

## Експериментальне дослідження ефекту ратчетингу за складного пропорційного навантаження

М. В. Бородій, В. О. Стрижало, М. К. Кучер, Є. Л. Данильчук, М. П. Адамчук

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

*Досліджується механічна поведінка вуглецевої сталі 20 при асиметричному пропорційному навантаженні в умовах плоского напруженого стану, який реалізується у тонкостінному зразку за розтягу–стиску та знакозмінного кручення. Асиметричне циклічне навантаження зразків проводилось із контролем по напруженнях за трьома траєкторіями з частотою 0,1 Гц на базі до 1200 цикл. Отримано діаграми деформування зразків при циклічному навантаженні за розтягу–стиску, знакозмінного кручення та пропорційного навантаження. Побудовано криві еквівалентних за Мізесом деформацій ратчетингу. Показано, що найбільша швидкість ратчетингу реалізується при навантаженні розтягом–стиском.*

**Ключові слова:** малоциклова втома, ратчетинг, складне навантаження, асиметричне пропорційне навантаження, плоский напружений стан, розтяг, кручення.

**Вступ.** Більшість сучасних машин та конструкцій під час експлуатації зазнає дії циклічного навантаження, що є найбільш характерним для енергетичного машинобудування, авіаційної і транспортної промисловості тощо. Повторно-змінні зусилля – одна з основних причин виникнення пошкоджень, руйнувань або втрати функціональної придатності конструкції внаслідок утворення втомних тріщин або накопичення значних пластичних деформацій в локальних зонах концентрації напружень із подальшим розвитком дефектів. Різноманітні аварії в результаті втомного руйнування призводять до незапланованих простоїв об'єктів енергетики, тривалих ремонтних робіт транспортних засобів і відповідно до значних фінансових затрат.

Із літературних джерел відомо багато експериментальних досліджень, в яких вивчається вплив різноманітних факторів навантаження на кінетику напружено-деформованого стану та довговічність. Перш за все необхідно відзначити, що поведінка матеріалу за циклічного навантаження суттєво залежить від вибору режиму навантаження. Тому в залежності від мети експериментів їх проводять за м'якого або жорсткого режиму. Наприклад, явище ратчетингу (циклічне накопичення пластичних деформацій) вивчається при несиметричному навантаженні з контролем по напруженнях, тоді як зміцнення–знеміцнення матеріалу – при симетричному навантаженні з контролем по деформаціях.

При експериментальних дослідженнях ратчетингу в основному вивчається вплив амплітудного та середнього напружень циклу за одно- [1–3] та двовісного навантаження [4–7]. У роботах [1–7] та інших було показано, що після початкової неусталеної ділянки, яка зумовлена циклічним зміцненням–знеміцненням, швидкість накопичення деформацій стає постійною й істотно залежною від параметрів циклу.

Експериментальні дослідження ратчетингу за одновісного навантаження зазвичай проводять на циліндричних зразках при несиметричному розтязі–стиску. Для двовісних траєкторій навантаження використовують трубчасті зразки за одночасної дії осьової сили і крутного моменту або внутрішнього тиску.

Важливою задачею при експериментальному вивченні асиметричного м'якого навантаження є дослідження непропорційності навантаження [8–12]. У роботах [8–12] проводилось циклічне асиметричне навантаження нержавіючих сталей за пропорційними (розтяг–стиск) та непропорційними траєкторіями за одного рівня еквівалентних амплітудних та середніх напружень. Було показано, що в залежності від склад-

ності траєкторії циклу один і той же матеріал буде мати різну усталену швидкість ратчетингу. Найбільша швидкість ратчетингу відмічається за пропорційного навантаження, в той час як за непропорційного (із постійним значенням еквівалентних напружень за цикл) вона найменша. Таку поведінку матеріалів можна пояснити відмінністю між процесами, що виникають на мікрорівні при пропорційному і непропорційному навантаженні. Зміна напрямку головних напружень при непропорційному циклічному навантаженні перешкоджає створенню в матеріалі стабільних дислокаційних структур. Внаслідок цього за одного і того ж рівня навантаження для непропорційної траєкторії спостерігається менший рівень деформацій ратчетингу у порівнянні з пропорційною. У роботі [9] було зроблено висновок стосовно того, що додаткове зміцнення при непропорційному навантаженні пов'язане не лише з ускладненням пластичного ковзання, а й з утворенням гетерогенних (неоднорідних) структур, таких як заплутування дислокацій, дислокаційні комірки та стінки тощо.

Отже, в роботах багатьох дослідників було показано, що інтенсивність процесів циклічної повзучості залежить від властивостей матеріалу (ізотропний, анізотропний, зміцнюваний, знеміцнюваний тощо) та режимів навантаження (ступінь асиметрії циклу, запас пластичності, частота прикладення навантаження, непропорційність траєкторії навантаження, температурні та інші умови).

Проте, в літературних джерелах на сьогодні є недостатньо експериментальних даних при асиметричному навантаженні конструкційних матеріалів, що широко використовуються в промисловості, а також при оцінці впливу виду напруженого стану на кінетику накопичення деформацій циклічної повзучості. Тому експериментальні дослідження ефекту ратчетингу є актуальними.

**Матеріал та методика випробувань.** Для вивчення поведінки матеріалу за асиметричного циклічного навантаження виконано експериментальні дослідження на статичну і циклічну міцність вуглецевої сталі 20 за кімнатної температури.

Сталь 20 – це конструкційна вуглецева якісна сталь, що широко використовується для виготовлення колекторів і трубопроводів котлів високого тиску, листів для штампованих деталей та деталей для тривалої роботи за температур до 350°C. Хімічний склад (%) сталі 20 [13] наступний: 0,17...0,24 C; 0,17...0,37 Si; 0,35...0,65 Mn; 0,25 Ni; 0,04 S; 0,04 P; 0,25 Cr; 0,25 Cu; 0,08 As.

Зразки для випробувань виготовляли з трубного сортаменту. Для визначення механічних властивостей матеріалу при статичному короткочасному навантаженні згідно з [14] було виготовлено циліндричні зразки (рис. 1,а).

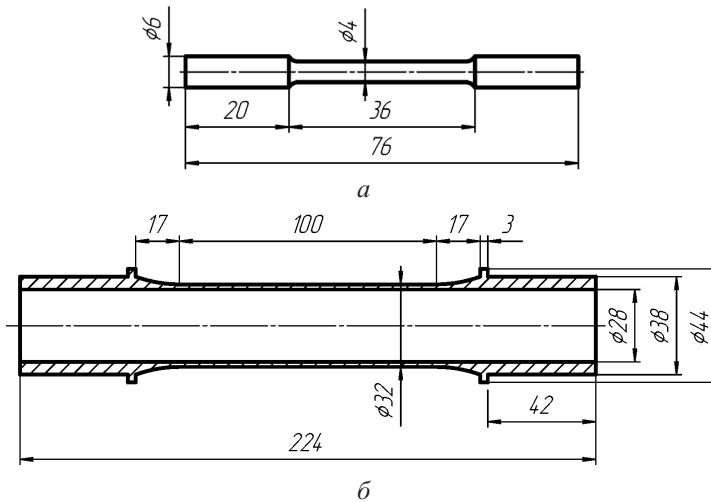


Рис. 1. Схеми циліндричного (а) і трубчастого (б) зразків.

Досліджувана сталь має такі усереднені механічні характеристики: модуль пружності  $E = 198,2$  ГПа; границя плинності  $\sigma_{0,2} = 409,9$  МПа; границя міцності  $\sigma_B = 600,5$  МПа; відносне видовження після розриву  $\delta = 20,0\%$ .

Випробування в умовах складного навантаження (розтяг–кручення) проводили на тонкостінних трубчастих зразках (зовнішній діаметр – 32 мм, внутрішній – 28 мм) – рис. 1,б. Типову діаграму деформування сталі 20 наведено на рис. 2.

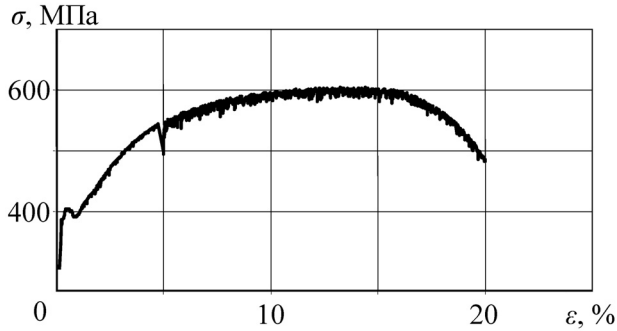


Рис. 2. Типова діаграма деформування сталі 20.

**Експериментальне обладнання.** Весь цикл статичних і циклічних випробувань циліндричних і тонкостінних трубчастих зразків було виконано на сервогідравлічній універсальній двовісній машині BiSS Bi-00-701 для випробувань на розтяг–кручення. Дана система дозволяє проводити випробування на міцність, втомні випробування та випробування щодо оцінки механіки руйнування за спільної дії осевого навантаження та крутного моменту.

За допомогою сервогідравлічної установки можна проводити механічні дослідження широкого класу конструкційних матеріалів і деталей машин. Установка включає електронну цифрову систему зі зворотним зв'язком, яка використовує канали інформації від датчиків для керування процесом навантаження, моніторингу поточних параметрів випробувань, збору та обробки експериментальних даних.

Основні технічні характеристики машини BiSS Bi-00-701

Жорсткість співвісної силової рами .....	600 МН/м
Максимальне зусилля статичного навантаження .....	100 кН
Максимальний крутний момент .....	2 кН·м
Максимальний кут повороту штоку .....	$\pm 40^\circ$
Частота циклічного навантаження .....	0,001...50 Гц

Осьова деформація вимірювалась за допомогою тензорезисторного перетворювача деформацій (Bi-06-302) з робочим діапазоном  $+25\%/-10\%$  на базі 25 мм.

Слід зазначити, що статичні випробування проводились до повного руйнування циліндричних зразків. Тому з метою безпечного використання тензорезисторного перетворювача деформацій при досягненні 10%-ної осьової деформації його від'єднували, а подальше деформування зразка фіксувалось за допомогою вмонтованого датчика переміщень штока, дані з якого автоматично записувались контролером. Оскільки жорсткість силової рами випробувальної машини BiSS Bi-00-701 значно більша за жорсткість зразка, вимірюване переміщення штока є близьким до дійсного переміщення випробуваного зразка на базовій довжині.

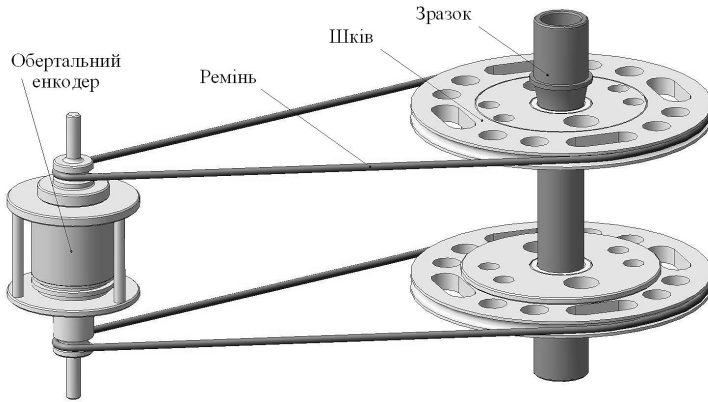


Рис. 3. Система для вимірювань кута закручування трубчастого зразка.

Деформація зсуву (тобто кут закручування) трубчастого зразка фіксувалась за допомогою створеної системи для вимірювань кута повороту, яка складається з цифрового обертального енкадера, ременів та шківів (рис. 3).

Шківви жорстко закріплюються на зразку і за допомогою ременів передають обертання до цифрового енкадера ENC 58/10-2500ABZ/L/8-30V/R, розміщеного на силовій рамі випробувальної машини, який, у свою чергу, приєднується до контролера. Роздільна здатність системи для вимірювання кута закручування складає близько  $0,015^\circ$ .

Додатково кут повороту фіксувався датчиком кутового переміщення, дані з якого автоматично записувались контролером.

При проведенні циклічних випробувань тонкостінних трубчастих зразків за умов одночасної дії розтягу–стиску та знакозмінного кручення використовувались оригінальні гідравлічні захвати для механічних випробувань трубчастих зразків [15], які забезпечили надійну передачу зусиль і їх фіксацію.

**Програма та результати експериментів.** Програмою було передбачено наступні види випробувань.

1. На розтяг–стиск і знакозмінне кручення в жорсткому режимі з розвантаженням на рівнях 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 і 1,0% еквівалентних за Мізесом деформацій (рис. 4).

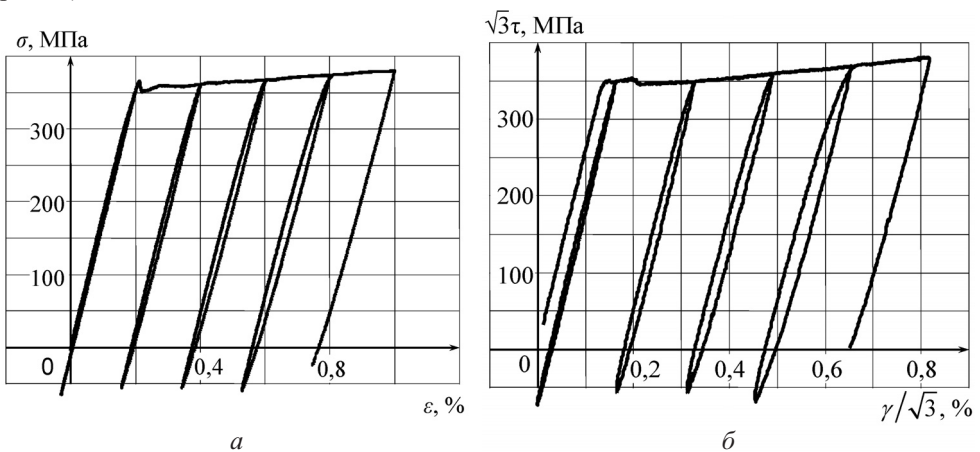


Рис. 4. Діаграми деформування при навантаженні–розвантаженні за розтягу–стиску (а) і знакозмінного кручення (б).

2. На циклічне навантаження зразків у жорсткому режимі з амплітудою еквівалентних за Мізесом деформацій 0,8% за трьома траекторіями деформування (рис. 5) до стабілізації циклічних діаграм. Циклічне навантаження прикладалось із частотою 0,1 Гц. Взагалі при розтязі–стиску деформування було обмежене 10 циклами (рис. 6,*a*), при знакозмінному крученні – 16 циклами (рис. 6,*б*), при пропорційній траекторії – 5 циклами (рис. 7).

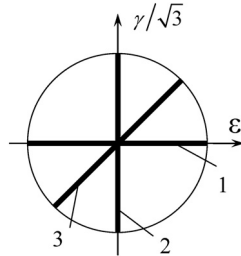


Рис. 5. Траекторії жорсткого циклічного навантаження: 1 – розтяг–стиск; 2 – знакозмінне кручення; 3 – пропорційна траекторія.

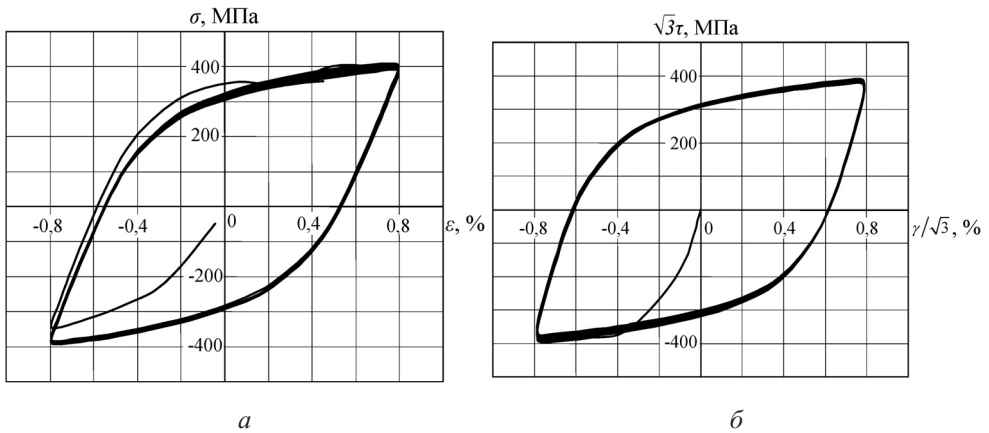


Рис. 6. Діаграми циклічного жорсткого навантаження при розтязі–стиску (*a*) і знакозмінному крученні (*б*).

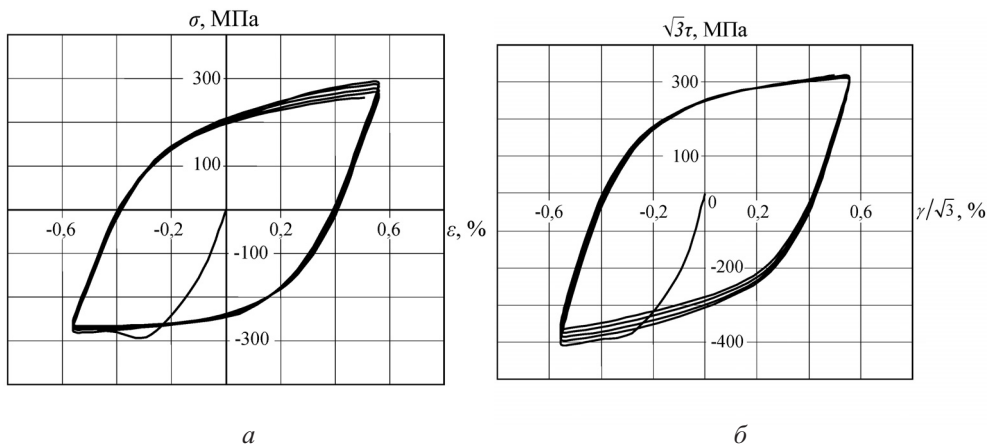


Рис. 7. Осьові напруження і деформації (*a*) та дотичні напруження і кутові деформації (*б*) за пропорційного жорсткого циклічного навантаження.

3. На асиметричне циклічне навантаження з контролем по напруженнях за трьома траєкторіями (рис. 8). При цьому амплітуда еквівалентних напружень складала  $\sigma_a = 265,3$  МПа, що відповідає амплітудному зусиллю на штоці випробувальної машини  $P_a = 50$  кН, еквівалентне середнє напруження –  $\sigma_m = 106,1$  МПа, що відповідає зусиллю  $P_a = 20$  кН. Частота циклічного навантаження дорівнювала 0,1 Гц.

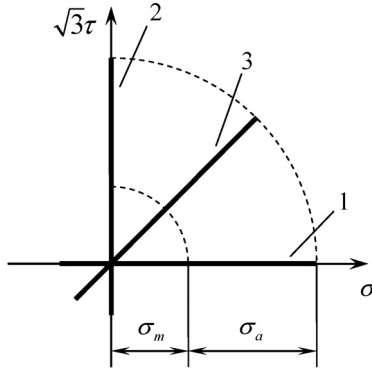


Рис. 8. Траєкторії асиметричного циклічного навантаження з контролем по напруженнях: 1 – розтяг–стиск; 2 – знакозмінне кручення; 3 – пропорційна траєкторія.

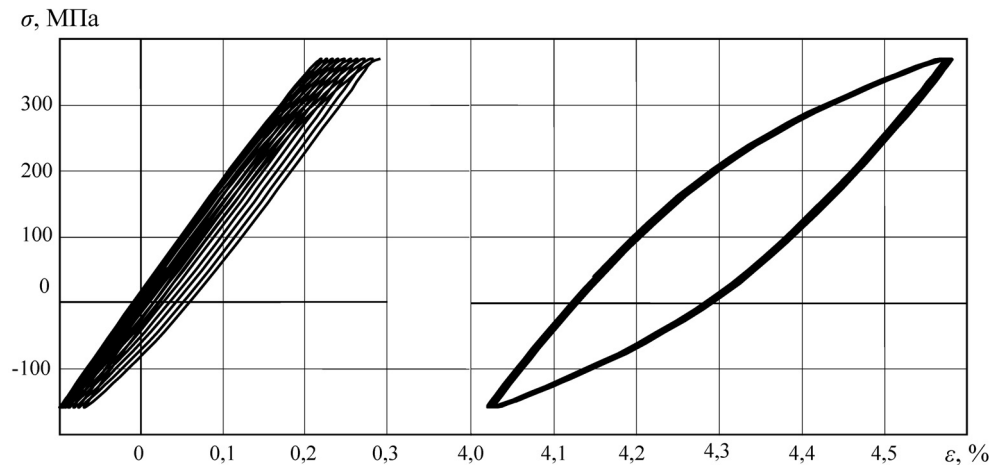


Рис. 9. Діаграма напружень на початкових та кінцевих циклах програми навантажування за асиметричного розтягу–стиску.

При аналізі експериментів на розтяг–стиск і знакозмінне кручення в жорсткому режимі з розвантаженням (рис. 4) варто відзначити більшу нелінійність пружних ділянок у випадку крутного деформування і відповідно ширші петлі пружно-пластичного гістерезису.

Випробування на циклічне навантаження зразків у жорсткому режимі за трьома траєкторіями деформування показали, що сталь 20 є майже циклічно стабільним матеріалом з ознаками циклічного зменшення (рис. 7, 8), тобто зменшення амплітудних напружень за постійної величини амплітудних деформацій.

За результатами експериментів на асиметричне циклічне навантаження з контролем по напруженнях за трьома траєкторіями побудовано діаграми напружень для розтягу–стиску (рис. 9), знакозмінного кручення (рис. 10) та пропорційного навантаження (рис. 11). На рис. 12 наведено криві накопичення деформацій ратчетингу, тобто максимальні значення еквівалентних за Мізесом деформацій, отримані протя-

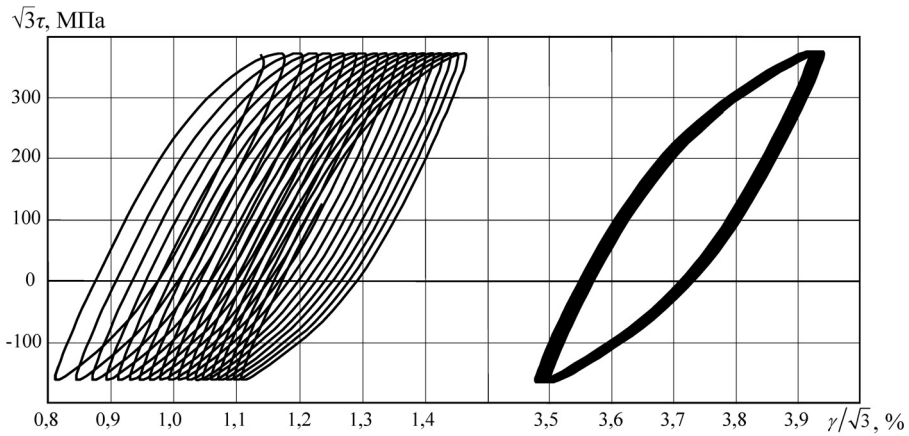


Рис. 10. Діаграми напружень на початкових та кінцевих циклах програми навантаження за асиметричного знакозмінного кручення.

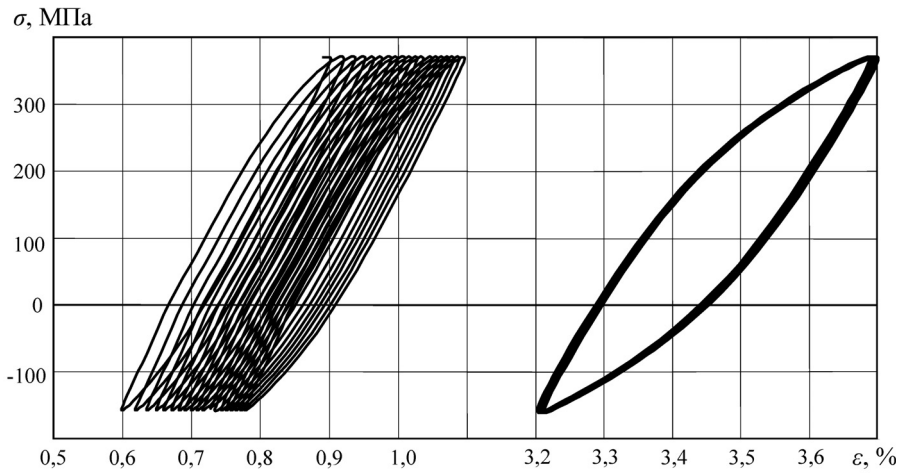


Рис. 11. Діаграми напружень на початкових та кінцевих циклах програми навантаження за асиметричного пропорційного навантаження.

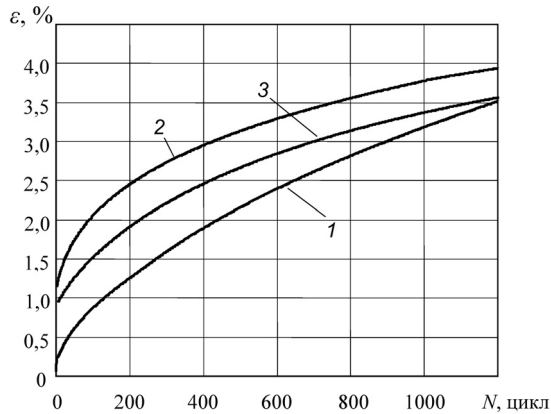


Рис. 12. Криві накопичення еквівалентних деформацій при навантаженні за трьома траєкторіями: 1 – асиметричний розтяг–стиск; 2 – асиметричне знакозмінне кручення; 3 – асиметричне пропорційне навантаження.



гом циклу навантаження. Очевидно, що вид напруженого стану відіграє суттєву роль у кінетиці напружено-деформованого стану при асиметричному циклічному м'якому навантаженні сталі 20. Так, при асиметричному розтязі–стиску усталена швидкість накопичення деформацій є найбільшою, при крученні – найменшою, а за пропорційного навантаження вона приймає проміжне значення, хоча й мало відрізняється від такої при крученні. Варто також відзначити значне збільшення ширини петлі пружно-пластичного гістерезису за розтягу–стиску і відповідно зменшення матеріалу, в той час як при крученні сталь 20 поводить себе як циклічно стабільний матеріал. Цією відмінністю в циклічній стабільності матеріалу можна пояснити те, що на початковій ділянці кривої ратчетингу саме розтяг–стиск зумовив найменші деформації попри те, що загалом демонстрував найбільшу швидкість накопичення деформацій.

## Висновки

1. Розроблено методику механічних випробувань металічних матеріалів за асиметричного двовісного пропорційного навантаження. За цією методикою проведено експериментальне дослідження поведінки сталі 20 при циклічному навантаженні за різними програмами.

2. Установлено, що при асиметричному розтязі–стиску усталена швидкість накопичення деформацій є найбільшою, при крученні та за пропорційного навантаження вона складає приблизно 50%, тобто матеріал є чутливим до виду напруженого стану.

3. Отримані експериментальні дані можуть служити базовим експериментом для визначальних рівнянь циклічної пластичності при опису ефекту ратчетингу та моделюванні останнього за різних програм непропорційного навантаження.

## Резюме

Исследуется механическое поведение углеродистой стали 20 при асимметричном пропорциональном нагружении в условиях плоского напряженного состояния, которое реализуется в тонкостенном образце при растяжении–сжатии и знакопеременном кручении. Асимметричное циклическое нагружение образцов проводилось с контролем по напряжениям по трем траекториям с частотой 0,1 Гц на базе до 1200 цикл. Получены диаграммы деформирования образцов при циклической нагрузке в условиях растяжения–сжатия, знакопеременного кручения и пропорционального нагружения. Построены кривые эквивалентных по Мизесу деформаций ратчетинга. Показано, что наибольшая скорость ратчетинга реализуется при нагружении растяжением–сжатием.

1. *Hassan T. and Kyriakides S. Ratcheting in cyclic plasticity. Part I: Uniaxial behavior // Int. J. Plast. – 1992. – 8. – P. 91 – 116.*
2. *Hassan T. and Kyriakides S. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials. Part II: Uniaxial behavior // Ibid. – 1994. – 10. – P. 149 – 184.*
3. *Lissenden C. J., Doraiswamy D., and Arnold S. M. Experimental investigation of cyclic and time-dependent of titanium alloy at elevated temperature // Ibid. – 2007. – 23. – P. 1 – 24.*
4. *Hassan T., Corona E., and Kyriakides S. Ratcheting in cyclic plasticity. Part II: Multiaxial behavior // Ibid. – 1992. – 8. – P. 117 – 146.*
5. *Hassan T. and Kyriakides S. Ratcheting of cyclically hardening and softening materials. Part II: Multiaxial behavior // Ibid. – 1994. – 10. – P. 185 – 212.*



6. *Calloch S. and Marquis D.* Triaxial tension–compression tests for multiaxial cyclic plasticity // *Ibid.* – 1999. – **15**. – P. 521 – 549.
7. *Khan A. S., Chen X., and Abdel-Karim M.* Cyclic multiaxial and shear finite deformation response of OFHC. Part I: Experimental results // *Ibid.* – 2007. – **23**. – P. 1285 – 1306.
8. *Aubin V., Quagebeur P., and Degallaix S.* Cyclic plasticity of a duplex stainless steel under non-proportional loading // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2003. – **346**. – P. 208 – 215.
9. *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 and external pressure // *Int. J. Plast.* – 2001. – **17**. – P. 1491 – 1530.
10. *Hassan T., Taleb L., and Krishna S.* Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models // *Ibid.* – 2008. – **24**. – P. 1863 – 1889.
11. *Taleb L. and Hauet A.* Multiscale experimental investigations about the cyclic behavior of the 304L SS // *Ibid.* – 2009. – **25**. – P. 1359 – 1385.
12. *Бондарь В. С., Пролубникова А. А., Абашев Д. Р.* Расчетно-экспериментальное определение материальных функций нержавеющей стали 12Х18Н10Т // *Изв. МГТУ “МАМИ”*. – 2013. – **3**, № 1 (15). – С. 24 – 29.
13. *ГОСТ 1050-88.* Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1991.
14. *ASTM E8M-04.* Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. – 24 p.
15. *Пат. 51048 Україна, МПК G01N 3/00.* Захват установки для механічних випробовувань трубчастих зразків / В. Т. Трошенко, Є. І. Мітченко, В. В. Кутняк, М. М. Заразовський. – Чинний з 25.06.2010.

Поступила 22. 10. 2013