

ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛУ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ СТАТИЧНОМУ ТА ЦИКЛІЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ПО КІНЕТИЦІ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О. Гопкало¹, Г. Безлюдько², В. Нехотящий³

¹ Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, м. Київ

² ТОВ "Спеціальні наукові розробки" м. Харків

³ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, м. Київ

Abstract. The results of experimental investigations of the damage assessment of ferromagnetic steel 05kp and austenite (paramagnetic in the initial state) steel AISI 304 (08Kh18N9) using the coercive force kinetics under static and cyclic loading are presented. In accordance with the change of direction of the coercive force kinetics the staging of damage accumulation processes is determined, namely: elastoplastic deformation corresponds to the crack initiation stage, while metal continuity loss corresponds to the crack propagation stage.

Вступ. Роботи останніх років в області магнітної структуроскопії дозволили встановити зв'язок магнітних і фізико-механічних властивостей ряду феромагнітних конструкційних сталей [1,2]. В якості основного магнітного параметра обрана коерцитивна сила (H_c , А/см), як найбільш чутлива до структурних змін у металі [3] і пов'язана лінійною залежністю з механічними властивостями. Приріст величини коерцитивної сили H_c від деформаційного впливу на метал щодо вихідного стану поставки до руйнування становить 100-300% в залежності від складу металу [4]. Такої інформаційної чутливості до деформування металу поки не виявлено іншими методами неруйнівного контролю.

Науковий і практичний інтерес представляють також роботи, пов'язані з можливістю використання появи і зміни магнітних властивостей у аустенітних (парамагнітних у вихідному стані) сталях при статичному або циклічному деформуванні для оцінки їх міцності та пошкоджень по кінетиці коерцитивної сили. У даній роботі використовували схильність аустенітних сталей до структурних перетворень аустеніту $\gamma \rightarrow \alpha$ і появи феромагнітної фази (α -Fe), яка викликає зміну магнітних властивостей металу з парамагнітного у феромагнітний стан при зовнішніх деформаційних впливах. Використання коерцитивного контролю в умовах втомного навантаження дозволить проводити повноцінну діагностичну експертизу поточного стану елементів конструкції, а не суміш дефектоскопії з дефектометрією, як це має місце сьогодні [5].

У зв'язку з неоднорідністю розподілу напружень по поверхні та глибині виробів [6,7] точність виміру магнітних властивостей (коерцитивної сили) у локальних поверхневих зонах залежатиме від габаритів датчика та глибини намагнічування металу. Тому для досліджень були спеціально розроблені коерцитиметри з малогабаритними датчиками неглибокого намагнічування.

При розтязі та циклічному вантаженнях увесь процес накопичення пошкоджень розділяють на дві основні стадії: стадію зародження та стадію поширення тріщин, оскільки закономірності процесів пластичної деформації і руйнування при різних видах деформації мають багато спільного [8,9]. В даній роботі проведені експериментальні дослідження впливу процесів статичного та циклічного навантаження лабораторних зразків із феромагнітної сталі 05kp та аустенітної парамагнітної у вихідному стані сталі AISI 304 на кінетику коерцитивної сили H_c , яка відображає накопичення відповідних пошкоджень.

Робота виконувалася в інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України та інституті електрозварювання імені Е.О.Патона НАН України.

Методика і результати експериментальних досліджень. Об'єктом досліджень був метал рулонної листової сталі 05kp товщиною 3 мм і метал труб $\varnothing 76 \times 3$ і $\varnothing 159 \times 4$ з

подовжнім зварним швом із аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9), італійського виготовлення у відповідності з європейським стандартом EN 10217-7.

Для випробувань на статичний та циклічний розтяг використали довгі та короткі лабораторні зразки з розмірами робочої частини 150x14x3 мм та 28x14x3, 6 мм відповідно.

Випробування на розтяг та малоциклову втому проводили на модернізованій електрогідравлічній випробувальній машині УЕ-20 (СКБІМ, Росія) відповідно до ГОСТ 1497-84, 25.502-79 і ГОСТ 25.505-85. Випробування на малоциклову втому проводили по симетричному циклу осьового розтягу-стиску з контролем амплітуди деформації з постійною швидкістю деформування 6%/хв. Випробування на циклічний віднульовий розтяг з частотою 2 цикл./хв. проводили на важільній випробувальній машині ПП-4М (ЦНИИТМАШ, Росія), оснащеної приводом циклічного підняття вантажу на важелі.

Вимірювання коерцитивної сили H_c у зразках проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М (ТОВ "Спеціальні наукові розробки" м.Харків) відповідно до стандартів ІСО4301, ГОСТ 30415-96 та методичними вказівками РД ІКЦ «Кран» 07/97/02 (Росія), МВ 0.00-7.01-05 (Україна). Для вимірювання значень коерцитивної сили використовували структуроскоп із стандартним датчиком $D45$ (база - 45 мм), малобазним датчиком $D20$ (база - 20 мм) і датчиком із зменшеною базою $D4$ (база - 4 мм). Де базою вимірювання є відстань між внутрішніми краями полюсів наконечників магнітів. Залежно від матеріалу і бази датчика глибина намагнічування може становити: для датчика $D45$ - до 30 мм, $D20$ - до 4 мм і $D4$ - до 1мм.

Вимірювання об'єму феромагнітної фази (α -Fe) в аустенітній сталі проводили ферітометром "Ferritghaltmesser 1.053 Forster".

Результати експериментальних досліджень сталі 05кп при статичному та циклічному розтязі. На рис. 1 приведена діаграма розтягу довгих зразків та залежність коерцитивної сили H_c , вимірюною датчиком $D45$, від деформацій (ε) при поступовому короткочасному ступінчатому навантаженні (P) з розвантаженням до значень $P=0$, а на рис. 2 кінетика деформацій і значень коерцитивної сили H_c по числу циклів навантаження з розвантаженням при циклічному розтязі з частотою 2 цикл./хв.

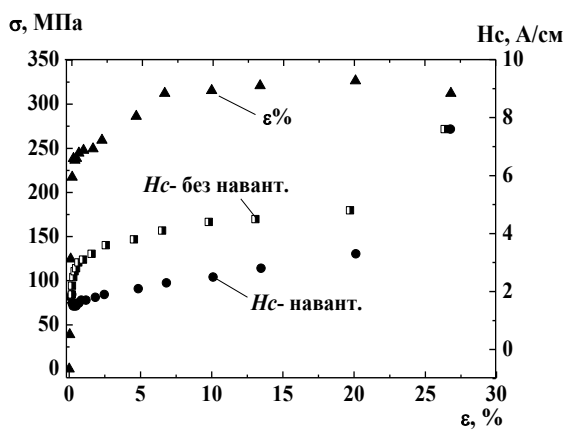


Рис. 1. Діаграма розтягу довгих зразків і залежність коерцитивної сили H_c , від деформацій (ε) при короткочасному навантаженні з розвантаженням.

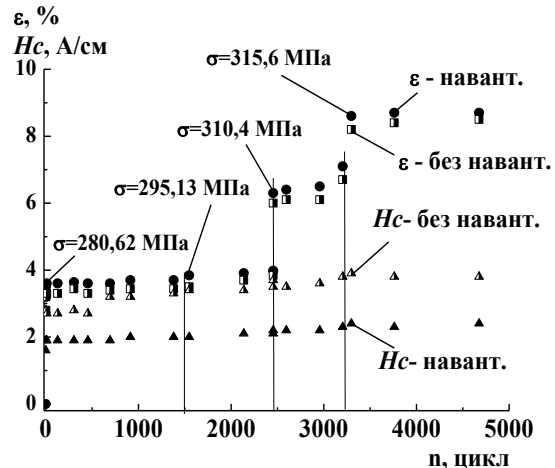


Рис. 2. Кінетика деформацій і значень коерцитивної сили H_c по числу циклів навантаження з розвантаженням при циклічному розтязі з частотою 2 цикл./хв.

Отримані дані показують, що при статичному розтязі з поступовим ступінчастим підвищенням навантаження з розвантаженням на кожній ступені та при циклічному розтязі у розвантаженому стані значення коерцитивної сили приблизно на 50% вищі щодо навантаженого стану на тій же ступені навантаження. Слід зазначити, що критичні значення H_c перед руйнуванням у навантаженому і розвантаженому стані збігаються і

становлять 7,8 А/см. Значення коерцитивної сили перед руйнуванням приблизно в 4 рази перевищують аналогічні величини в початковому стані металу.

Результати експериментальних досліджень сталі AISI 304 при розтязі. На рис. 3 приведена діаграма розтягу, залежність коерцитивної сили H_c , вимірююю датчиком $D20$, та об'єму ферромагнітної фази (α -Fe) від деформацій (ε) при статичному розтязі коротких зразків. Слід зазначити, що при ступінчатому підвищенні деформації розтягу на 5% зростання значень коерцитивної сили спостерігається тільки при досягненні деформації $\sim 25\%$ (при напруженнях нижче межі міцності металу) і при подальшому деформуванні має місце різке зниження значень H_c . При ступінчатому навантаженні з розвантаженням значення коерцитивної сили у навантаженому та розвантаженому стані збігаються. На початкових стадіях навантаження зміни коерцитивної сили H_c більш чутливі до зміни деформацій, ніж утворенню ферромагнітної фази (α -Fe), яка утворилася у аустенітній сталі (γ -Fe) і складається із мартенситу - і феріту- деформації і при досягненні граничних деформацій ($\varepsilon \geq 40\%$) набуває лавиноподібний характер. Однією з причин такої поведінки коерцитивної сили може бути зниження залишкових стискаючих напружень через зменшення щільності металу, викликаного накопиченням пошкоджень кристалів, утворенням пор і пустот при пластичній деформації розтягу [10].

Використання структуроскопа із зменшеною базою датчика $D4$ дозволило дослідити розподіл значень коерцитивної сили по довжині робочої частини зразка при розтязі і знакомінному деформуванні і побудувати кінетику H_c в локальних поверхневих зонах зразка. На рис. 4 показана залежність значень коерцитивної сили,

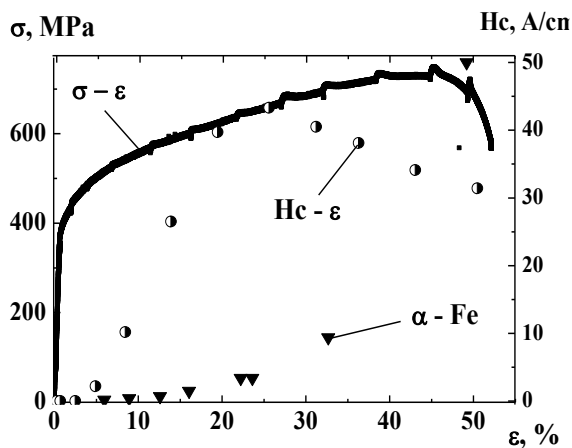


Рис. 3 Діаграма розтягу, залежність коерцитивної сили H_c та об'єму ферромагнітної фази (α -Fe) від деформацій (ε) при статичному розтязі коротких зразків.

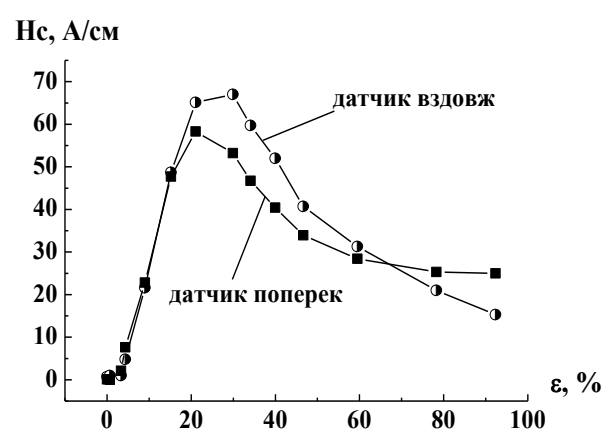


Рис. 4 Залежність коерцитивної сили від деформацій у найбільш деформованій локальній зоні при розтязі при розташуванні полюсів магнітів датчика вздовж і поперек робочої частини зразка.

вимірююю за допомогою датчика $D4$, від накопичених деформацій у найбільш деформованій локальній зоні (руйнування) зразка при розтязі при розташуванні полюсів наконечників магнітів датчика вздовж і поперек зовнішньої поверхні робочої частини зразка з труби. При розташуванні полюсів наконечників магнітів у поздовжньому напрямку робочої частини зразка максимальні значення коерцитивної сили на 13% перевищують аналогічні значення при розташуванні полюсів наконечників магнітів в поперечному напрямку. Наявність зростаючих та спадаючих ділянок на графіках може свідчити про стадійність і зміні переважаючих механізмів накопичення пошкоджень у металі при розтязі. Зростаючій ділянці відповідає пружно-пластичне деформування, а спадаючій - утворення і розвиток пор і тріщин.

У роботах [11,12,13] відзначено, що при статичному розтязі пластичне деформування і пошкодження, накопичені до початку утворення шийки, класифікують як період зародження тріщин, а шийкоутворення з подальшим руйнуванням – як період її поширення.

Отримані результати свідчать про те, що при розтязі до значень накопичених деформацій $\sim 25\%$ і напружень нижче межі міцності зростання коерцитивної сили пов'язане з пружнопластичним деформуванням сталі, яке підвищує намагніченість металу (коерцитивної сили), а зниження значень H_c при подальшому деформуванні до межі міцності - з утворенням пор і тріщин (втратою суцільності металу, що викликає зниження магнітних властивостей). Таким чином, у відповідності з зазначеною вище класифікацією при розтязі до шийкоутворення стадія зародження тріщин складається з двох стадій: стадії пластичного деформування, що викликає зростання коерцитивної сили, і стадії пороутворення – де має місце зниження значень H_c . Подальший розтяг до напружень рівних межі міцності металу пов'язане з не пластичним деформуванням, а з ростом кількості та розміру пор і тріщин. Дані припущення базуються на результатах випробувань аналогічних зразків на малоциклову втому (дані приведені нижче) де зміна напрямку кінетики та зниження значень коерцитивної сили пов'язана із утворенням і розвитком тріщин втоми.

Таким чином, знаючи кінетику коерцитивної сили H_c на зростаючих або спадаючих ділянках кривої можна оцінювати залишкову міцність металу при розтязі.

Результати експериментальних досліджень сталі AISI 304 при циклічному навантаженні. На рис. 5 приведено розподіл значень коерцитивної сили H_c по зовнішній поверхні робочої довжини зразка при циклічному знакозмінному деформуванні з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$ при положенні полюсів наконечників магнітів датчика вздовж зразка з труби. При циклічному знакозмінному деформуванні в процесі напрацювання на зовнішній поверхні робочої частини зразка з труби після 1600 циклів навантаження у верхній середній частині зразка з'явилися тріщини втоми. Поява тріщин втоми викликала суттєве зниження значень коерцитивної сили в зоні руйнування зразка, а в прилеглих до руйнування зонах при подальшому напрацюванні продовжувалось зростання значень H_c . Слід зазначити, що не наскрізні тріщини втоми зароджувалися і розвивалися тільки на зовнішній поверхні зразка, і були відсутні на його внутрішній поверхні.

На рис. 6 приведена кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження на зовнішній і внутрішній поверхні зразка в зоні руйнування при положенні полюсів наконечників магнітів датчика уздовж робочої довжини зразка. Поява тріщин втоми (втрати суцільності металу) викликала перелом і зміну напрямку кінетики коерцитивної сили по числу циклів напрацювання. Поява тріщин на зовнішній поверхні зразка призводить до зниження значень коерцитивної сили, в той час як на внутрішній поверхні, де тріщини втоми відсутні, має місце зростання H_c , але має місце деяка зміни в напрямку її кінетики. Зміна напрямку кінетики коерцитивної сили на внутрішній поверхні зразка, де тріщини втоми відсутні, дозволяє зробити припущення про можливість виявлення підповерхневих тріщин за допомогою структуро скопа. Отримані результати показали, що при циклічному знакозмінному деформуванні має місце зростання значень коерцитивної сили до моменту втрати суцільності матеріалу, після чого її значення знижуються при безперервному зростанні об'єму ферромагнітної фази (α -Fe). Аналогічна тенденція має місце і при розтязі. Таким чином, при циклічному знакозмінному деформуванні наявність перелому на кривій кінетики коерцитивної сили по числу циклів навантаження свідчить про стадійність процесів пошкодження: зростання значень коерцитивної сили відповідає пружно-пластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження значень H_c - стадії розвитку тріщин втоми, пов'язаної з втратою суцільності металу. При розтязі та циклічному деформуванні значення коерцитивної сили залежать від напрямку положення полюсів наконечників магнітів датчика відносно напрямку навантаження і використання коерцитиметра з датчиком Д4 (не глибокого намагнічування) для реальних конструкцій дозволяє визначати напрямок головних напружень, виявляти найбільш деформовані зони та появу тріщин втоми.

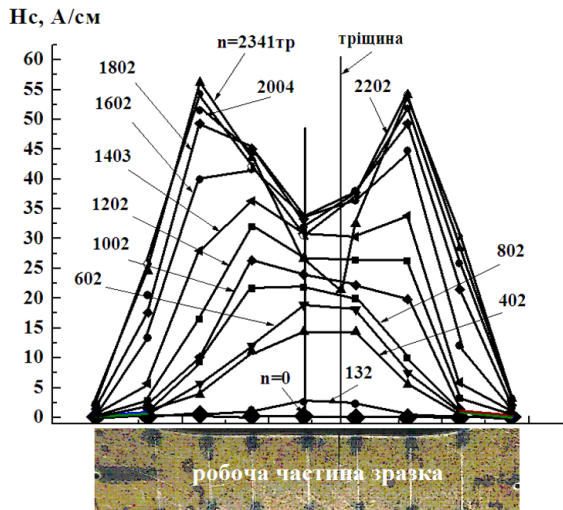


Рис. 5 Розподіл значень коерцитивної сили H_c по поверхні робочої довжини зразка при циклічному деформуванні з амплітудою пружно-пластичної деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$.

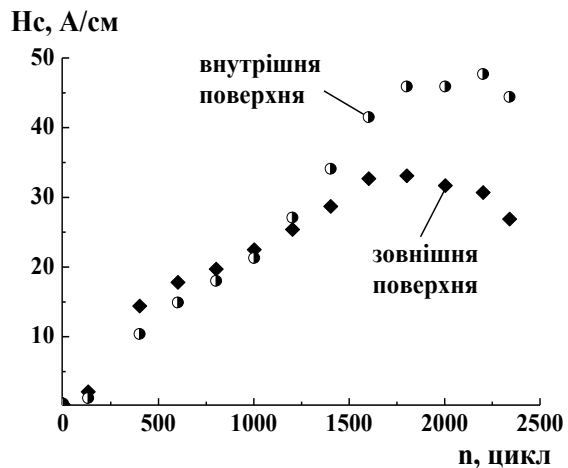


Рис. 6 Кінетика значень коерцитивної сили на зовнішній і внутрішній поверхнях зразка з труби в зоні руйнування при положенні полюсів наконечників магнітів датчика уздовж робочої довжини зразка при циклічному деформуванні з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$.

При циклічному навантаженні використання структуроскопа дозволяє отримувати необхідні дані для оцінки циклічної довговічності металу не по кривій втоми (руйнуванню), як прийнято в інженерній практиці, а по стадії зародження тріщин по кривій незворотньої пошкоджуваності (лінії Френча), що істотно знижує ризики руйнування.

Отримані експериментальні результати показали суттєві відмінності феромагнітної сталі 05кп та аустенітної (парамагнітної у вихідному стані) сталі AISI 304 у реагуванні на зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні та розвантаженні. При статичному та циклічному розтягуванні лабораторних зразків із сталей 05кп та AISI 304 максимальні значення коерцитивної сили відрізняються майже на порядок.

Використання структуроскопа дозволяє сепарувати накопичення пошкоджень при розтязі або циклічному знакозмінному деформуванні на стадію зародження тріщини, пов'язаної з пружно-пластичним деформуванням, і стадію розвитку тріщин, пов'язаної з втратою суцільності металу (включаючи пороутворення). В даний роботі не розглядали фізичну природу накопичених пошкоджень на стадії зародження та стадії розвитку тріщин. Для визначення фізичної природи накопичення пошкоджень передбачається проведення відповідних металографічних досліджень

Висновки.

1. Встановлені суттєві відмінності феромагнітної сталі 05кп та аустенітної (парамагнітної у вихідному стані) сталі AISI 304 в реагуванні на зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні та розвантаженні.
2. При розтязі або циклічному знакозмінному деформуванні по зміні кінетики коерцитивної сили можна оцінювати залишкову міцність металу.
3. Використання структуроскопа дозволило встановити стадійність процесів накопичення пошкоджень при статичному або циклічному навантаженні: зростання значень коерцитивної сили відповідає пружно-пластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження їх значень пов'язано з втратою суцільності металу при появі пор або тріщин (стадії розвитку тріщин).
4. Встановлення стадійності накопичення пошкоджень по кінетиці коерцитивної сили при випробуваннях на втому дозволяє вести оцінку циклічної довговічності не по кривій

втоми (руйнуванню) металу, як прийнято в інженерній практиці, а по стадії зародження тріщин, тобто по кривій незворотньої пошкоджуваності (лінії Френча), що істотно знижує ризику руйнування.

5. Показана можливість використання структуроскопа для виявлення найбільш деформованих зон, з встановленням напрямки головних напружень, та не суцільності металу у вигляді пор і тріщин втоми. За допомогою датчиків із зменшеною базою вимірювання коерцитивної сили надається можливість виявлення під поверхневих тріщин.

6. Отримані результати можуть стати основою для розробки нових підходів до експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простим неруйнівним методом.

Література.

1. Христенко И.Н. Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали [Текст] / И.Н. Христенко, В.В. Кривова // Дефектоскопия. – 1984, – № 6. – С.90.
2. Горкунов Э.С. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик [Текст] / Э.С. Горкунов, В.П. Федоров, А.Б. Бухвалов, И.Н. Веселов // Дефектоскопия. – 1997, – № 4. – С.87 – 95.
3. Попов В.А. Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений [Текст] / В.А. Попов, В.А. Гудошник // Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2012. — № 12. — С. 20–21.
4. Нехотящий В.А. Оценка деградации стали 08X18H9 по кинетике коэрцитивной силы [Текст] / В.А. Нехотящий, А.Л. Палиенко, А.П. Гопкало // В мире неразрушающего контроля. Санкт Петербург. 2015. Том. 18. с. 14 – 16.
5. Безлюдько Г.Я. Применение метода коэрцитивной силы сегодня [Текст] / Г.Я. Безлюдько, Б.Е. Попов, Р.Н. Соломаха // В мире неразрушающего контроля. Санкт Петербург. 2015. Том 18. № 4. с.4 – 8.
6. Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer J.R. Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue // Ser. Met.-1978.-12, N 2 –P. 129-131.
7. Sato Y., Sasaki H., Kumana A. Surface layer yielding of lowcarbon steel cylinders // J. Mater. Sci. Soc. Jap.- 1980.- 17, N ¾.- P. 185-192.
8. Иванова В.С. Природа усталости металлов [Текст] / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев //– М.: Металлургия, 1975. – 454 с.
9. Миллер К.Ж. Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее [Текст] / К.Ж. Миллер //Заводская лаборатория. – 1994. – № 3. – 544 с.
10. А.П. Гуляев // Металловедение. Москва. 1951, 484с..
11. Ботвина Л.Р. Общие закономерности процессов разрушения и кристаллизации [Текст] / Л.Р. Ботвина // МиТОМ .1994. – No 8. – С .2-6.
12. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов [Текст] / В.И. Владимиров // М .: Металлургия , 1984. – 280 с .
13. Терентьев В.Ф. Образование малых трещин при усталости. Итоги науки и техники [Текст] / В.Ф. Терентьев, И.В. Пойда // Металловедение и термическая обработка // Изд-во ВИНТИ, 1991. – Том 25. – С . 60-94.