

УДК 621.763:539.4.015
PACS number(s): 83.50.-v

ЕФЕКТ ПОРТЕВЕНА–ЛЕ–ШАТЕЛЬЄ У БРОНЗІ З МЕТАСТАБІЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ

С. Лябук, О. Клименко, Т. Сидоренко

*Національний Технічний Університет “Харківський Політехнічний Інститут”
кафедра Металознавства і термічної обробки металів
21 Фрунзе, 61002 Харків, Україна, а/с 1401
ilinsky@kpi.kharkov.ua*

Метою статті є дослідження ефекту Портевена–Ле–Шател’є у бронзі з метастабільною структурою. Обґрунтовано загальну методологію критеріальної оцінки граничного стану у бронзі за умов переривчастої текучості (ПТ) в межах температур 293 К–623 К. Оцінено кількісне значення переривчастої текучості від ступеня деформування. Визначено зв’язок між міцносними параметрами і переривчастою текучістю та швидкістю і температурою деформування. Визначено термоактиваційні параметри пластичної деформації за умов появи ПТ. На підставі аналізу механізму ПТ розроблено схему програмного зміцнення бронзи БрБ2.

Ключові слова: переривчаста текучість, метастабільна структура, швидкість деформування, активаційний об’єм, програмне зміцнення.

Для визначення природи зміцнення сплавів потрібно знання про процеси самоорганізації дефектів кристалічної ґратки. Вивчення особливостей переривчастої текучості дасть змогу отримати детальніші знання про кінетику цього процесу.

Переривиста текучість під час пластичного деформування є проявом ефекту Портевена–Ле–Шател’є. Відомі чотири основні механізми переривчастої текучості – деформаційне старіння, взаємодія рухомих дислокацій з атомами домішок; утворення і розвиток локалізованих смуг зсуву, двійників; фазові перетворення, наведені деформуванням; зародження і ріст пор, тріщин [1].

Метою дослідження був аналіз механізму переривчастої текучості у берилієвій бронзі БрБ2, яка мала метастабільну структуру.

Об’єктом дослідження обрано бронзу БрБ2, яка мала метастабільну структуру. Бронзу гартували зі швидкістю охолодження 1100 °С/с.

Випробування проводили на установці TIRA-test-2300 з жорстким динамометром зі швидкостями $0,3 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$ – $11 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$ за температур 293–623 К. Для нагрівання використовували вакуумну піч. Цикл релаксації напружень проводили шляхом зупинки захватів машини і автоматичного запису на діаграмну стрічку кривої релаксації за 15 хв. Швидкість релаксації ($\dot{\sigma}$) визначали шляхом чисельного диференціювання кривих релаксації. Унаслідок випробування за

активного розтягування після релаксації напружень виявлялась площадка текучості (рис. 1).

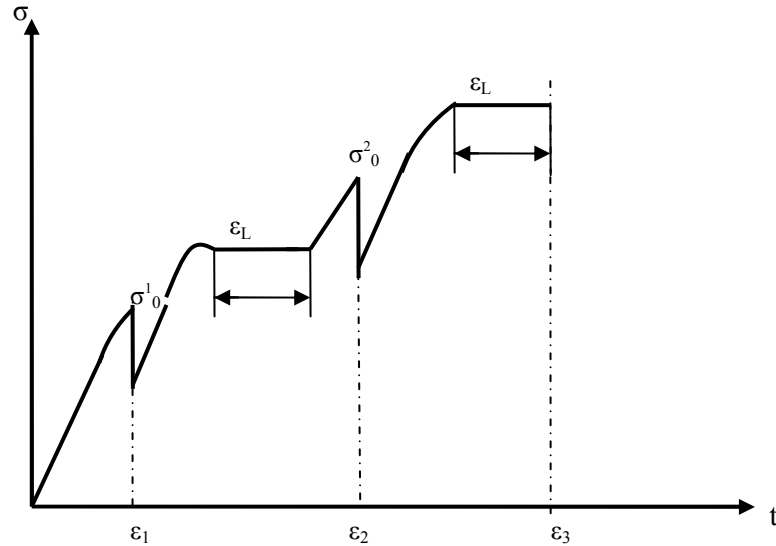


Рис. 1. Схема випробування: σ_0 – початкове напруження циклу; ϵ_L – величина площадки текучості

Відомо, що у сплавах, що старіють, швидкість деформації впливає на температуру початку розпаду пересиченого розчину (деформаційного старіння) [2–4]. Протікання процесів розпаду розчинів під час деформації відображається на кривих розтягування у появі зуба і площадки текучості і в загальному прирості міцності. Поява зуба текучості зумовлена виділенням атомів домішок з розчину і дифузією атомів до дислокацій, і пов'язаним з цим блокуванням дислокацій (утворення атмосфер Котрела).

Очевидно, що найсильніша взаємодія атомів домішок і дислокацій відбудеться за якоїсь визначеної швидкості деформації (відповідно, і температури), оскільки при нижчих швидкостях (низьких температурах) швидкість дифузії буде мала, і атмосфери атомів, що виділилися, після відриву дислокації не зможуть “наздогнати” її (зуб текучості і площадка текучості не простежені). А за вищих швидкостей деформації (температурах) швидкість дифузії буде така, що дає змогу атомам домішок рухатися разом з дислокацією. В обох випадках атмосфери практично не перешкоджають руху дислокацій.

Отже, необхідний пошук критичної швидкості деформації за якої спостерігається найсильніша взаємодія атмосфер домішок і дислокацій.

Застосування схеми циклічної релаксації (рис. 1) дало змогу вивчити вплив різних ступенів деформації на переривчасту текучість (утворення площадки текучості), а також особливості кінетики руху дислокацій залежно від швидкості, температури. Про особливості руху дислокацій судили по таких параметрах, як відносна глибина релаксації $\Delta\sigma/\sigma_0, \%$ (величина зворотна релаксаційній стійкості,

де σ_0 – початкове напруження циклу), зміцнення при релаксації $\Delta\delta$ і ε_L – величина площадки текучості.

Найбільшу величину площадок текучості (ε_L) фіксували при випробуванні із швидкістю $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ при температурах 293 К і 323 К (рис. 1–4). На рис. 2, 3 приведені залежності $\Delta\sigma/\sigma_0, \%$, $\Delta\delta$, ε_L від ступеня деформації. З графіків видно, що спостерігається строга відповідність: зниження зміцнення при релаксації напружень відповідає зниженню релаксаційної стійкості і збільшенню довжини майданчика текучості при одному і тому ж ступені деформації. Таким чином, можна зробити висновок про те, що швидкість деформації $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ є критичною.

На рис. 4 приведені криві розтягування, отримані при випробуваннях з різними швидкостями деформації.

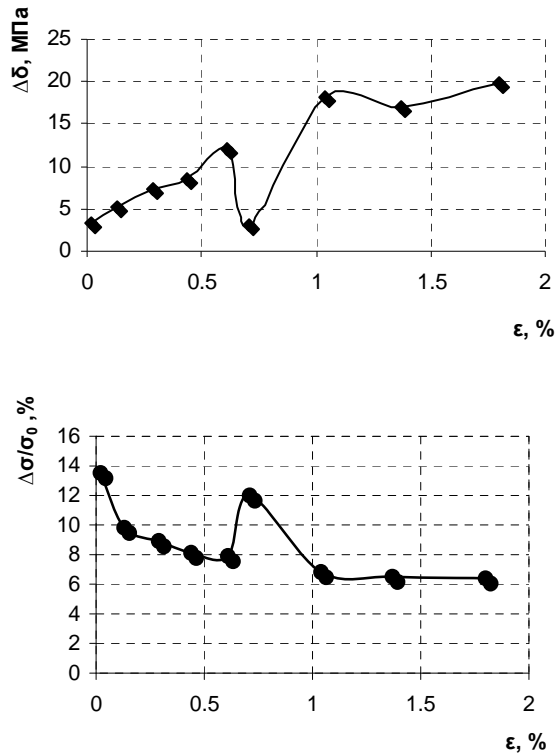
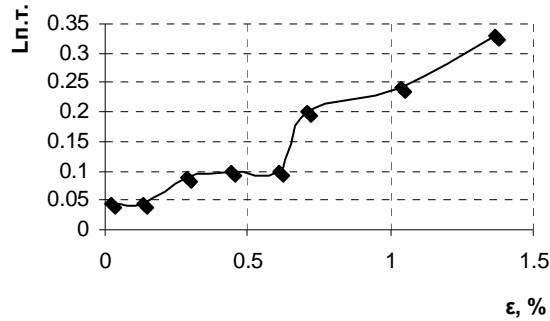
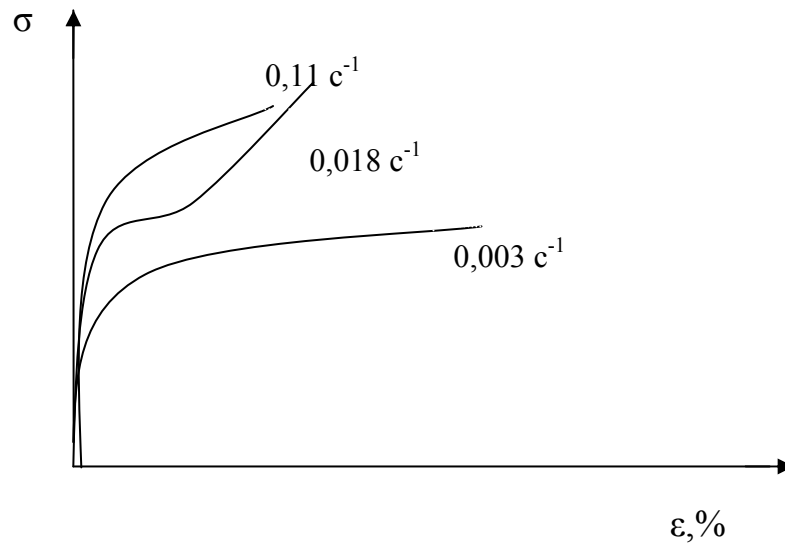


Рис. 2. Залежність зміцнення під час релаксації напружень і відносної глибини релаксації від ступеня деформування

Рис. 3. Вплив швидкості деформації на ПТ ($T_{випр}=293\text{K}$)

Площадка текучості найбільше виявляється лише за однієї швидкості деформації $1,8 \cdot 10^{-2} \text{c}^{-1}$, що також підтверджує висловлене припущення про критичну швидкість.

Рис. 4. Криві розтягнення за різних швидкостей ($T_{випр}=293\text{ K}$)

Переривиста текучість було виявлено за температур випробування 293, 308, 323 K. При вищих температурах вона виявлена не була. Використання схеми циклічної релаксації ініціювало процес переривистої течії і дало змогу детальніше вивчити це явище, на відміну від звичайного активного розтягування.

На рис. 5 показано залежність середньої величини майданчика переривистої текучості від логарифма швидкості деформації і температури випробування. Середню $\bar{\epsilon}_L$ розраховують за формулою:

$$\bar{\varepsilon}_L = \Sigma \varepsilon_L / n, \quad (1)$$

де ε_L – величина площадки текучості відповідно циклу релаксації напружень, n – кількість циклів.

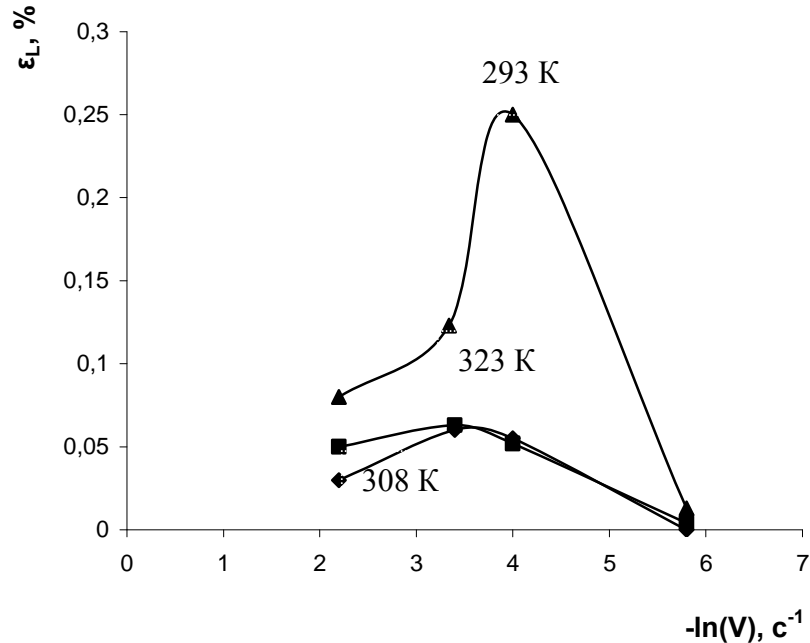


Рис. 5. Залежність майданчика текучості від температури і швидкості деформації

Отже, найбільша величина площадки текучості простежена у випробуванні зі швидкістю $1,8 \cdot 10^{-2} c^{-1}$ за температури 293 К.

Відомо, що на появу переривчастої текучості в ГЦК металах і сплавах впливає енергія дефектів упаковки, що визначає величину розщеплювання дислокацій і їх здатність до поперечного ковзання [1, 5, 6]. Тому поява бездефектних каналів (на макрорівні – смуг Чернова–Людєрса) в ГЦК сплавах може бути пов'язана з процесами анігіляції гвинтових дислокацій у разі деформації з критичною швидкістю за визначеної температури випробування.

Звертає на себе увагу, що в досить широкому інтервалі температур 293–473 К експериментальні точки межі текучості (рис. 6) концентруються поблизу горизонтальної прямої. У цьому температурному інтервалі спостерігається атермічне плато (рівень межі текучості постійний). Поясненням цього факту може бути утворення і розповсюдження бездефектних каналів уздовж площин ковзання. За температури випробування 573 К простежено різке зростання межі текучості, що відповідає процесам деформаційного старіння. У разі термічного старіння подібний рівень межі текучості досягнуто за температури відпалу 623 К.

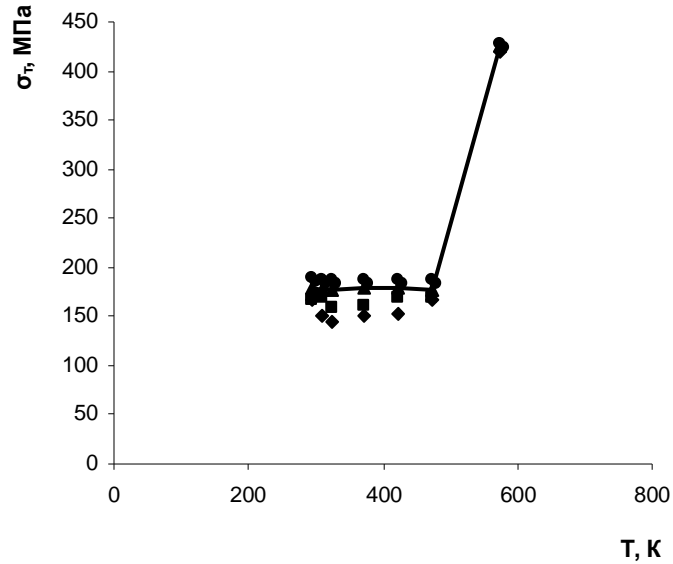


Рис. 6. Залежність межі текучості від температури дослідів

Було виявлено залежність величини активаційного об'єму від температури випробування. У разі підвищення температури величина активаційного об'єму зменшується (рис. 7).

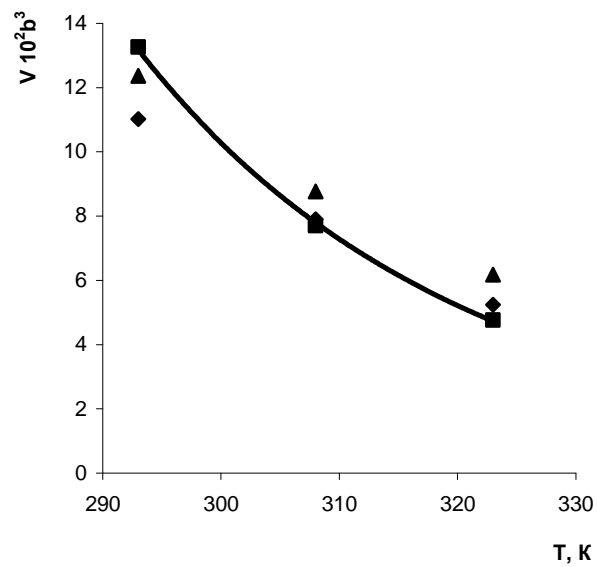


Рис. 7. Залежність активаційного об'єму від температури

Це характерно для сплавів ГЦК у разі дії механізму деформації поперечного ковзання гвинтових компонент дислокацій. Значення активаційного об'єму $(3-13) \cdot 10^{23} b^3$ не заперечують це припущення, проте вони не заперечують також і механізму взаємодії дислокацій з точковими дефектами.

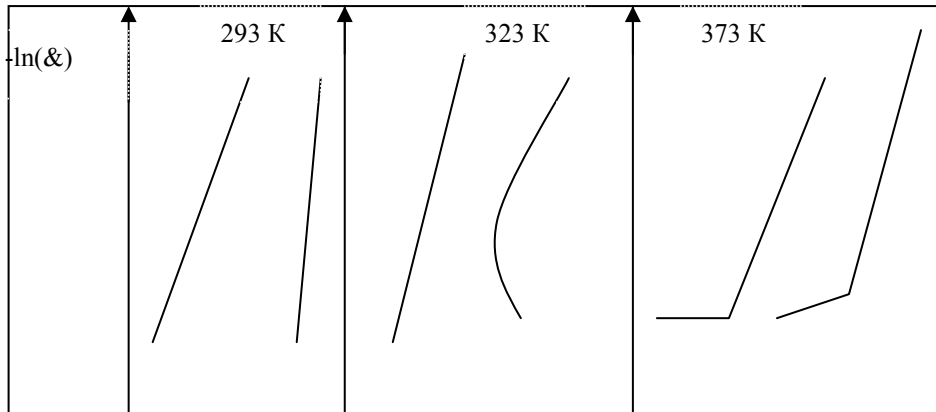


Рис. 8. Схема обробки релаксаційних кривих

Про користь цього факту свідчить також залежність активаційного об'єму (V) від ступеня деформації. Зі зростанням ступеня деформації (ϵ) V збільшується. Це можливо у випадку, якщо V залежить від концентрації точкових дефектів. І від деформації, якщо вона змінює концентрацію або розподіл точкових дефектів. Вигляд релаксаційних кривих, показаних на рис. 8, свідчать про той факт, що точки не завжди укладаються на пряму. Це означає відхилення від закону Ареніуса, для виконання якого важливо, щоб щільність рухомих дислокацій була постійна.

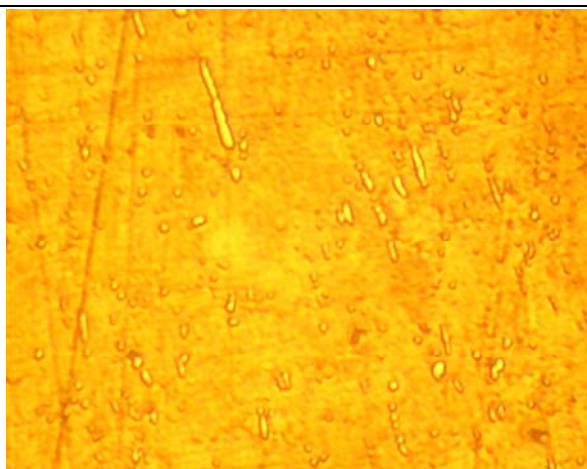
Усі ці дані свідчать про користь не лише утворення бездефектних каналів, але й про деформаційне старіння, починаючи з певного ступеня деформації і температури.

Розрахована за формулою:

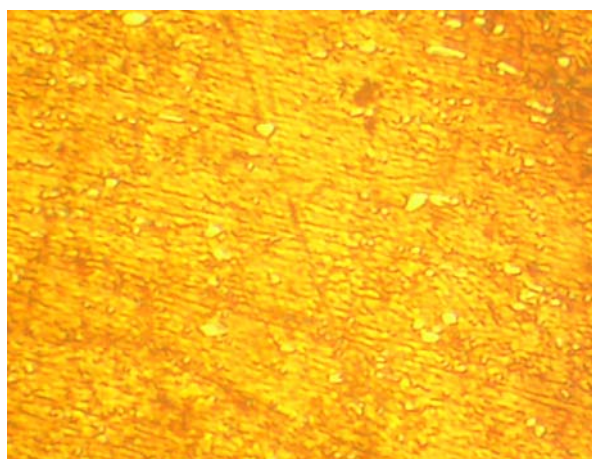
$$Q = \frac{RT_1 * T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \quad (2)$$

$Q=30-50$ кДж/моль, (де T_1 і T_2 , $\dot{\epsilon}_1$ і $\dot{\epsilon}_2$ температури і швидкості деформації у разі появи переривистої текучості) енергія активації пластичної деформації близька до енергії активації самодифузії в міді.

На наведених нижче мікроструктурах виявляються чіткі паралельні ряди частинок (рис. 9, а). Отже можна припустити, що частинки, що виділилися в процесі циклічних релаксацій, можуть розташовуватися уздовж бездефектних каналів (механізм утворення каналів описаний вище).



x 900

a

x 900

б

Рис. 9. Мікроструктура бронзи *a* – після циклічної релаксації $T_{vipr}=600$ К;
б – термічне старіння ($T_{vdp}=623$ К)

Отже, можна зробити висновок, що переривиста текучість в бронзі зумовлена двох стадійним процесом. На першій стадії ($\varepsilon \approx 0,1-0,2\%$) відбувається утворення бездефектних каналів. За великих ступенів деформації, навіть за достатньо низьких температур, можливе протікання початкових стадій деформаційного старіння, оскільки дифузійна рухливість атомів Ве унаслідок особливостей структури (велика кількість гартівних вакансій) підвищена.

Запропоновано схему циклічної релаксації до визначеної температури і швидкості деформування, яка може використовуватися як метод програмного зміцнення.

Автори висловлюють подяку за корисні поради і зауваження професору, доктору фіз.-мат. наук О.І. Ільїнському.

1. *Малыгин Г.А.* Физика тв. тела, 2005. Т. 47. Вип. 4. С. 632–638.
2. *Рахитадт А.Г.* Пружинные сплавы. М.: Металлургия, 1965. 285 с.
3. *Леонов А.В., Троценко А.Е.* Динамическое деформационное старение сталей в широком диапазоне скоростей деформации // Физика металлов и металловедение, 1989. Т. 68. Вип. 4. С. 635–639.
4. *Жариков В.П., Павлычев А.Н., Попов А.Б.* Эффекты динамического деформационного старения в бериллии. // Физика металлов и металловедение, 1992.
5. *Пастухова Ж.П., Рахитадт А.Г., Каплун Ю.А.* Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985. С. 162-228.
6. *Криштал М.М.* Прерывистая текучесть в алюминиево-магниево-сплавов // Физика металлов и металловедение, 1990. № 9. С. 140–143.

THE EFFECT OF PORTEVENA-LE-CHATELIER IN METASTABLE BRONZE

S. Lyabuk, O. Klimenko, T. Sidorenko

*National Technique University "Kharkiv Politechnique Institute"
Material Science Department
Frunze Str., 21, UA – 61002 Kharkiv, Ukraine
e-mail: ilinsky@kpi.kharkov.ua*

The purpose of the present paper is to obtain information on the effect of Portevena-Le-Chatelier (interrupt fluidity) in metastable bronze. The common method of limit condition in bronze by the interrupt fluidity at 293 K – 623 K was proposed. The quantitative relationships between magnitudes of interrupt fluidity and deformation stages, deformation rate and temperature are estimated. The thermoactivation parameters of ductile deformation by appearance of the interrupt fluidity are determined. The scheme of program hardening of bronze is designed.

Key words: interrupt fluidity, metastable structure, deformation rate, activation volume, program hardening.

Стаття надійшла до редколегії 17.05.2006

Прийнята до друку 09.06.2008