки технологічних операцій обробки матеріалів тиском. При навантаженні в умовах складного напруженого стану деформаційне зміцнення характеризується еволюцією початкової поверхні текучості матеріалу в процесі пластичного деформування.

Як показують дослідження [1], початкова поверхня текучості більшості пластичних ізотропних матеріалів описується умовою Губера-Мізеса, якій в дев'ятирній площині простору напружень відповідає коло. Причому форма кривої не змінюється зі зміною допуску на пластичну деформацію, за яким визначаються границі текучості. Форма наступних поверхонь текучості суттєво залежить від величини допуску на пластичну деформацію. При використанні технічного допуску 0,2% форма поверхонь практично не змінюється [2, 3]. За малих допусків спостерігається складна трансформація поверхні [4]. Автори робіт [5, 6, 7] при побудові рівнянь теорії незворотної деформації використали модель зміцнення, згідно з якою на поверхні текучості в точці навантаження виникає кутова точка.

Дослідженнями [2, 3, 8], виконаними в широкому діапазоні низьких і високих температур, встановлено, що зміна температури спричиняє ізотропне розширення (звуження) початкової поверхні текучості матеріалу, а деформаційне зміцнення в ізотермічних умовах навантаження описується ізотропно-кінематичною моделлю. Причому температура в основному впливає на ізотропну складову зміцнення і слабо змінює анізотропну складову.

При побудові теорії неізотермічної пластичності в багатьох роботах [9] використовується висунута Людвіком гіпотеза про те, що для матеріалів, не чутливих до швидкості деформування, напружений стан при неізотермічному одновісному навантаженні не залежить від історії температурно-силової дії, а визначається поточними значеннями деформації і температури. Цій гіпотезі відповідає механічне рівняння стану матеріалів в неізотермічних умовах у вигляді

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, T) \text{ або } \sigma = \sigma(\varepsilon^P, T). \quad (1)$$

Узагальненням співвідношення (1) на складний напружений стан є рівняння  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i^P, T)$ ,

де  $\sigma_i, \varepsilon_i^P$  – інтенсивність напружень і пластичних деформацій відповідно.

Гіпотеза спрощує побудову фізичних рівнянь теорії пластичності і розв'язання інженерних задач. Проте класи матеріалів і процесів навантаження, для яких справедлива гіпотеза, залишаються не з'ясованими [10].

Представлена стаття присвячена аналізу результатів експериментального дослідження опору матеріалів при пластичному деформуванні в умовах лінійного і плоского напруженого стану при змінних температурах і розробці відповідних рівнянь стану.

### Матеріали і методика експериментальних досліджень.

Дослідження проводили на суцільних циліндричних ( $D = 8$  мм) і трубчастих ( $D = 26$  мм,  $t = 0,5$  мм) зразках із мало вуглецевої сталі 20, середньо вуглецевих сталей 45 і 50, а також легованої сталі X. Сталі 45 і 50 досліджувалися у відпаленому стані, інші – в стані постачання. Матеріали випробували при кімнатних і низьких температурах в умовах одновісного розтягу на універсальній машині BLW-30, оснащеної холодильною камерою, а в умовах плоского напруженого стану на автоматизованому комплексі СНТ-5П [11]. В останньому випадку трубчасті зразки пропорційно навантажували осьовою силою і внутрішнім тиском, реалізуючи променеві траєкторії в просторі напружень. Зразки охолоджували рідким азотом або його парами. Границі текучості матеріалів визначали за допомогою кривих  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  з використанням технічного допуску 0,2% на пластичну деформацію.

Експериментальні результати при плоскому напруженому стані представляли у площинах  $S_1 - S_2$  і  $\mathcal{E}_1^P - \mathcal{E}_2^P$  п'ятивимірних просторів напружень  $S_{(5)}$  і деформацій  $\mathcal{E}_{(5)}^P$  Ільющина [12], координати яких  $S_k$  і  $\mathcal{E}_k$  пов'язані з осьовими і тангенціальними напруженнями ( $\sigma_z, \sigma_\theta$ ) і деформаціями ( $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$ ) трубчастих зразків співвідношеннями:

$$S_1 = \sqrt{2/3}(\sigma_z - 0,5\sigma_\theta); \quad S_2 = \sigma_\theta/\sqrt{2}; \quad S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = \sqrt{2/3} \sigma_i;$$

$$\mathcal{E}_1^P = \sqrt{3/2} \varepsilon_z^P; \quad \mathcal{E}_2^P = (\varepsilon_z^P + 2\varepsilon_\theta^P)/\sqrt{2}; \quad \mathcal{E}^P = \sqrt{(\mathcal{E}_1^P)^2 + (\mathcal{E}_2^P)^2} = \sqrt{3/2} \varepsilon_i^P.$$

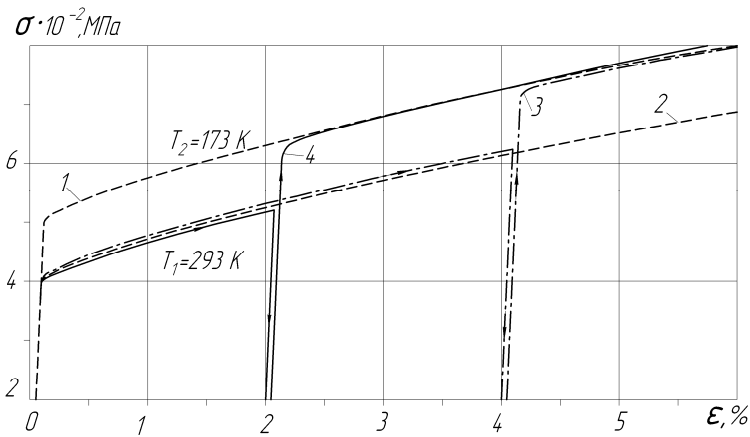
Апроксимацію кривих текучості і визначення їх параметрів виконували за допомогою методу найменших квадратів.

Під час досліджень реалізували температурно-диференційний метод, згідно з яким зразки деформували з проміжними розвантажуваннями, під час яких змінювалася температура випробувань.

**Деформаційне зміцнення матеріалів за лінійного напруженого стану.**

Зразки деформували при температурі  $T_1$  на ступінь  $\Delta\varepsilon^P = 2, 0...3, 5\%$ , потім розвантажували, шляхом охолодження або відігрівання змінювали температуру на  $T_2$  і знову деформували на  $\Delta\varepsilon^P$  і т. д.

На рис. 1 представлені результати випробувань сталі X в ізотермічних і температурно-диференційних умовах навантаження.



**Рис. 1. Криві деформування сталі X в умовах ізотермічного (1, 2) і температурно-диференційного (3, 4) навантаження**

Згідно з гіпотезою Людвіка напружений стан визначається кінцевими значеннями  $\varepsilon^P$  і  $T$ . Тому у випадку її виконання ділянки кривих деформування при температурно-диференційному способі навантаження повинні збігатися з кривими ізотермічного деформування при відповідних температурах. Як видно з рис. 1, відхилення указаних кривих для сталі X не перевищує 5%. Аналогічні результати були отримані і на сталях 45 і 50.

Представлені експериментальні дані свідчать про можливість використання рівняння стану (1) для указаних матеріалів.

З рис. 1 випливає, що необхідною умовою виконання рівняння (1) є рівність

$$\Delta_T \sigma(\varepsilon^P) = \sigma(\varepsilon^P, T_2) - \sigma(\varepsilon^P, T_1) \tag{2}$$

де  $\Delta_T \sigma(\varepsilon^P)$  – зміцнення (знеміцнення) матеріалу, спричинене зміною тільки температури після певного рівня попередньої пластичної деформації;  $\sigma(\varepsilon^P, T_1)$ ,  $\sigma(\varepsilon^P, T_2)$  – опір пластичному деформуванню в ізотермічних умовах відповідно при  $T_1 = const$  і  $T_2 = const$ .

На рис. 2 представлені результати досліджень сталі 20, у якої деформаційне зміцнення при кімнатній і низьких температурах суттєво відрізняються.

Оскільки у сталі 20 (див. рис. 2) деформаційне зміцнення при  $T=293$  К значно вище (особливо при  $\varepsilon^P \geq 6\%$ ), чим при низьких температурах, ділянки кривої розтягу 3, одержані при температурі 77 К після деформації при  $T=293$  К, лежать вище кривих ізотермічного деформування при 77 К (крива 2). У той же час ділянки кривої 4, одержані при  $T=293$  К після деформації при  $T=77$  К, знаходяться нижче кривої ізотермічного деформування при  $T=293$  К. Зі зменшенням різниці між модулями зміцнення при кімнатній і низькій температурах при пластичному деформуванні криві, одержані при змінних температурах, наближаються до кривих ізотермічного деформування.

Отже, результати дослідження показують, що зміцнення сталі 20 в температурно-диференційних умовах навантаження не може бути описано з використанням рівняння стану (1).

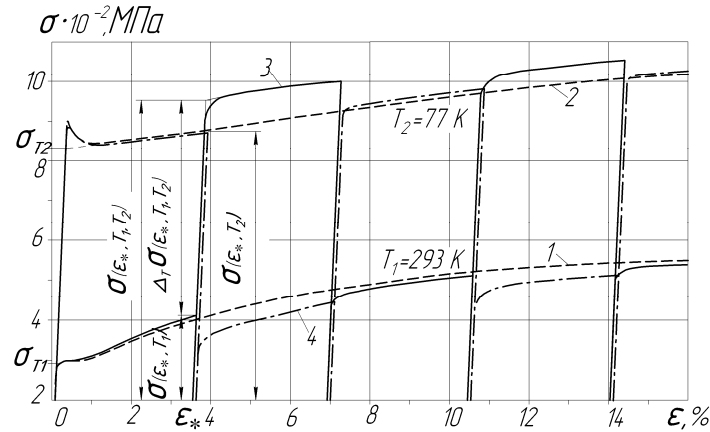


Рис. 2. Криві деформування сталі 20 в умовах ізотермічного (1, 2) і температурно-диференційного (3, 4) навантаження: 3 - 293 ↔ 77 K ; 4 - 77 ↔ 293 K

Експериментальні дані, одержані в температурно-диференційних умовах, були використані для побудови рівняння стану матеріалів нечутливих і чутливих до історії температурно-силового навантаження.

Аналіз результатів (див. рис. 1 і 2) показує, що ділянки кривих при різних програмах випробувань, одержані при однаковій температурі  $T = const$ , можуть з достатньою точністю розглядатися як конгруентні з ділянками відповідної ізотермічної кривої. Це дає можливість записати вираз для визначення напружень  $\sigma(\varepsilon^P, T_1, T_2)$ , що відповідає деформації  $\varepsilon^P$ , на довільній ділянці кривої при  $T_2 = const$  після попередньої деформації при температурі  $T_1$  у вигляді

$$\sigma(\varepsilon^P, T_1, T_2) = \sigma(\varepsilon_*^P, T_1, T_2) + \sigma(\varepsilon^P, T_2) - \sigma(\varepsilon_*^P, T_2) \quad (3)$$

де  $\sigma(\varepsilon_*^P, T_1, T_2)$ ,  $\varepsilon_*^P$  – напруження і пластична деформація у початковій точці ділянки деформування при  $T_2 = const$  після деформації при  $T_1$ ;  $\sigma(\varepsilon^P, T_2)$  – рівняння кривої ізотермічного розтягування при температурі  $T_2 = const$ ;  $\sigma(\varepsilon_*^P, T_2)$  – напруження, визначене по ізотермічній кривій при деформації  $\varepsilon_*^P$  (див. рис. 2).

Як показують дослідні дані, приріст опору матеріалів  $\Delta T\sigma(\varepsilon_*^P, T_1, T_2)$ , спричинений зміною температури при  $\varepsilon_*^P = const$  (див. рис. 2) у загальному випадку залежить від величини попередньої пластичної деформації і може бути представлений у вигляді

$$\Delta T\sigma(\varepsilon_*^P, T_1, T_2) = \omega(\varepsilon_*^P)(\sigma_{T2} - \sigma_{T1}) \quad (4)$$

де  $\omega(\varepsilon^P)$  – функція, що визначає вплив пластичної деформації на зміну опору матеріалу зі зміною температури;  $\sigma_{T1}$ ,  $\sigma_{T2}$  – границі текучості матеріалу у вихідному стані при температурах  $T_1$  і  $T_2$ .

Звідси співвідношення для визначення опору матеріалу після зміни температури при  $\varepsilon_*^P = const$  може бути представлено у вигляді

$$\sigma(\varepsilon_*^P, T_1, T_2) = \sigma(\varepsilon_*^P, T_1) + \omega(\varepsilon_*^P)[\sigma_{T2} - \sigma_{T1}] \quad (5)$$

де  $T_1$ ,  $\sigma(\varepsilon_*^P, T_1)$  – температура і кінцеве напруження на попередній ділянці деформування.

На рис. 3 представлені залежності  $\omega(\varepsilon^P)$  для сталі 20, розраховані по кривих деформування при зміні температури по режиму 293 K → 77 K → 293 K, а для сталей 45, 50 і X при зміні температури від 293 до 173 K. При розрахунку  $\omega(\varepsilon^P)$  для сталі 20, криві якої при низьких температурах мають зуб текучості, використовували нижню границю текучості. Як видно з рис. 3, для досліджуваних матеріалів, функція  $\omega(\varepsilon^P)$  є спадною, що свідчить про зменшення впливу температури на опір сталей зі збільшенням рівня попередньої пластичної деформації. При цьому

залежності  $\omega(\varepsilon^p)$  можуть бути апроксимовані степеневою функцією  $\omega = A(\varepsilon^p)^m$ . Для розрахунку констант  $A$  і  $m$ , необхідно визначити спричинену температурою зміну границі текучості матеріалу у вихідному стані і після двох рівнів пластичної деформації.

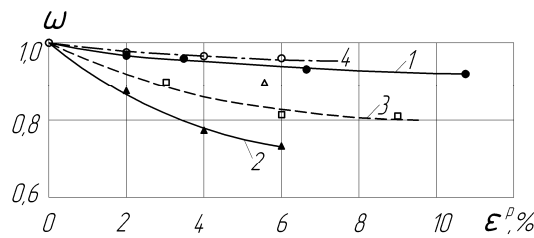


Рис. 3. Залежність параметра температурного зміцнення матеріалів від величини попередньої пластичної деформації для різних сталей: 1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – сталь 50; 4 – сталь X.

Для матеріалів, деформування яких при змінних температурах описується рівнянням стану (1), маємо

$$\omega(\varepsilon^p) = \frac{\sigma(\varepsilon^p, T_1) - \sigma(\varepsilon^p, T_2)}{\sigma_{T2} - \sigma_{T1}} \quad (6)$$

У випадку незалежності деформаційного зміцнення матеріалу від температури криві розтягування при різних постійних температурах будуть конгруентними, в результаті згідно з співвідношенням (6)  $\omega=1$ .

**Деформаційне зміцнення матеріалу за складного напруженого стану.**

Результати досліджень [2, 3, 8] показують, що в умовах ізотермічного навантаження по будь-якій променевій траєкторії простору напружень деформаційне зміцнення матеріалів добре описується ізотропно-кінематичною моделлю

$$(S_1 - a_1)^2 + (S_2 - a_2)^2 = R^2 \quad (7)$$

де скалярний параметр  $R$  характеризує ізотропну складову, а векторний параметр  $\vec{a}$  - анізотропну складову зміцнення.

На рис. 4 представлені криві текучості сталі 45 при температурах  $T_2 = 293 K$  (рис 4, а, криві 1) і  $173 K$  (рис. 4, б, криві 2) після різних рівнів пластичної деформації. при температурах  $T_1 = T_2$ .

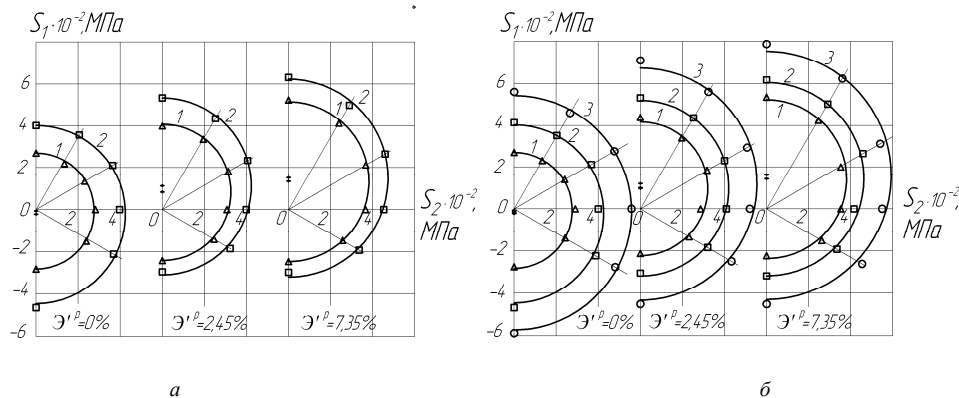


Рис. 4. Криві текучості сталі 45, деформованої до різних рівнів пластичної деформації при температурі  $T_1 = 293 K$  (а) і  $T_1 = 173 K$  (б), після зміни температури до  $T_2$ : 1 –  $T_2 = 293 K$ ; 2 –  $T_2 = 173 K$ ; 3 –  $T_2 = 123 K$

Аналіз результатів показує, що залежність радіуса поверхні від модуля вектора пластичної деформації при температурі  $T$  відповідає лінійному співвідношенню

$$R(\varepsilon^p, T) = R_0(T) + H(T)\varepsilon^p \quad (8)$$

де  $R_0(T)$  – радіус початкової поверхні текучості при температурі  $T$ ;  $H(T)$  – коефіцієнт, що визначається з досліду на одновісний розтяг до деякого рівня пластичної деформації  $\varepsilon^p$  з наступним стиском.

Оскільки зміцнення  $\vec{a}$  поверхні при простому навантаженні збігається з напрямком траєкторії навантаження, то

$$R(\varepsilon^p, T) + a(\varepsilon^p, T) = S(\varepsilon^p, T)$$

де  $S(\varepsilon^p, T)$  - напруження, що відповідає деформації  $\varepsilon^p$  на кривій розтягу в координатах  $S - \varepsilon^p$  при температурі  $T$ .

Апроксимуючи криву розтягу степеневу функцією

$$S(\varepsilon^p, T) = S_{T_0}(T) + G(T)(\varepsilon^p)^{n(T)}$$

і враховуючи, що радіус початкової поверхні текучості  $R_0$  дорівнює границі текучості матеріалу у вихідному стані  $S_{T_0}$ , отримаємо вирази для модуля вектора зміщення і його компонент:

$$a(\varepsilon^p, T) = G(T)(\varepsilon^p)^{n(T)} - H(T)\varepsilon^p \quad (9)$$

$$a_j(\varepsilon^p, T) = \left[ G(T)(\varepsilon^p)^{n(T)-1} - H(T) \right] \varepsilon_j^p, \quad (j=1,2).$$

Параметри  $G, n$  визначаються з досліду на одновісний розтяг при температурі  $T$ .

При дослідженні деформаційного зміцнення матеріалів в температурно-диференційних умовах навантаження спочатку визначали початкову поверхню текучості матеріалу  $f_0(S_k, T_1) = 0$  при температурі  $T_1$ , потім матеріал навантажували по променевої траєкторії (просто навантаження) до певного рівня пластичної деформації  $\varepsilon^p$  при температурі  $T_1$  і визначали наступну поверхню текучості  $f_1(S_k, \varepsilon^p, T_1) = 0$ , після чого проводили розвантаження, змінювали температуру до  $T_2$  і визначали нову поверхню текучості  $f_2(S_k, \varepsilon^p, T_1, T_2) = 0$ .

Результати випробувань сталей 45, 50 і X, деформаційне зміцнення яких при неізотермічному розтягуванні описується за допомогою рівняння стану (1), показують, що температура попередньої пластичної деформації  $T_1$  не впливає на поверхню текучості матеріалу, визначену при температурі  $T_2$ . Як видно з рис. 5, де представлені результати випробувань сталі 45, радіуси  $R$  і зміщення  $a$  поверхонь текучості, що відповідають однаковому рівню низькотемпературної ( $T=173\text{ K}$ ) і «теплої» ( $T=293\text{ K}$ ) пластичної деформації, при однакових температурах  $T=293$  і  $173\text{ K}$  практично однакові. Залежність параметрів  $R$  і  $a$  від величини пластичної деформації при ізотермічному і неізотермічному навантаженні описуються одними і тими ж кривими.

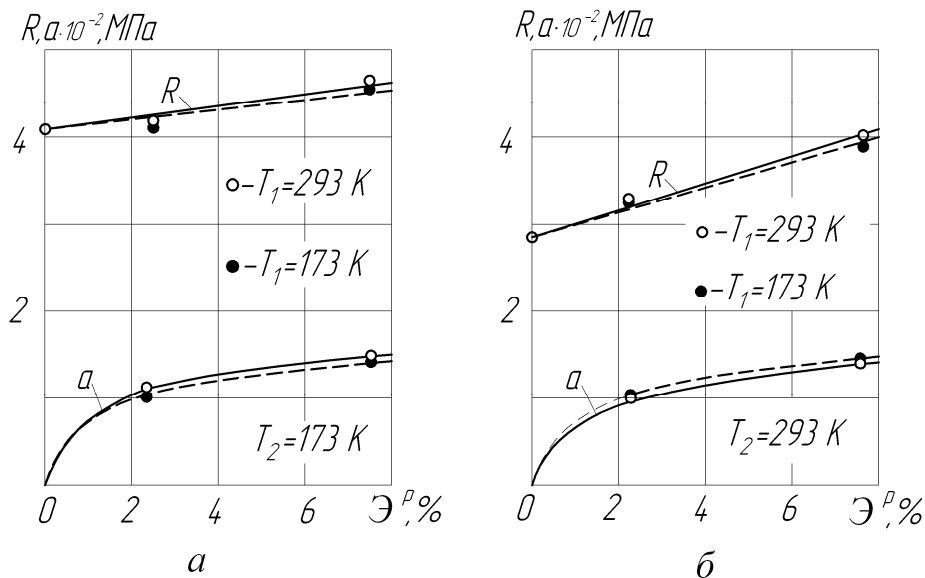


Рис. 5. Залежність радіуса і модуля вектора зміщення поверхні текучості сталі 45 при температурах  $T_2 = 173\text{ K}$  (а) і  $293\text{ K}$  (б) від рівня попередньої пластичної деформації при  $T_1 = 173\text{ K}$  (світлі точки) і  $T_1 = 293\text{ K}$  (темні точки)

Пониження або підвищення температури від  $T_1$  до  $T_2$  деформованої до різних рівнів при  $T_1$  сталі суттєво впливає на радіус поверхонь і незначно змінює їх положення (див рис. 4, а, криві 2; рис. 4, б, криві 1 і 3). Кількісну оцінку зміни положення центра поверхні текучості деформованої сталі після зміни її температури дає рис. 6. Суцільні криві тут характеризують зміщення поверхні при ізотермічному навантаженні, інші – після зміни температури при фіксованій деформації  $\mathcal{E}^p$ . Як видно, температура практично ізотропно змінює деформаційне зміщення сталі.

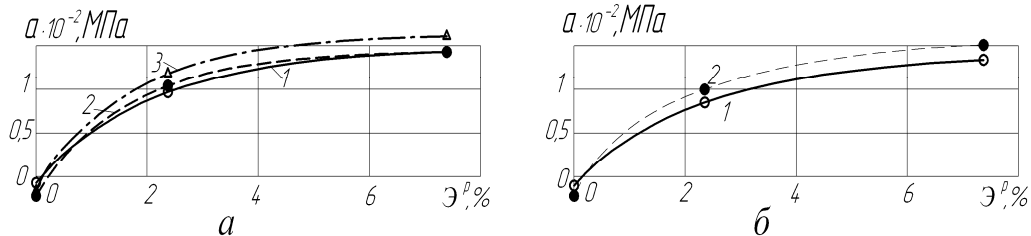


Рис. 6. Залежність модуля вектора зміщення поверхні текучості сталі 45, деформованої при  $T_1 = 173 K$  (а) і  $T_1 = 293 K$  (б), від рівня пластичної деформації після зміни температури до  $T_2$ : 1 –  $T_2 = 293 K$ ; 2 –  $T_2 = 173 K$ ; 3 –  $T_2 = 123 K$

Одержані результати свідчать про те, що для матеріалів, поведінка яких в умовах неізотермічного навантаження описується рівнянням стану (1), наступні поверхні текучості не залежать від історії температурної дії, а визначаються рівнем пластичної деформації і поточним значенням температури. Це дає можливість конкретизувати функцію (7) для розглянутого класу матеріалів. Рівняння поверхні текучості після початкового простого навантаження при температурі  $T_1$  до деформації  $\mathcal{E}^p$  і наступного розвантаження зі зміною температури до  $T_2$  запишеться так

$$f_2 = \left[ S_1 - a_1(\mathcal{E}^p, T_2) \right]^2 + \left[ S_2 - a_2(\mathcal{E}^p, T_2) \right]^2 - R^2(\mathcal{E}^p, T_2) = 0,$$

де параметри  $a$  і  $R$  описуються функціями (8) і (9) при  $T = T_2$ .

З метою встановлення законів зміщення матеріалів, які не задовольняють при простому неізотермічному навантаженні рівняння стану (1), були досліджені наступні поверхні текучості сталі 20 при  $T_2 = 173 K$  після попередньої деформації  $\mathcal{E}^p = 2,5\%$  при температурах  $T_1 = 293$  і  $173 K$  (рис. 7). Як видно з рисунка, зміщення матеріалу задовільно описується ізотропно-кінематичною моделлю, але у сталі 20, на відміну від раніше досліджуваних матеріалів, розміри поверхні текучості залежать від історії температурної дії. Важливим є експериментально установлений факт, що температура деформації впливає тільки на радіус поверхні текучості, практично не змінюючи її зміщення. Це дає можливість описати зміщення поверхні текучості в умовах неізотермічного навантаження за допомогою функції (9), установлені в ізотермічних умовах при  $T = T_2$ .

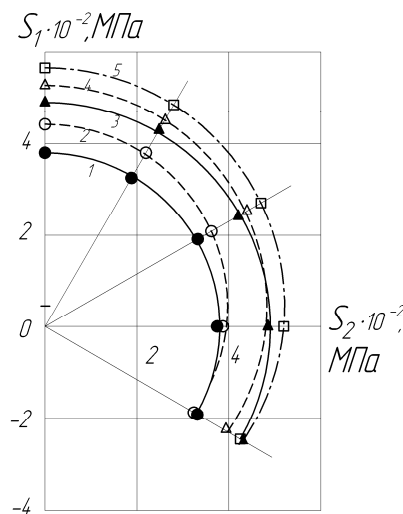


Рис.7. Поверхні текучості сталі 20 у вихідному стані (1,3) і після пластичної деформації  $\mathcal{E}^p = 2,45\%$  (2, 4, 5): 1 –  $T = 293 K$ ; 2 –  $T_1 = T_2 = 293 K$ ; 3 –  $T = 173 K$ ; 4 –  $T_1 = T_2 = 173 K$ ; 5 –  $T_1 = 293 K, T_2 = 173 K$

Приріст радіуса поверхні текучості  $\Delta_T R(\mathcal{E}'^P, T_1, T_2)$ , спричинений зміною температури при  $\mathcal{E}'^P = const$ , може бути визначений за допомогою рівняння, аналогічного (4),

$$\Delta_T R(\mathcal{E}'^P, T_1, T_2) = \omega(\mathcal{E}'^P)(S_{T_0}(T_2) - S_{T_0}(T_1)), \quad (10)$$

де  $S_{T_0}(T_1)$ ,  $S_{T_0}(T_2)$  – границі текучості матеріалу у вихідному стані при температурах  $T_1$  і  $T_2$ .

Тоді співвідношення для обчислення радіуса поверхні текучості при температурі  $T_2$  матиме вигляд

$$R(\mathcal{E}'^P, T_1, T_2) = R(\mathcal{E}'^P, T_1) + \omega(\mathcal{E}'^P)(S_{T_0}(T_2) - S_{T_0}(T_1)),$$

або з урахуванням рівняння (8) маємо

$$R(\mathcal{E}'^P, T_1, T_2) = S_{T_0}(T_1) + H(T_1)\mathcal{E}'^P + \omega(\mathcal{E}'^P)(S_{T_0}(T_2) - S_{T_0}(T_1))$$

Отже, для матеріалів, чутливих до історії температурної дії, рівняння поверхні текучості при температурі  $T_2$  після деформації матеріалу при температурі  $T_1$  буде мати вигляд

$$f_3 = \left[ S_1 - a_1(\mathcal{E}'^P, T_2) \right]^2 + \left[ S_2 - a_2(\mathcal{E}'^P, T_2) \right]^2 - R^2(\mathcal{E}'^P, T_1, T_2) = 0$$

### Висновок.

Аналіз експериментальних даних, одержаних в умовах температурно-диференційного розтягування, показує, що гіпотеза Людвіка, згідно з якою при неізотермічному одновісному навантаженні напруження визначається поточними значеннями деформації і температури, підтверджується не для всіх матеріалів. Запропоновано рівняння, що описує деформаційне зміцнення матеріалів, чутливих і нечутливих до історії температурної дії, в умовах температурно-диференційного навантаження.

Показано, що еволюція поверхні текучості матеріалів в умовах простого навантаження при змінних температурах добре описується ізотропно-кінематичною моделлю. Встановлено, що для матеріалів, поведінка яких описується рівнянням стану Людвіка, температура попередньої пластичної деформації не впливає на поверхню текучості. Зміна температури деформованого матеріалу впливає тільки на ізотропну складову зміцнення і практично не змінює анізотропну.

Для матеріалів, які не задовольняють при неізотермічному навантаженні рівняння стану Людвіка, історія температурної дії значно впливає на радіус поверхні текучості і не змінює її зміщення.

Конкретизовані функції, що описують зміну параметрів поверхні текучості матеріалів, чутливих і нечутливих до історії температурної дії при пластичному деформуванні.

### Список літератури

1. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Изд. Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
2. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Кульчицкий Н.М. Экспериментальное исследование поверхности нагружения стали X при нормальной и низкой температурах. // Пробл. прочности. – 1978. - №5. – С. 80-82.
3. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А., Маковецкий И.В. Экспериментальное исследование поверхности текучести деформированной углеродистой стали в широком диапазоне температур // Пробл. прочности. – 1980. - №9 – С. 3-7.
4. Косарчук В.В., Ковальчук Б.И. Условие текучести пластически деформированных материалов // Пробл. прочности. – 1982. – № 6. – С. 3 – 10.
5. Ruszinko E. The influence of preliminary mechanical-thermal treatment on the plastic and creep deformation of turbine disks // Meccanica. -- 2009. – 44. – С. 13-25.
6. Rusinko A., Rusinko K. Synthetic Theory of Irreversible Deformation in the Context of Fundamental Bases of Plasticity // Int. J. Mech. Mater. – 2009. – 41. – С. 106-120.
7. Rusinko A. Non-classical problems of irreversible deformation in terms of the synthetic theory // Acta Polytechnica Hungarica. – 2010. – 7. – С. 26-62.
8. Ковальчук Б.И. Исследование законов упрочнения материалов с учетом режима температурно-силового воздействия // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. — К.: Изд-во ВИПОЛ, 2004. — Вып. 45. — С. 8-11.
9. Шевченко Ю.Н. Термопластичность при переменных нагружениях. – Киев: Наук. думка, 1970. – 288 с.
10. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А. О существовании термомеханической поверхности материалов при неізотермическом повторно-простом нагружении // Пробл. прочности. – 2006. -- № 5. – С.16 – 26.
11. Ковальчук Б.И. Об экспериментальном исследовании законов упругопластического деформирования и разрушения материалов в условиях сложного напряженного состояния // Механические испытания конструкционных сплавов при криогенных температурах. – К.: Наук. думка, 1981. – С. 43 – 62.
12. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.