

Визначення усталеної швидкості ратчетингу за двовісного навантаження на основі параметра непропорційності циклу

М. П. Адамчук¹, М. В. Бородій

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

¹ m.p.adamchuk@gmail.com

Пропонується підхід до визначення усталеної швидкості деформації ратчетингу за двовісного навантаження в залежності від форми геометрії циклу навантаження. На основі аналізу даних, наведених у літературних джерелах, мікроструктурних досліджень і виявленої подібності мікроструктурних утворень після деформування матеріалу за жорсткого і м'якого режимів навантажень для прогнозування швидкості ратчетингу запропоновано використовувати параметр непропорційності циклу. Показано, що за допомогою геометричних параметрів циклу та простих базових експериментів можна задовільно прогнозувати швидкість ратчетингу для складних циклічних траєкторій.

Ключові слова: деформації ратчетингу, мікроструктура, параметр непропорційності циклу, двовісне циклічне навантаження, прогнозування.

Вступ. Ратчетинг, або циклічна повзучість є відомим у механіці деформівного твердого тіла явищем одностороннього накопичення деформацій під час асиметричного циклічного навантаження металевих матеріалів за наявності ненульових значень середніх напружень циклу за різних амплітуд напружень [1, 2]. Урахування цього ефекту є надзвичайно важливим при проектуванні інженерних конструкцій та оцінці їх безпеки під час експлуатації. Це пов'язано з тим, що накопичення деформацій ратчетингу суттєво знижує втомну довшовічність матеріалів [3] за рахунок прискореного утворення втомних тріщин або вичерпання резервів пластичності і, як наслідок, обмежує використання для прогнозування циклічної довшовічності широко вживаного на практиці виразу Коффіна–Менсона [4]. Окрім того, навіть якщо руйнування не спостерігається, ефект ратчетингу може призводити до недопустимої зміни геометрії конструкції, тобто втрати її функціональної придатності.

Для теоретичного опису ефекту ратчетингу зазвичай використовують незалежні від часу теорії пластичності з кінематичним або ізотропно-кінематичним законом зміцнення [5]. У більшості випадків пряме їх застосування, хоча якісно і дозволяє прогнозувати ратчетинг матеріалів за асиметричних програм м'якого навантаження, проте для адекватної кількісної оцінки навіть одновісних програм навантаження знадобились суттєві модифікації та подальші удосконалення відповідних моделей циклічної пластичності [6–8]. Основна причина, яка спонукала дослідників до проведення суттєвої модифікації визначальних рівнянь циклічної пластичності при описі ефекту ратчетингу, – необхідність адекватного моделювання кінетики напружено-деформованого стану за непропорційних (двовісних) програм циклічного навантаження.

Одним з основних фізичних параметрів, за яким визначаються константи функцій кінематичного або ізотропно-кінематичного зміцнення в моделях циклічної пластичності, може прийматись швидкість деформацій ратчетингу на усталеній, найбільш тривалій стадії навантаження. Очевидно, що для кожної одно- або двовісної траєкторії навантаження вона різна і характеризує кінетику напружено-деформованого стану. Окрім того, цей параметр використовується в моделях прогнозування довшовічності при ратчетингу [9].

Метою даної роботи є вирішення актуальної проблеми визначення усталеної швидкості ратчетингу для складних двовісних циклічних траєкторій на основі простих одновісних базових експериментів.

Обґрунтування використання параметрів непропорційності. У роботі [10] у рамках експериментального дослідження деформаційного зміцнення та ратчетингу за багатовісних непропорційних програм навантаження було проведено мікроструктурні дослідження аустенітної нержавіючої сталі марки 316. Основна увага приділялась виявленню стійких типових мікроструктурних утворень у зернах металу, характерних для кожного типу навантажень. Під час дослідження спостерігались наступні види утворень: площадки ковзання і заплутування, бар'єри, комірки та двійники. Для одновісного розтягу характерною є висока частка зерен із площадками ковзання (94%) і заплутування (до 6%). Для пропорційних (двовісних) програм навантаження частка зерен із площадками ковзання була меншою (40...80%). Цей тип навантаження характеризується незначним деформаційним зміцненням, що зумовлене утворенням дислокаційних структур, таких як заплутування (частки зерен 20...25%), бар'єри (до 15%) та комірки (20%). Для непропорційних програм навантаження, для яких за жорсткого режиму навантаження спостерігається найбільший рівень додаткового зміцнення/зміцнення, типовими структурними елементами є бар'єри, комірки та двійники з невеликою часткою зерен із площадками заплутування. При цьому зерна з площадками ковзання, найбільш характерні для одновісного та пропорційного навантаження, були відсутні взагалі або спостерігались на рівні до 13%. У роботі [11] при дослідженнях впливу непропорційності навантаження на поведінку сталі 316 відмічалось, що таке навантаження викликає зміну характеру дислокаційних бар'єрів від слабо заплутаних при пропорційному навантаженні до щільних і густих лабіринтів і комірок за непропорційного навантаження. Незважаючи на те що незначні відмінності в мікроструктурі за жорсткого (контроль за деформаціями) і м'якого (контроль за напруженнями) режиму навантаження мають місце навіть за одновісного навантаження [12], тенденція щодо ускладнення мікроструктури від пропорційного до непропорційного навантажень з утворенням подібних структурних елементів для цих режимів є спільною. Це дає підстави використовувати одні й ті ж параметри, незалежно від режиму (жорсткого або м'якого), для врахування непропорційності (складності) циклів навантаження. Такими параметрами в моделях циклічної пластичності є параметр непропорційності циклу [13]. За допомогою цього параметра встановлюється однозначна залежність між геометрією циклу і додатковим деформаційним зміцненням матеріалу за жорсткого режиму навантаження. У даній роботі при аналізі м'яких режимів навантаження для визначення швидкості ратчетингу будемо використовувати параметр Φ .

Зазвичай параметр непропорційності циклу Φ змінюється від нуля до одиниці. Нульове значення відповідає одновісному навантаженню, одиниця – непропорційній круговій траєкторії за однакового розмаху еквівалентних за Мізесом деформацій [14], тобто чим складніша траєкторія навантаження, тим більший коефіцієнт непропорційності. Для жорсткого режиму циклічного навантаження коефіцієнт непропорційності пов'язують із рівнем циклічних напружень $\Phi \sim \sigma$. За однакової амплітуди деформацій ε_a зі збільшенням складності траєкторії циклу досягнутий на кожному циклі рівень напружень зростає до стану стабілізації циклічних властивостей матеріалу (рис. 1). Тому циклічна діаграма деформування за непропорційного навантаження (на рис. 1 крива 2) характеризується більшим рівнем напружень у порівнянні з відповідною діаграмою за одновісному навантаження (крива 1).

Пояснити це можна за допомогою мікроструктурних спостережень, наведених вище. За непропорційного циклічного навантаження утворюється складна мікроструктура матеріалу, що зумовлює опір деформуванню і руху дислокацій в більшій мірі, ніж при одновісному навантаженні. Тому для досягнення одного і того ж рівня

амплітудних деформацій при непропорційному циклічному навантаженні необхідно прикласти більший рівень навантажень. Аналогічно для м'якого режиму можна очікувати протилежної тенденції: за однакових значень амплітудних напружень σ_a для складних непропорційних траєкторій навантажень рівень деформацій буде меншим порівняно з пропорційним (рис. 1). Зазначена тенденція спостерігається в експериментах на ратчетинг, коли швидкість ратчетингу для одновісної циклічної траєкторії перевищує швидкість за непропорційних циклів [15].

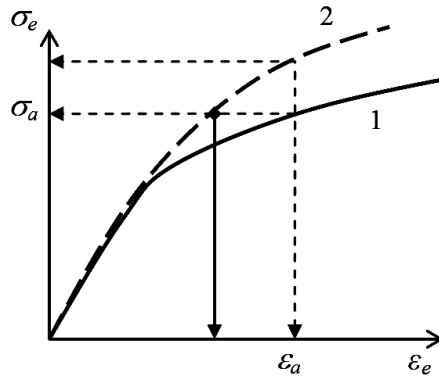


Рис. 1. Криві циклічного деформування.

Виходячи з вищевказаного, коефіцієнт непропорційності циклу за ратчетингу будемо використовувати для опису залежності збільшення швидкості ратчетингу V при зменшенні непропорційності траєкторії циклу, тобто $(1 - \Phi) \sim V$.

Модель для визначення швидкості ратчетингу. Об'єктом аналізу є одно- та двовісні циклічні траєкторії м'якого асиметричного навантаження за однакового розмаху еквівалентних за Мізесом напружень. Для прогнозування швидкості ратчетингу в залежності від геометрії циклу навантаження як базові будемо використовувати найбільш доступні з літературних джерел дані ратчетингу за одновісного навантаження розтягом–стиском та знакозмінним крученням.

Скористаємось певною аналогією при побудові виразу для прогнозування швидкості ратчетингу. За основу візьмемо принцип, прийнятий для визначення додаткового деформаційного зміцнення в залежності від параметра непропорційності циклу Φ [16]:

$$\sigma(\Phi) = (\sigma^{npr} - \sigma^{pr}) \Phi + \sigma^{pr}, \quad (1)$$

де σ^{npr} , σ^{pr} – максимальні значення напружень за непропорційного і пропорційного циклічного навантаження відповідно, визначені з базових експериментів.

Швидкість ратчетингу на усталеній стадії визначимо за допомогою виразу

$$V(\Phi) = (V^{uni} - V^{sh})(1 - \Phi)C + V^{sh}, \quad (2)$$

де V^{uni} і V^{sh} – швидкість ратчетингу на усталеній стадії за знакозмінного розтягу–стиску і знакозмінного кручення відповідно, визначена з базових експериментів; параметр C введено для врахування розмаху напружень $\Delta\sigma_m = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ у напрямку дії середніх напружень циклу та впливу довжини циклічної траєкторії (параметра) L , нормованих до відповідних параметрів базової траєкторії за розтягу–стиску,

$$C = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\sigma_{uni}} \frac{L}{L_{uni}} \quad (3)$$

Верифікація моделі. Для верифікації запропонованої моделі прогнозування усталеної швидкості ратчетингу скористаємось експериментальними даними, представленими в роботі [15]. У цій роботі досліджувалась швидкість ратчетингу нержавіючої сталі 304 для п'яти циклічних траєкторій за одно- і двовісних програм асиметричного контролюваного за напруженнями навантаження. Траєкторії циклічного навантаження наведено на рис. 2. Експеримент виконано на базі 100 циклів навантаження.

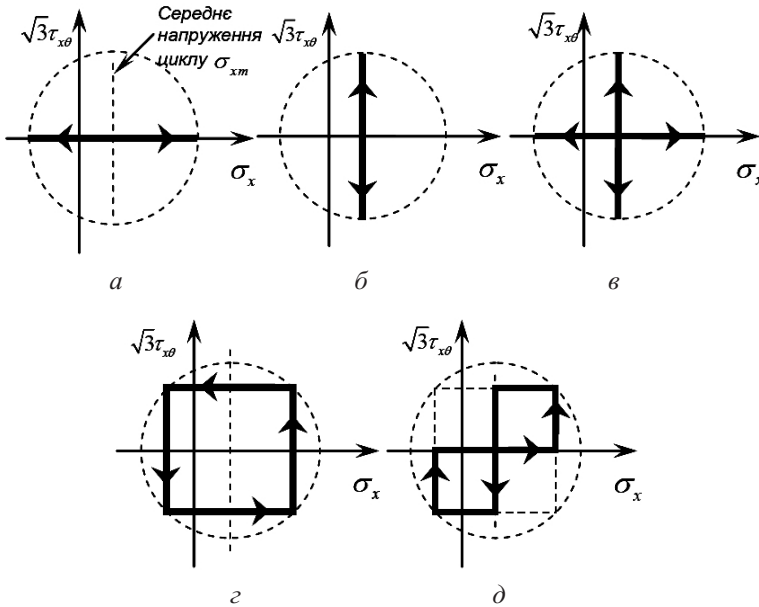


Рис. 2. Траєкторії циклічного навантаження: а – розтяг–стиск; б – знакозмінне кручення; в, г, д – непропорційні траєкторії у вигляді хреста, одного та двох квадратів відповідно.

Експериментальні швидкості ратчетингу визначались як приріст деформацій за 1 цикл навантаження на базі 50 цикл. Вони характеризують середній кут нахилу кривих ратчетингу на усталеній стадії (рис. 3).

На рис. 4 та в таблиці наведено результати прогнозування усталеної швидкості накопичення незворотних деформацій ратчетингу з використанням виразу (2) у порівнянні з експериментальними даними (рис. 3). Для всіх непропорційних траєкторій можна спостерігати незначне відхилення прогнозованих даних від експериментальних (найбільша похибка 25% має місце для траєкторії г (рис. 2)). Отриманий результат можна вважати абсолютно задовільним, враховуючи, що розраховувались швидкості ратчетингу для досить складних траєкторій навантаження і що в експериментах на циклічну міцність має місце великий розкид даних. Варто відмітити, що при розрахунку використовувались дані двох базових доволі простих експериментів: за асиметричного розтягу–стиску ($V^{uni} = 0,0055$ цикл⁻¹) та знакозмінного кручення ($V^{sh} = 0,00024$ цикл⁻¹). Необхідно зазначити, що можливість прогнозування швидкості ратчетингу за допомогою коефіцієнта непропорційності базується на даних випробувань, що проводились на нержавіючих сталях. Для кожного класу матеріалів характер залежності може бути різним.

Розрахункові та експериментальні значення усталеної швидкості ратчетингу

| Траекторія | | | | | |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Φ | 0 | 0 | 0,6366 | 0,87 | 0,7 |
| $\Delta\sigma_m / \Delta\sigma_{uni}$ | 1 | 0 | 1 | 0,707 | 0,707 |
| L/L_{uni} | 1 | 1 | 2 | 1,41 | 1,41 |
| $V_{розр}$ | 0,00548 | 0,00024 | 0,00404 | 0,00092 | 0,00260 |
| $V_{експ}$ | 0,00548 | 0,00024 | 0,00381 | 0,00071 | 0,00190 |

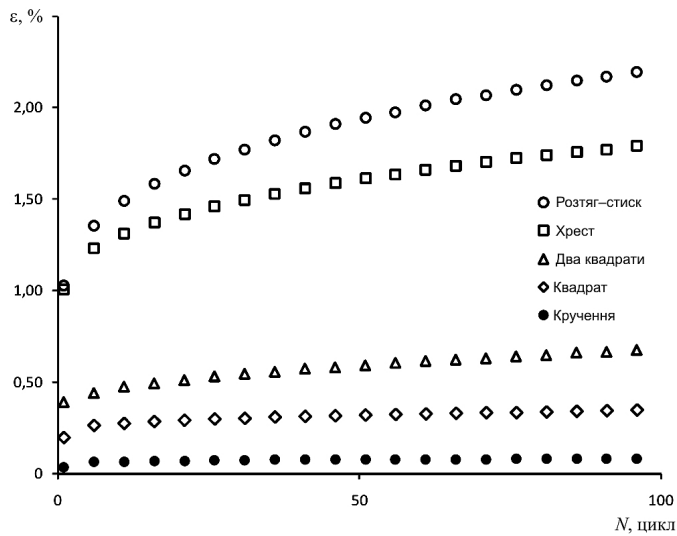


Рис. 3. Криві ратчетингу на усталеній стадії [15].

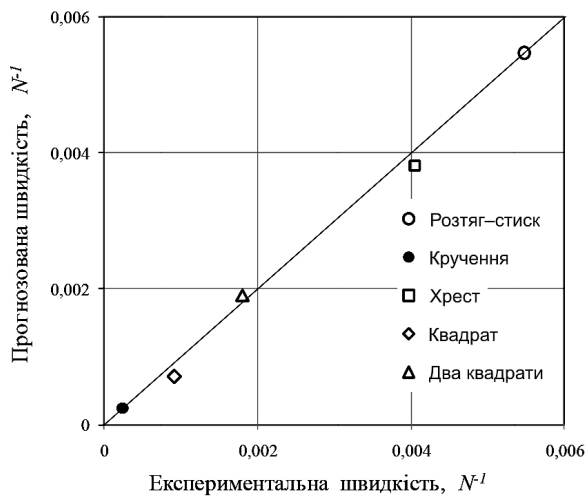


Рис. 4. Прогнозування усталеної швидкості ратчетингу.

Висновки

1. Аналіз даних мікроструктурних досліджень зразків після простого і складного циклічного навантаження дозволив провести порівняння дислокаційних структур, що виникають за різних режимів навантаження. Показано, що ускладнення мікроструктури при збільшенні непропорційності навантаження є загальною тенденцією деформування і не залежить від режиму циклічного навантаження. Це є підставою для використання параметра непропорційності циклу для визначення швидкості ратчетингу за двовісного навантаження.

2. Запропоновано модель, яка із задовільною точністю дозволяє визначати швидкість накопичення деформацій ратчетингу за двовісного асиметричного навантаження в залежності від ступеня непропорційності циклу.

Резюме

Предложен подход к определению установившейся скорости деформаций ратчетинга при двухосном нагружении в зависимости от формы геометрии цикла нагружения. На основе анализа данных, приведенных в литературных источниках, микроструктурных исследований и обнаруженной подобности микроструктурных образований после деформирования материала при жестком и мягком режимах нагружения для прогнозирования скорости ратчетинга предложено использовать параметр непропорциональности цикла. Показано, что с помощью геометрических параметров цикла и простых базовых экспериментов можно удовлетворительно прогнозировать скорость ратчетинга для сложных циклических траекторий.

1. *Lazan B. J.* Dynamic creep and rupture properties of temperature-resistant materials under tensile fatigue stress // Proc. ASTM. – 1949. – **49**. – P. 757–787.
2. *Coffin L. F.* The influence of mean stress on the mechanical hysteresis loop shift of 1100 aluminium // ASME J. Basic Eng. – 1964. – **86**. – P. 673–680.
3. *Xia Z., Kujawski D., and Ellyin F.* Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel // Int. J. Fatigue. – 1996. – **18**. – P. 335–341.
4. *Coffin L. F.* A study of the effect of cyclic thermal stresses in ductile metals // Trans ASME. – 1954. – **76**. – P. 931–950.
5. *Chaboche J. L.* Time-independent constitutive theories for cycle plasticity // Int. J. Plasticity. – 1986. – **2**, No. 2. – P. 149–188.
6. *Chaboche J. L.* On some modification of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects // Ibid. – 1991. – **7**, No. 7. – P. 661–678.
7. *Corona E., Hassan T., and Kyriakides S.* On the performance of kinematic hardening rules in predicting a class of biaxial ratcheting histories // Ibid. – 1996. – **12**. – P. 117–145.
8. *Borodii M. V.* Modeling of the asymmetric low-cycle loading in the space of stresses // Strength Mater. – 1998. – **30**, No. 5. – P. 472–480.
9. *Strizhalo V. A.* Study on the regularities of the transition from quasistatic to fatigue rupture of light alloys under a few load cycles // Ibid. – 1974. – **6**, No. 5. – P. 567–573.
10. *Bocher L., Delobelle P., Robinet P., and Feaugas X.* Mechanical and microstructural investigations of an austenitic stainless steel under non-proportional loadings in tension-torsion-internal pressure // Int. J. Plasticity. – 2001. – **17**. – P. 1491–1530.

11. *Andrews R. M. and Brown M. W.* Out-of-phase cyclic deformation and fatigue fracture studies on 316 stainless steel / M. V. Brown and K. J. Miller (Eds.). *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3*. – London: Mechanical Engineering Publications, 1989. – P. 641–658.
12. *Paul S. K., Stanford N., Taylor A., and Hilditch T.* The effect of low cycle fatigue, ratcheting and mean stress relaxation on stress-strain response and microstructural development in a dual phase steel // *Int. J. Plasticity*. – 2015. – **80**. – P. 341–348.
13. *Borodii M. V.* Determination of cycle nonproportionality coefficient // *Strength Mater.* – 1995. – **27**, Nos. 5-6. – P. 265–272.
14. *Borodii M. V. and Strizhalo V. A.* Hardening and lifetime prediction under biaxial low-cycle fatigue // *Proc. of the 7th Int. Conf. Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture* (June 28–July 1, Berlin, 2004). – 2004. – P. 279–284.
15. *Tasnim Hassan T., Taleb L., and Krishna S.* Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models // *Int. J. Plasticity*. – 2008. – **24**. – P. 1863–1889.
16. *Borodii M. V.* Effectiveness of using cycle nonproportionality coefficients in the determination of strain hardening // *Strength Mater.* – 2001. – **33**, No. 6. – P. 565–572.

Поступила 10. 04. 2017