

PACS numbers: 61.66.Dk, 62.20.fg, 62.40.+i, 64.60.My, 64.75.Nx, 81.16.Rf, 81.40.Lm

## **Знеміцнення метастабільних евтектичних стопів за повторного навантажування в області мікропластичності**

В. Ф. Коршак, Р. І. Воронцова, Ю. І. Бойко

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4,  
61022 Харків, Україна*

Досліджено вплив мікропластичної деформації на характеристики міцності евтектичного стопу Sn–38% мас. Pb. Проведені механічні випробування зразків стопу за повторного розтягування до відносних видовжень, що не перевищують  $3 \cdot 10^{-3}$ . Деформацію зразків визначали за допомогою тензометричного методу вимірювань. Експерименти проведено в режимі активного навантажування за кімнатної температури, за якої стоп проявляє надпластичні властивості. Досліджено стоп у трьох різних станах, що відрізняються тривалістю природного старіння. Отримані залежності напруження від величини відносного видовження зразків свідчать про істотне знеміцнення досліджуваного стопу на відміну від зміцнення металевих матеріалів, що зазвичай спостерігається за подібних умов механічних випробувань. В усіх випадках після розвантажування спостерігається суттєве стиснення зразків протягом деякого проміжку часу, що свідчить про наявність у матеріалі значних внутрішніх напружень. Причини знеміцнення обговорюються з урахуванням раніше отриманих даних щодо зміни значень внутрішнього тертя і модуля Юнга стопу після циклічного деформування в області мікропластичності в режимі резонансних згинних коливань. Зроблено висновок про те, що знеміцнення стопу обумовлено релаксацією внутрішніх напружень і протіканням структурно-фазових перетворень в умовах зовнішнього навантажування зразків. Зміни коефіцієнта деформаційного зміцнення, що спостерігаються в роботі, мо-

Corresponding author: Vira Fedosiyivna Korshak  
E-mail: vera.korshak@gmail.com

*V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody Sqr., UA-61022 Kharkiv, Ukraine*

Citation: V. F. Korshak, R. I. Vorontsova, and Yu. I. Boyko, Strain-Softening of Metastable Eutectic Alloys under Reloading in Microplasticity Range, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 3: 339–354 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.03.0339](https://doi.org/10.15407/mfint.43.03.0339).

жуть свідчити про метастабільність фазового стану стопу і реалізацію в усіх досліджуваних випадках початкових стадій розпаду пересичених твердих розчинів, стимульованого зовнішнім механічним напруженням розтягу.

**Ключові слова:** знеміцнення, повторне навантаження, евтектичний стоп, надпластичність, внутрішні напруження, фазові перетворення.

The influence of microplastic deformation on the strength characteristics of the eutectic Sn–38% wt. Pb alloy is studied. The mechanical tests of alloy samples are carried out at the stretching up to relative elongations not exceeding  $3 \cdot 10^{-3}$ . The deformation of the samples is determined using strain gauge method. The experiments are carried out in the mode of active loading at room temperature at which the alloy shows superplastic properties. The alloy is studied in three different states, which differ in duration of natural aging. The obtained dependences of the stress on the value of the relative elongation of samples indicate a significant strain-softening of the studied alloy in contrast to the strengthening of metal materials usually observed under similar conditions of mechanical testing. In all cases, after unloading, significant compression of the samples is observed over a period of time, which indicates the presence of significant internal stresses in the material. The reasons for strain-softening are discussed taking into account previously obtained data on changes in internal friction and Young's modulus of the alloy after cyclic deformation in the microplasticity range in the mode of resonant bending oscillations. As concluded, the alloy strain-softening is caused by the relaxation of internal stresses and structural-phase transitions under conditions of external loading of samples. The observed changes of strain-hardening coefficient can indicate the metastable phase state of the alloy and realization of initial stages of decay of supersaturated solid solutions, stimulated by external mechanical tensile stress, in all investigated cases.

**Key words:** strain-softening, reloading, eutectic alloy, superplasticity, internal stresses, phase transformations.

*(Отримано 27 липня 2020 р.; остаточн. варіант — 31 грудня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Природа фізичних процесів, відповідальних за виникнення ефекту надпластичності, досі залишається не до кінця з'ясованою, незважаючи на досить велику кількість досліджень, що проводяться [1–7]. Важливим у цьому зв'язку є отримання даних, які стосуються особливостей впливу зовнішнього механічного напруження на ті чи інші властивості надпластичних (НП) матеріалів. Більшість із наявних експериментальних результатів відображають структурні зміни в умовах НП деформації. Проте, все ще до кінця не зрозумілі питання, пов'язані з можливим взаємозв'язком цих змін із фазовими перетвореннями, які, можна припускати, з неминучістю протікають в

НП матеріалі в умовах дії зовнішнього механічного напруження. Це стосується, зокрема, і стопів евтектичного складу, в яких надпластичність проявляється найбільш яскраво. Прийнято вважати, що ці стопи проявляють структурну надпластичність, тобто, виникнення ефекту не пов'язане з фазовою нерівновагою і протіканням структурно-фазових перетворень в матеріалі в умовах деформації.

З метою доповнити наявний банк даних новими даними про особливості впливу зовнішніх механічних напружень на властивості НП евтектичних стопів, раніше в роботах [8–12] були вивчені зміни внутрішнього тертя  $Q^{-1}$  і модуля Юнга  $E$  НП евтектичного стопу Sn–38% мас. Pb внаслідок циклічного деформування в області мікропластичності. На кінетичних залежностях внутрішнього тертя  $Q^{-1}(t)$  і модуля Юнга  $E(t)$  стопу, отриманих за допомогою методу резонансних згинних коливань з максимальною відносною амплітудою деформації  $\sim 10^{-3}$ , в [8–12] виявлені максимуми внутрішнього тертя на певному етапі циклічного деформування зразків, які супроводжуються монотонним зменшенням модуля Юнга стопу. Виявлені зміни  $Q^{-1}(t)$  і  $E(t)$  характерні для фазових перетворень, одним з яких у досліджуваному стопі може бути розпадом пересичених твердих розчинів на основі його компонентів. Той факт, що зазначені ефекти внутрішнього тертя і зміна пружного модуля було виявлено і в тривало зістареному стопі, дозволив зробити припущення, що вихідний нерівноважний фазовий стан стопу є метастабільним, а мікропластична деформація є чинником, що стимулює перехід стопу до стану рівноваги.

Природно припускати, що деформаційне «накачування», реалізоване в експериментах, виконаних в [8–12], яке стимулює протікання розпаду пересичених твердих розчинів, призводить до знеміцнення стопу і, таким чином, до підвищення його пластичних властивостей. За відповідних температурно-швидкісних умов деформування структурно-фазові перетворення, стимульовані дією зовнішнього механічного напруження, можуть бути одним із чинників, що призводять до проявлення ефекту надпластичності в стопах досліджуваного типу. З метою підтвердити припущення про знеміцнюючий вплив мікропластичної деформації, в даній роботі проведені механічні випробування стопу Sn–38% мас. Pb при повторному механічному навантажуванні в області мікропластичності. Такі дослідження, як і дослідження змін внутрішнього тертя і модуля Юнга надпластичних евтектичних стопів внаслідок циклічного деформування в області мікропластичності, наскільки відомо, раніше не проводилися.

## 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як і в [8–12], досліджували стоп, отриманий із чистих компонентів стопленням у лабораторній печі з подальшим литтям на масивну

мідну підкладку. Відлиті злитки стискали на гідравлічному пресі на  $\sim 70\%$ .

Розтягування зразка здійснювали за допомогою пристрою, основними частинами якого є деформаційний і вимірювальний пристрої. Апаратура реєстрації включала потенціометр, спеціально виготовлену приставку і магазин опору регулювання чутливості динамометра. Зразок деформували в умовах активного навантаження при швидкості руху захватів  $1 \text{ мм/хв.}$  і температурі  $T \sim 293 \text{ К.}$  За довжини робочої частини, що дорівнювала  $10 \text{ мм,}$  швидкість деформації зразків складає  $\sim 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Відносні видовження, які не перевершують значення  $3 \cdot 10^{-3}$ , не впливають істотно на швидкість деформації зразків, і тому її можна вважати незмінною. Температуру в процесі випробування підтримували сталою з точністю  $\pm 1 \text{ К.}$  Запис зміни величини навантаження  $P$  здійснювався автоматично. Величину  $P$  визначали за показниками потенціометра. Тарировку використовуваної розривної машини проводили за стандартною методикою. Напруження на зразку  $\sigma$  визначали за формулою:

$$\sigma = P/S, \quad (1)$$

де  $S$  — площа поперечного перерізу зразка. Обумовлена жорсткістю машини похибка вимірювання напруження не перевищувала  $1\%$ .

Тензометричний датчик, виготовлений із тонкого ( $15\text{--}16 \text{ мкм}$ ) проводу, вміщеного між тонкими ізолюючими прокладками, приклеювали до зразка клеєм БФ-2. Опір датчика вимірювали за допомогою моста постійного струму типу МО-62. Зв'язок між відносною деформацією  $\Delta l/l$  і відносною зміною опору датчика  $\Delta R/R$  визначали за формулою:

$$\Delta l/l = (1/c) \Delta R/R, \quad (2)$$

де  $c$  — коефіцієнт тензочутливості, для використовуваного датчика рівний  $2,15$ . Відносна похибка визначення величини деформації не перевищувала  $5\%$ .

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

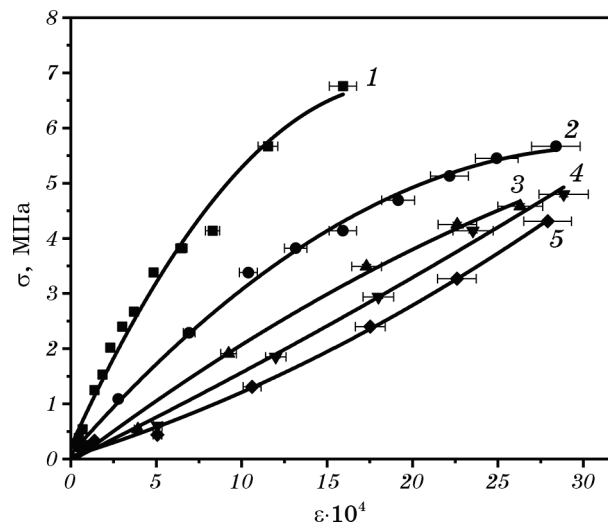
З огляду на результати експериментів з вивчення змін внутрішнього тертя та модуля Юнга, механічні випробування проведені на зразках, зістарених після стиснення упродовж  $0,5$  місяця,  $0,5$  і  $1$  року. Після першого навантаження зразки витримували протягом певного часу в розвантаженому стані і потім повторно деформували.

На рисунку 1 наведено залежності величини прикладеного напруження  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon(\Delta l/l)$  зразка зістареного упродовж  $0,5$

місяця стопу у вихідному стані (крива 1) і при повторних навантаженнях (криві 2–5).

Було виявлено, що у всіх випадках після розвантажування спостерігається значне стиснення зразків протягом деякого проміжку часу. Величина деформації такої непружної післядії може бути оцінена за даними про залишкову деформацію зразків на момент кожного наступного навантажування. Значення залишкової деформації до початку кожного наступного навантажування вказано в підписі до рис. 1.

Як видно з наведених залежностей, у міру збільшення числа циклів навантажування–розвантажування ступінь знеміцнення, зумовленого кожним наступним циклом, зменшується. При цьому знеміцнення зразка в умовах експерименту є досить значним і становить:  $\sim 90\%$  при  $\varepsilon \cong 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\sim 80\%$  при  $\varepsilon \cong 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sim 70\%$  при  $\varepsilon \cong 1,5 \cdot 10^{-3}$ .



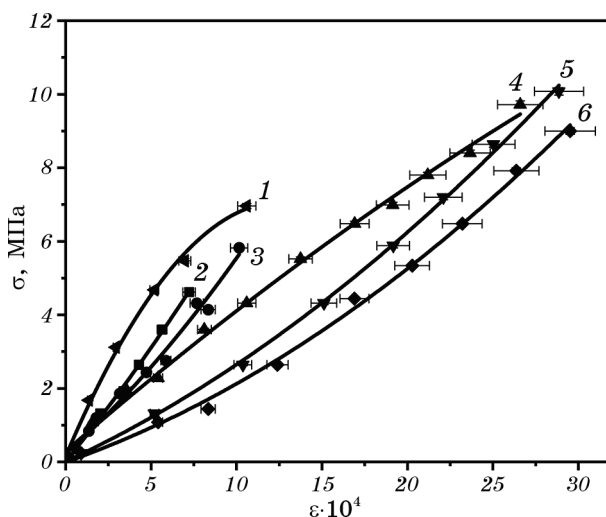
**Рис. 1.** Залежність прикладеного напруження  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon$  зразка зістареного упродовж 0,5 місяця стопу Sn–38% мас. Pb у вихідному стані (1) та при повторних навантаженнях за тривалості витримки між попереднім та наступними деформуваннями: 7, 4, 3, 11 діб відповідно для кривих 2–5. Залишкова деформація перед наступним навантаженням складає:  $2,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $1,6 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $5,8 \cdot 10^{-4}$  відповідно для кривих 2–5.

**Fig. 1.** Dependence of applied stress  $\sigma$  on the deformation  $\varepsilon$  of sample of Sn–38% wt. Pb alloy aged within 0.5 month in the initial state (1) and at repeated loads with the exposure duration between the previous and subsequent deformations: 7, 4, 3, 11 days respectively for curves 2–5. The residual deformation before the next loading is:  $2.3 \cdot 10^{-4}$ ,  $1.6 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.3 \cdot 10^{-4}$ ,  $5.8 \cdot 10^{-4}$  respectively for curves 2–5.

Залежності величини прикладеного напруження  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon$  для зістарених упродовж 0,5 і 1 року зразків представлені на рис. 2 і 3 відповідно.

Як видно з рисунків 1–3, у всіх досліджених випадках повторне навантажування в області мікропластичності призводить до знеміцнення досліджуваного евтектичного ступу Sn–38% мас. Pb. Це виявляє відмінну рису впливу повторного навантажування на механічні властивості НП ступів у порівнянні зі звичайними металевими матеріалами. В останньому випадку при повторному навантажуванні кристалічні матеріали зміцнюються, що є загальновідомим [13].

Враховуючи результати раніше проведених авторами системних досліджень [14–20], можна зробити висновок про те, що головними причинами знеміцнення досліджуваного ступу є процеси, які відбуваються на ранніх стадіях розпаду пересичених твердих розчинів, стимульованого мікропластичною деформацією. Про протікан-

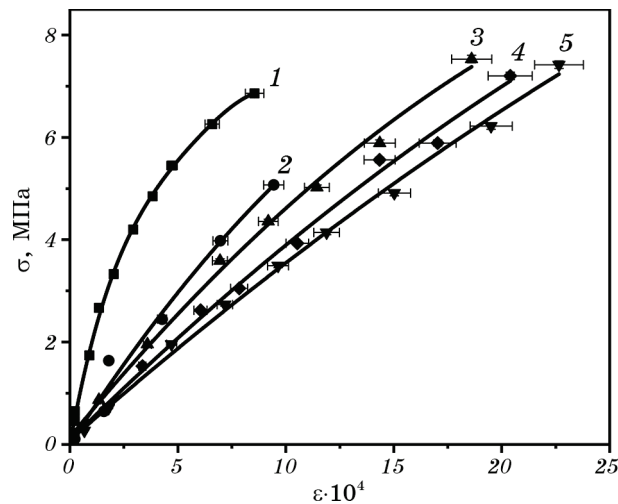


**Рис. 2.** Залежність прикладеного напруження  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon$  зразків зістареного протягом 0,5 року ступу Sn–38% мас. Pb у вихідному стані (1) та при повторних навантажуваннях за тривалості витримки між попереднім та наступними деформуваннями: 2, 5, 3, 7, 4 доби відповідно для кривих 2–6. Залишкова деформація перед наступним навантажуванням складає:  $1,1 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,8 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,4 \cdot 10^{-4}$  відповідно для кривих 2–6.

**Fig. 2.** Dependence of applied stress  $\sigma$  on the deformation  $\varepsilon$  of sample of Sn–38% wt. Pb alloy aged within 0.5 year in the initial state (1) and at repeated loads with the exposure duration between the previous and subsequent deformations: 2, 5, 3, 7, 4 days respectively for curves 2–6. The residual deformation before the next loading is:  $1.1 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.8 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.3 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.4 \cdot 10^{-4}$  respectively for curves 2–6.

ня такого розпаду свідчать, як вже було відзначено, кінетичні залежності внутрішнього тертя і модуля Юнга стопу, циклічно деформованого в області мікропластичності [8–12].

Цей висновок підтверджують і отримані раніше дані про фазовий стан стопу [14, 15]. Досліджуваний стоп було отримано в умовах швидкого охолодження. Температура рідкого розплаву перед розливанням становила  $\sim 698$  К. Середня швидкість охолодження рідкого розплаву до температури, близької до евтектичної (456 К), складала  $\sim 600$  К/с. Потім процес охолодження до температури початку кристалізації ( $\sim 426$  К) суттєво сповільнюється. В результаті середня швидкість охолодження розплаву від початку лиття до початку кристалізації складає близько 200 К/с. Максимальне переохолодження при кристалізації для шарів матеріалу, що контактують з підкладкою, досягає 30 К (криві охолодження та подані кількісні характеристики процесу кристалізації досліджуваного стопу отримані Ю. О. Шаповаловим).



**Рис. 3.** Залежність прикладеного напруження  $\sigma$  від деформації  $\varepsilon$  зразків зістареного протягом 1 року стопу Sn–38% мас. Pb у вихідному стані (1) та при повторних навантаженнях за тривалості витримки між попереднім та наступним деформуваннями: 11, 7, 3, 14 діб відповідно для кривих 2–5. Залишкова деформація перед наступним навантаженням складає:  $7,9 \cdot 10^{-4}$ ,  $1,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $2,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,1 \cdot 10^{-4}$  відповідно для кривих 2–5.

**Fig. 3.** Dependence of applied stress  $\sigma$  on the deformation  $\varepsilon$  of sample of Sn–38% wt. Pb alloy aged within 1 year in the initial state (1) and at repeated loads with the exposure duration between the previous and subsequent deformations: 11, 7, 3, 14 days respectively for curves 2–5. The residual deformation before the next loading is:  $7.9 \cdot 10^{-4}$ ,  $1.3 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.1 \cdot 10^{-4}$  respectively for curves 2–5.

Дослідження показують, що кристалізація стопу за таких умов здійснюється у якісній відповідності до діаграмми метастабільної рівноваги системи Sn–Pb, запропонованої в [16]. Фазовий стан стопу характеризується надлишком відносної частки фази, якій притаманна сильна температурна залежність розчинності в ній другого компонента, а саме,  $\alpha$ (Pb)-фази (твердого розчину олова в свинці) в порівнянні зі станом, рівноважним не тільки при кімнатній, а й при евтектичній температурі. Природне старіння і литих, і попередньо пластично деформованих зразків супроводжується досить повільним розпадом пересичених твердих розчинів на основі компонентів стопу, що формуються в умовах кристалізації, проте навіть після досить тривалого старіння рівноважний фазовий стан стопів, відповідний кімнатній температурі, не досягається.

Експерименти показують, що в умовах надпластичної деформації у структурі стопу фіксуються максимуми дифузного розсіювання рентгенівського випромінювання [17], які згідно з відомими літературними даними [18] виявляють наявність в ньому ділянок близького розшарування. Інтенсивність дифузних максимумів зростає в міру накопичення деформації, і вони спостерігаються навіть при відносних видовженнях, що досягають декількох сотень відсотків. Ці дані, з одного боку, виявляють стимулюючу дію надпластичної деформації на розпад пересичених твердих розчинів у досліджуваному метастабільному стопі. З іншого, вони свідчать про існування факторів, що здійснюють гальмуючий вплив на процеси, які супроводжують перехід стопу до стану рівноваги. У роботі [19] авторами показано, що одним із важливих таких факторів є внутрішні пружні фазові напруження, які виникають у зв'язку з суттєвою відмінністю об'ємного ефекту перетворення — розпаду пересичених розчинів на основі компонентів стопу.

Сумісний аналіз поданих фактів дозволяє зробити висновок, що мікропластична деформація в проведених у даній роботі експериментах полегшує здійснення розпаду пересичених твердих розчинів. Її роль полягає у частковому знятті внутрішніх пружних напружень та створенні передумов для формування передвиділень, що потім трансформуються у нові фази. Відзначимо також, що цей висновок підтверджується даними досліджень, проведених у [20]. У цій роботі було вивчено зміну електричного опору  $R$  непружно деформованих зразків стопу в процесі старіння. Було виявлено зростання величини  $R$  на початкових етапах старіння деформованих в умовах розтягу до деформації  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  зразків стопу після їх розвантаження. Розтягування здійснювали через  $\sim 3$  доби після стиснення свіжолитого злитка та після старіння упродовж  $\sim 5$  місяців. Спостережуваний характер зміни  $R$  пояснено появою деякої впорядкованості центрів розсіювання на відповідному етапі старіння після попередньої деформації. Витримка зразків після розвантаження та



повторне деформування забезпечують поступове накопичення вище означених змін у структурі стопів, про що свідчать спостережувані зміни нахилу деформаційних кривих (рис. 1–3) та коефіцієнта деформаційного зміцнення, про що йдеться нижче. Після певних циклів навантаження стимулююча дія мікропластичної деформації обраного рівня вичерпується, і процес знеміцнення перестав спостерігатися.

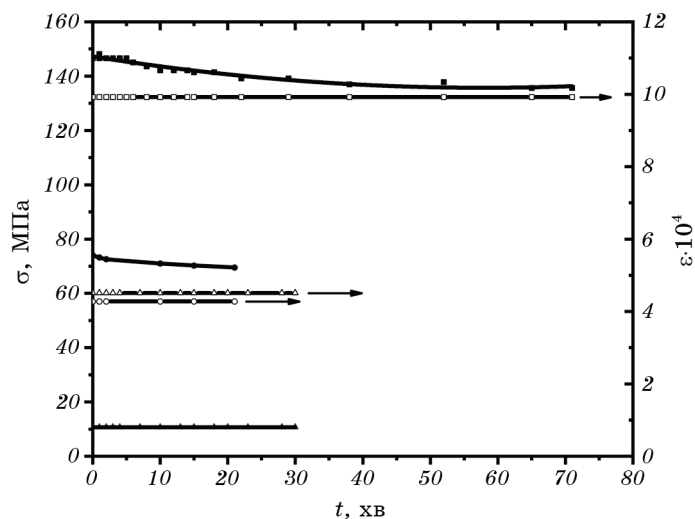
Зазначимо також, що про наявність внутрішніх пружних напружень у стопі свідчать дані про непружну післядію, що спостерігається в зразках після розвантаження. Окрім того, в окремих експериментах [21] авторами було показано, що внутрішні пружні напруження в досліджуваному стопі зберігаються в матеріалі упродовж досить тривалої витримки при кімнатній температурі. Відзначимо при цьому, що величина деформації непружної післядії, що спостерігається на завершальному етапі випробувань, не виявляє принципових відмінностей для всіх досліджених станів стопу. Це може свідчити про те, що рівень внутрішніх напружень у стопі в умовах розтягування виявляється приблизно однаковим.

З метою переконатися в коректності представлених експериментальних даних, була вивчена жорсткість використовуваної розривної машини. Були проведені релаксаційні випробування на сталевих зразках. Зразки деформували до певного рівня напруження, і потім машину зупиняли. Результати цих випробувань показані на рис. 4. Вони свідчать, що навіть при напруженнях, які практично на порядок перевищують рівень  $\sigma$  в разі стопу Sn–38% мас. Pb, ніяких змін величини напружень після зупинки машини не спостерігається. Окрім того, при деформаціях, порівнянних з деформаціями зразків стопу Sn–38% мас. Pb, ніяких змін лінійних розмірів зразка в процесі витримки після зупинки машини також не відбувається. Таким чином, проведені випробування зі сталевими зразками дозволили переконатися у високій жорсткості використовуваної розривної машини і надійності обраного способу кріплення тензометричного датчика.

Сумісний аналіз первинних деформаційних кривих дозволяє виявити, що в процесі старіння спостерігається зміцнення стопу. Це відображено на рис. 5. Такий характер зміни механічних властивостей є типовим для природно старіючих стопів [22], і в зв'язку з метою даного дослідження може розглядатися лише як підтвердження метастабільності фазового стану досліджуваного стопу.

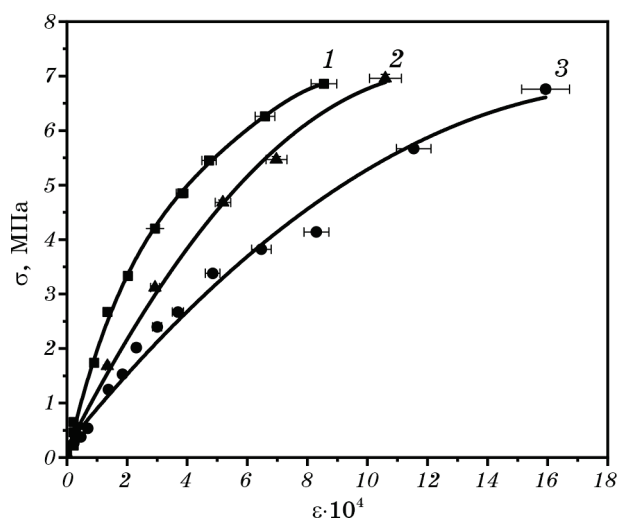
Становлять інтерес дані про зміну коефіцієнта деформаційного зміцнення  $d\sigma/d\varepsilon$  в результаті навантажень зразків стопу в досліджуваних станах. Відповідні дані представлені на рис. 6–8.

Як видно з цих рисунків, у всіх випадках у результаті як мінімум двох останніх навантажень ефект знеміцнення практично перестав спостерігатися.



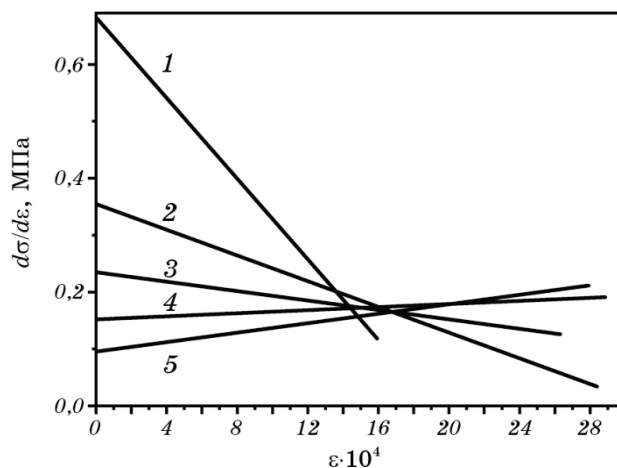
**Рис. 4.** Залежності напруження  $\sigma$  і деформації  $\varepsilon$  сталю зразка від часу релаксації  $t$ .

**Fig. 4.** Dependences of stress  $\sigma$  and strain  $\varepsilon$  of steel sample on the relaxation time  $t$ .



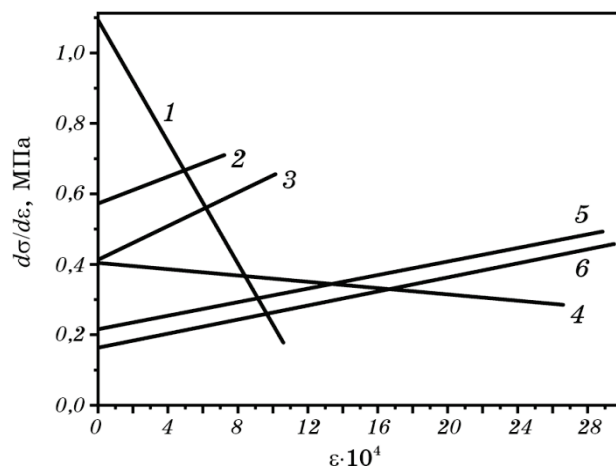
**Рис. 5.** Деформаційні криві зразків сплаву Sn-38% мас. Pb, отримані під час першого навантаження після старіння тривалістю: 1 — 1 рік, 2 — 0,5 року, 3 — 0,5 місяця.

**Fig. 5.** Deformation curves of samples of Sn-38% wt. Pb alloy obtained during the first loading after aging for: 1—1 year, 2—0.5 year, 3—0.5 month.



**Рис. 6.** Зміна коефіцієнта деформаційного зміцнення  $d\sigma/d\varepsilon$  у процесі накопичення мікропластичної деформації  $\varepsilon$  зразка стопу Sn-38% мас. Pb, зістареного протягом 0,5 місяця. Номери кривих відповідають номерам деформаційних кривих на рис. 1.

**Fig. 6.** Changes in strain-hardening coefficient  $d\sigma/d\varepsilon$  during the accumulation of microplastic deformation  $\varepsilon$  of the sample of Sn-38% wt. Pb alloy aged for 0.5 month. The numbers of the curves correspond to those of the deformation curves in Fig. 1.

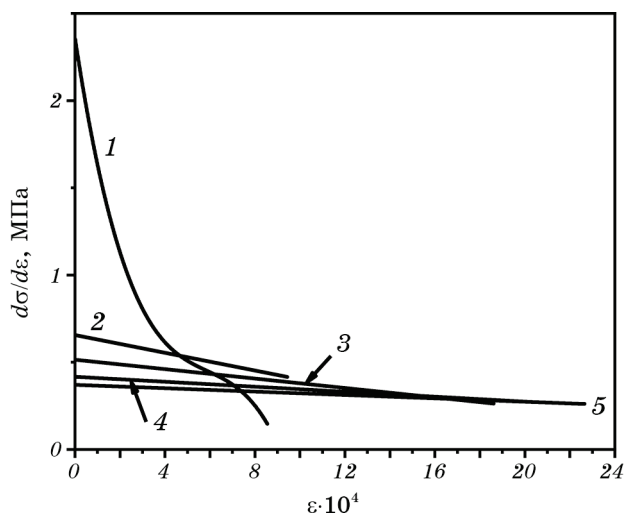


**Рис. 7.** Зміна коефіцієнта деформаційного зміцнення  $d\sigma/d\varepsilon$  у процесі накопичення мікропластичної деформації  $\varepsilon$  зразка стопу Sn-38% мас. Pb, зістареного протягом 0,5 року. Номери кривих відповідають номерам деформаційних кривих на рис. 2.

**Fig. 7.** Changes in strain-hardening coefficient  $d\sigma/d\varepsilon$  during the accumulation of microplastic deformation  $\varepsilon$  of the sample of Sn-38% wt. Pb alloy aged for 0.5 year. The numbers of the curves correspond to those of the deformation curves in Fig. 2.

Іншими словами, знеміцнююча дія зовнішнього напруження вичерпується. В [9] показано, що наявність піків внутрішнього тертя  $Q^{-1}(t)$  в деформаційно старіючому стопі Sn–38% мас. Pb може бути пояснено в припущеннях, що старіння супроводжується пластичною деформацією матеріалу за рахунок локальної зміни питомого об'єму, а кінетика старіння описується відомим рівнянням Аврамі для спадної швидкості зародження фаз. При цьому з кожним наступним виміром внутрішнього тертя змінюється тип розпаду в напрямку від спадної швидкості зародження фаз до деякої мінімальної, що відповідає вичерпанню місць зародження на межах зерен. З огляду на це, можна припускати, що в умовах активної мікропластичної деформації в досліджуваному стопі також здійснюється лише початкова стадія розпаду пересичених твердих розчинів, що характеризується протіканням процесів зародження нових фаз. Інтенсивність цих процесів падає з кожним наступним навантаженням зразків.

Оцінимо ступінь знеміцнення стопу в досліджених станах. Така оцінка може бути виконана за даними про коефіцієнт деформаційного зміцнення на початковому етапі первинного і заключного на-



**Рис. 8.** Зміна коефіцієнта деформаційного зміцнення  $d\sigma/d\varepsilon$  у процесі накопичення мікропластичної деформації  $\varepsilon$  зразка стопу Sn–38% мас. Pb, зістареного протягом 1 року. Номери кривих відповідають номерам деформаційних кривих на рис. 3.

**Fig. 8.** Changes in strain-hardening coefficient  $d\sigma/d\varepsilon$  during the accumulation of microplastic deformation  $\varepsilon$  of the sample of Sn–38% wt. Pb alloy aged for 1 year. The numbers of the curves correspond to those of the deformation curves in Fig. 3.

вантажувачів. Аналіз показує, що для всіх досліджених зразків відносно зменшення зазначених коефіцієнтів деформаційного зміцнення виявляється практично однаковим ( $\sim 0,9$ ). З урахуванням вищеописаних даних про величину деформації непружної післядії, це може свідчити про метастабільність фазового стану досліджуваного стопу і реалізацію в усіх випадках початкових стадій розпаду пересичених твердих розчинів, стимульованого зовнішнім механічним напруженням. Дані про метастабільність фазового стану досліджуваного стопу отримані авторами в окремих дослідженнях.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Проведено механічні випробування зразків надпластичного стопу Sn–38% мас. Pb в умовах активного навантажування в області мікропластичності при кімнатній температурі. Виявлено ефект знеміцнення стопу при повторному навантаженні на відміну від зміцнення металевих матеріалів, що зазвичай спостерігається в аналогічних умовах випробувань.

2. Після розвантаження в деформованих зразках спостерігається значна неупруга післядія, що свідчить про наявність у досліджуваному стопі внутрішніх напружень, які перевершують межу плинності стопу при кімнатній температурі.

3. Причинами, що призводять до знеміцнення досліджуваного стопу можуть бути релаксація внутрішніх напружень і протікання структурно-фазових перетворень в умовах дії зовнішнього напруження розтягу. Про реалізацію таких перетворень в умовах експерименту свідчать раніше отримані дані про нерівноважність фазового стану та зміну внутрішнього тертя і модуля Юнга досліджуваного стопу в результаті циклічного деформування в області мікропластичності.

4. Природне старіння супроводжується зміцненням досліджуваного стопу. Це може свідчити про метастабільність його фазового стану, що формується при вибраних умовах кристалізації, які забезпечують здатність стопу до виявлення надпластичних властивостей.

5. Величина зворотної деформації непружної післядії не виявляє помітної різниці в рівні внутрішніх напружень у деформованих зразках у залежності від тривалості старіння стопу. Зміни коефіцієнта деформаційного зміцнення, що спостерігаються, можуть свідчити про метастабільність фазового стану стопу і реалізацію в усіх досліджуваних випадках початкових стадій розпаду пересичених твердих розчинів, стимульованого зовнішнім механічним напруженням розтягу.

6. Результати проведених експериментів важливі для глибшого розуміння природи процесів, що відбуваються в метастабільних сто-

пах під впливом зовнішніх механічних напружень та старіння, і механізмів впливу цих процесів на механічні, в тому числі, надпластичні властивості стопів.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. В. Грабский, *Структурная сверхпластичность металлов* (Москва: Металлургия: 1975).
2. И. И. Новиков, В. К. Портной, *Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном* (Москва: Металлургия: 1981).
3. А. А. Пресняков, Р. К. Аубакирова, *Сверхпластичность металлических материалов* (Алма-Ата: Наука: 1982).
4. О. А. Кайбышев, *Сверхпластичность промышленных сплавов* (Москва: Металлургия: 1984).
5. Е. Н. Чумаченко, О. М. Смирнов, М. А. Цепин, *Сверхпластичность: материалы, теория, технологии* (Москва: КомКнига: 2005).
6. Terence G. Langdon, *J. Mater. Sci.*, **44**: 5998 (2009).
7. A. Zhilyaev and A. Pshenichnyuk, *Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafinegrained Materials* (Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd.: 2011).
8. В. М. Аржавитин, В. Ф. Коршак, *Металлофиз. новейшие технол.*, **23**, № 11: 1525 (2001).
9. В. М. Аржавитин, В. Ф. Коршак, А. Ф. Сиренко, *Физ. мет. металловед.*, **94**, № 3: 80 (2002).
10. В. М. Аржавитин, В. Ф. Коршак, *Физ. мет. металловед.*, **97**, № 1: 96 (2004).
11. В. Ф. Коршак, В. М. Аржавитин, А. Л. Самсоник, П. В. Матейченко, *Известия РАН. Серия физическая*, **69**, № 9: 1374 (2005).
12. В. Ф. Коршак, В. М. Аржавитин, *Физ. мет. металловед.*, **100**, № 4: 96 (2005).
13. В. С. Золотаревский, *Механические свойства металлов* (Москва: Металлургия: 1983).
14. В. Ф. Коршак, Ю. А. Шаповалов, А. Л. Самсоник, П. В. Матейченко, *Физ. мет. металловед.*, **113**, № 2: 201 (2012).
15. В. Ф. Коршак, Ю. А. Шаповалов, П. П. Паль-Валь, П. В. Матейченко, *Известия РАН. Серия физическая*, **75**, № 10: 1428 (2011).
16. K. Mori, K. N. Ishihara, and P. H. Shinghu, *Mater. Sci. Eng.*, **78**, Iss. 2: 157 (1986).
17. В. Ф. Коршак, А. П. Крышталь, П. В. Матейченко, А. Ф. Сиренко, *Известия РАН. Серия физическая*, **71**, № 12: 1723 (2007).
18. Б. Е. Уоррен, Б. Л. Авербах, *Современные физические методы исследований в металлологии* (Москва: ГОНТИ: 1958), с. 109.
19. В. Ф. Коршак, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 6: 839 (2017).
20. В. Ф. Коршак, В. С. Крыловский, Р. И. Воронцова, *Тези VIII Міжнародної наукової конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (11–14 грудня, 2007)* (Харків: 2007), с. 9.
21. В. Ф. Коршак, Ю. А. Шаповалов, Н. Н. Васеленко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 12: 1633 (2015).
22. *Физическое металловедение. Т. 3. Физико-механические свойства*

*металлов и сплавов* (Ред. Р. У. Кан, П. Хаазен) (Москва: Металлургия: 1987).

## REFERENCES

1. M. V. Grabskiy, *Strukturnaya Sverkhplastichnost Metallov* [Structural Superplasticity of Metals] (Moscow: Metallurgiya: 1975) (in Russian).
2. I. I. Novikov and V. K. Portnoy, *Sverkhplastichnost Splavov s Ultramelkim Zernom* [Superplasticity of Alloys with Ultrafine Grain] (Moscow: Metallurgiya: 1981) (in Russian).
3. A. A. Presnyakov and R. K. Aubakirova, *Sverkhplastichnost Metallicheskih Materialov* [Superplasticity of Metal Materials] (Almaty: Nauka: 1982) (in Russian).
4. O. A. Kaybyshev, *Sverkhplastichnost Promyshlennykh Splavov* [Superplasticity of Industrial Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1984) (in Russian).
5. E. N. Chumachenko, O. M. Smirnov, and M. A. Tsepin, *Sverkhplastichnost: Materialy, Teoriya, Tekhnologii* [Superplasticity: Materials, Theory, Technologies] (Moscow: KomKniga: 2005) (in Russian).
6. Terence G. Langdon, *J. Mater. Sci.*, **44**: 5998 (2009).
7. A. Zhilyaev and A. Pshenichnyuk, *Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafinegrained Materials* (Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd.: 2011).
8. V. M. Arzhavitin and V. F. Korshak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **23**, No. 11: 1525 (2001) (in Russian).
9. V. M. Arzhavitin, V. F. Korshak, and A. F. Sirenko, *Fiz. Met. Metalloved.*, **94**, No. 3: 80 (2002) (in Russian).
10. V. M. Arzhavitin and V. F. Korshak, *Fiz. Met. Metalloved.*, **97**, No. 1: 96 (2004) (in Russian).
11. V. F. Korshak, V. M. Arzhavitin, A. L. Samsonik, and P. V. Mateychenko, *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya*, **69**, No. 9: 1374 (2005) (in Russian).
12. V. F. Korshak and V. M. Arzhavitin, *Fiz. Met. Metalloved.*, **100**, No. 4: 96 (2005) (in Russian).
13. V. S. Zolotarevskiy, *Mekhanicheskie Svoystva Metallov* [Mechanical Properties of Metals] (Moscow: Metallurgiya: 1983) (in Russian).
14. V. F. Korshak, Yu. A. Shapovalov, A. L. Samsonik, and P. V. Mateychenko, *Fiz. Met. Metalloved.*, **113**, No. 2: 201 (2012) (in Russian).
15. V. F. Korshak, Yu. A. Shapovalov, P. P. Pal'-Val', and P. V. Mateychenko, *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya*, **75**, No. 10: 1428 (2011) (in Russian).
16. K. Mori, K. N. Ishihara, and P. H. Shinghu, *Mater. Sci. Eng.*, **78**, Iss. 2: 157 (1986).
17. V. F. Korshak, A. P. Kryshchal', P. V. Mateychenko, and A. F. Sirenko, *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya*, **71**, No. 12: 1723 (2007) (in Russian).
18. B. E. Warren and B. L. Averbakh, *Sovremennye Fizicheskie Metody Issledovaniy v Metallovedenii* [Modern Methods of Research in Metal Science] (Moscow: GONTI: 1958), p. 109 (in Russian).
19. V. F. Korshak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 6: 839 (2017) (in Russian).

20. V. F. Korshak, V. S. Krylovskiy, and R. I. Vorontsova, *Abstr. VIII Int. Sci. Conf. 'Physical Phenomena in Solids' (Dec. 11–14, 2007)* (Kharkiv: 2007), p. 9 (in Ukrainian).
21. V. F. Korshak, Yu. A. Shapovalov, and N. N. Vaselenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 12: 1633 (2015) (in Russian).
22. *Fizicheskoe Metallovedenie. T. 3. Fiziko-Mekhanicheskie Svoystva Metallov i Splavov* [Physical Metal Science. Vol. 3. Physical and Mechanical Properties of Metals and Alloys] (Eds. R. W. Kahn and P. Haasen) (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).