

Вплив поверхневих дефектів та корозійного середовища на опір втоми сталі СТ17Г1С

Б. О. Грязнов, Ю. С. Налімов, В. Є. Рябцев, О. М. Герасимчук

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

Досліджується вплив поверхневого дефекту та корозійного середовища на характеристики опору втомі зразків зі сталі СТ17Г1С, яка широко використовується для виготовлення труб у нафтогазовій промисловості. Отримані результати дозволили оцінити ступінь зниження обмежених границь витривалості зразків зі сталі СТ17Г1С за наявності поверхневого дефекту та дії корозійного середовища.

Ключові слова: втома, корозійне середовище, поверхневий дефект.

Вступ. Відомо, що тріщина втоми переважно починає зароджуватися на поверхні деталі. Це пов'язано з тим, що саме на поверхні при згині та крученні мають місце максимальні циклічні напруження, конструкційно-технологічні концентратори напружень та різні експлуатаційні поверхневі дефекти (забоїни, корозійні виразки, сліди ерозії).

Метою дослідження є виявлення впливу на опір втоми поверхневого дефекту. У даному випадку дефектом служила спеціально нанесена мітка на робочу поверхню зразка зі сталі СТ17Г1С. Із цієї сталі виготовляють труби, що використовуються у нафтогазовій промисловості. Мітку наносили спеціальним електророзрядним пристроєм, і вона імітувала інформаційний напис, що має бути на кожній трубі в період її експлуатації. Труби нафтового сортаменту використовуються в умовах різного корозійного середовища, що призводить до корозійного пошкодження поверхні матеріалу труби, виникнення корозійних виразок та розтріскування металу під напруженням [1]. Тому окрім впливу поверхневого дефекту досліджували вплив корозійного середовища.

Методика досліджень. Дослідження на втому зразків (рис. 1), вирізаних із труб нафтового сортаменту із зовнішнім діаметром 120 мм зі сталі СТ17Г1С, проводили за методикою, що широко застосовується при випробуваннях на втому різних зразків та деталей машин на електродинамічних вібростендах [1].

Досліджували зразки з мітками та без міток на робочій поверхні в місці мінімального перетину. Мітки наносили із зовнішньої сторони труби.

За критерій граничного стану (руйнування) зразка приймали зниження резонансної частоти коливань на $\sim 3\%$, при цьому в зразку з'являлась макротріщина довжиною 3-4 мм. База випробувань для оцінки обмеженої границі витривалості складала $N = 10^7$ цикл [2].

У процесі випробувань на втому бінокулярним мікроскопом МБС2 контролювали розмах коливань вільного кінця зразка. Для установа зв'язку між розмахом коливань вільного кінця зразка та напруженнями в небезпечному перетині проводили динамічне тарування балки камертона за

допомогою тензодатчиків типу КФ5 з базою 3 мм. За результатами тарування камертона визначали залежність між відносною деформацією та сигналом від тензодатчика:

$$\varepsilon = \xi_k V, \quad (1)$$

де V – сигнал від тензодатчика (В), який визначається по вольтметру тензопідсилювача УТ-4; ξ_k – тарувальний коефіцієнт.

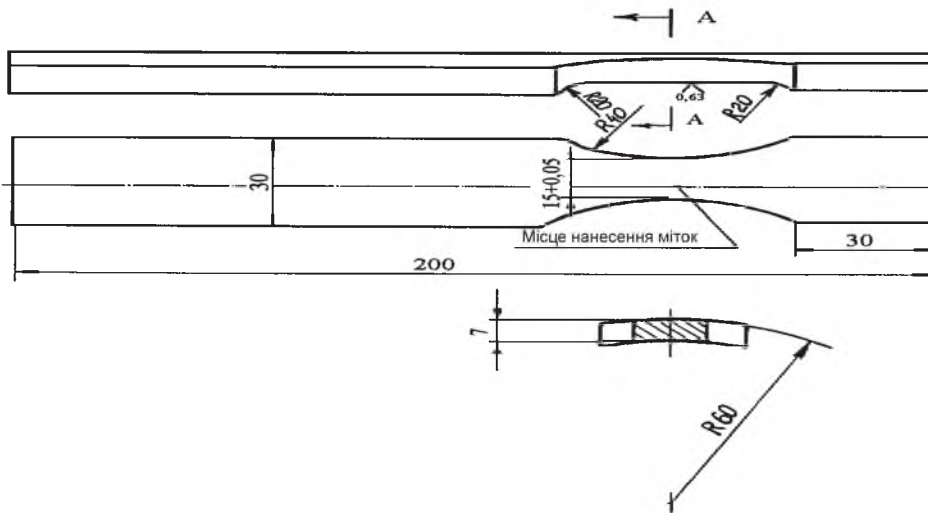


Рис. 1. Зразок для випробувань на втому.

Далі проводили динамічне тензотарування десяти зразків.

При рівних сигналах від тензодатчиків на зразках та камертоні приймали рівність їх деформацій, що дозволяло встановити відповідність між напруженням у контрольному перетині зразка σ_a та розмахом коливань кінця зразка 2λ (мм).

При перерахуванні деформації у напруження значення модуля пружності сталі було прийнято $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

У процесі випробувань на втому встановлювали розмах коливань вільного кінця зразка, що відповідав необхідному рівню амплітуд напружень. При цьому величина приведеної відносної похибки встановлення заданої амплітуди напружень складала $\pm 2\%$. Випробування на втому проводили на резонансній частоті ~ 150 Гц.

На рис. 2 наведено схему закріплення зразка на вібростенді ВЕДС-400А. Зразок закріплювали коротким кінцем у затискач до рухомої платформи вібратора. На опуклій поверхні робочої частини зразка у мінімальному його перетині (зовнішня поверхня труби) наклеювали тензодатчик. За допомогою мікроскопа вимірювали розмах коливань зразка.

Із посудини через фільтр по гнучкій трубці та через регулюючий затвор подавали корозійну рідину. Її краплі змочували тампон, яким була обгорнута робоча частина зразка. Надлишок корозійної рідини стікав у кювету.

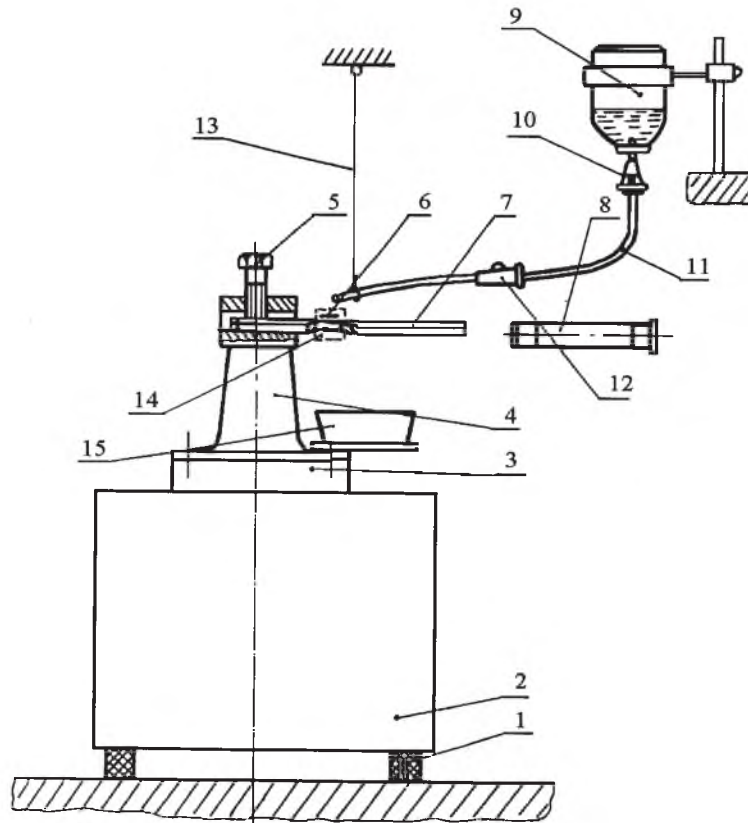


Рис. 2. Схема закріплення зразка: 1 – амортизаційні опори; 2 – електродинамічний вібростенд; 3 – рухома платформа вібростенда; 4 – затискач; 5 – болт; 6 – тензодатчик; 7 – зразок; 8 – мікроскоп; 9 – посудина з корозійною рідиною; 10 – фільтр; 11 – трубка; 12 – затвор; 13 – нитка підвішування трубки; 14 – тампон; 15 – кювета.

Попередні випробування показали, що тріщини від втоми розвиваються в основному на внутрішній поверхні труби тому, що вона, мабуть, більш дефектна. Із метою наведення залишкових напружень стиску та вилучення дефектного шару внутрішню поверхню робочої частини зразків фрезерували. Далі цю поверхню доводили до восьмого класу чистоти, після чого випадків появи тріщин практично не було, що дуже важливо, тому що мітки наносили на зовнішню поверхню зразка. Випробовували також зразки на втому, які певний час витримували у корозійному середовищі під статичним навантаженням розтягом.

Рис. 3 ілюструє схему навантажування таких зразків. Між двома зразками (А і В на рис. 3) встановлювали розпірну вставку. Потім за допомогою болтів стягували їх між собою доти, доки на поверхні не виникало напруження розтягу ~ 210 МПа, котре дорівнює приблизно 60% границі плинності матеріалу. Рівень напружень на поверхні зразка оцінювали тензодатчиком, який наклеювали на робочу поверхню одного із зразків. Скріплені таким чином зразки клали у поліетиленову ємність із корозійною рідиною (3%-ний розчин NaCl у воді), де витримували протягом двох місяців. Для визначення кривої втоми випробовували 8–10 зразків.

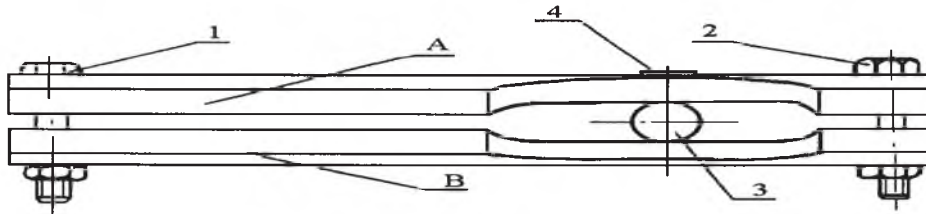


Рис. 3. Схема навантаження зразків: 1, 2 – стягуючі болти; 3 – розпірна вставка; 4 – тензодатчик.

Результати досліджень та їх аналіз. Вплив поверхневого дефекту на втому зразків, на робочу поверхню яких було нанесено мітку електро-розрядним пристроєм, досліджували в порівнянні з результатами випробувань групи зразків без мітки.

Випробування зразків на втому проводили за умов симетричного циклу навантаження та кімнатної температури. Результати випробувань на втому наведено на рис. 4. Обмежену границю витривалості визначали по рівню амплітуди напружень, за якої на базі випробувань не руйнувалося не менше двох зразків.

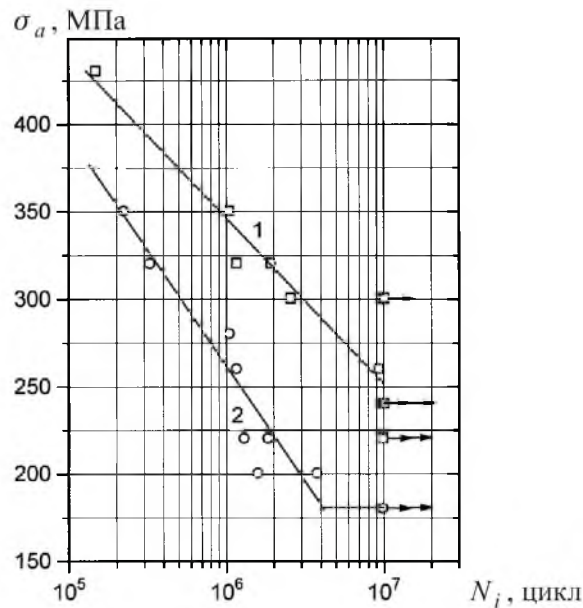


Рис. 4. Результати випробувань на втому зразків, вирізаних із труб із міткою (1) і без мітки (2).

За результатами випробувань побудовано криві втоми у напівлогарифмічних координатах. Експериментальні дані апроксимували рівнянням

$$\sigma_i = A - B \lg N_i, \quad (2)$$

де σ_i – амплітуда максимальних напружень циклу на i -му рівні; N_i – довговічність зразка при σ_i ; A, B – коефіцієнти.

Результати статистичної обробки даних випробувань на втому зразків за методикою [3] наведено в табл. 1.

Аналіз отриманих результатів випробувань (рис. 4 та табл. 1) свідчить, що розкид експериментальних точок незначний (коефіцієнти кореляції $r_{1/1} = -0,9837$ для зразків без мітки і $r_{1/1} = -0,9395$ для зразків із міткою, а границя витривалості σ_{-1} зразків із міткою на 25% нижча, ніж зразків без мітки).

Т а б л и ц я 1

Рівняння кривих втоми зразків, вирізаних із труб сталі СТ17Г1С

Тип зразка	Кількість зразків, шт.	σ_{-1} , МПа	$r_{1/1}$	$\sigma_i = A - B \lg N_i$		$S(\sigma_a \lg N)$
				A	B	
Без мітки	11	240	-0,9837	918,3	-95,5	11,49
Із міткою	10	180	-0,9395	1055,0	-132,9	20,91

Окрім того, зразки без мітки руйнувалися, як правило, з однією тріщиною втоми на поверхні, натомість на поверхні зразків із міткою утворювалися більш ніж дві тріщини від краю зразка, котрі сходилися в області мітки.

Металографічні дослідження виконували за допомогою приладу ПМТ-3 (вимірювання мікротвердості) та мікроскопа Neofot. Дослідження показали, що основна маса матеріалу має смугасту структуру (рис. 5,а), що сформована в процесі виготовлення труб. Зерна матеріалу витягнені в окружному напрямі. Міра витягненості зерен не менша 3–5. Мікротвердість матеріалу по всій його товщині (і в зоні мітки) знаходиться в межах 2,2...2,4 ГПа і лише на глибині до 15 мкм зі сторони мітки трохи вища (до 3...3,2 ГПа).

Нанесення мітки призвело до зміни структури шару матеріалу на глибину 0,8 мм, при цьому в ньому повністю відсутня смугаста структура (рис. 5,б). Спостерігається збільшення зерен у порівнянні з основним матеріалом приблизно в 1,8–2 рази. Цей шар практично не містить вуглецю, котрий, очевидно, замінено воднем та киснем. Добре ідентифікується знеуглецьований шар, що поширюється на глибину до 120–150 мкм. На глибині близько 200 мкм проявляється надлишок вуглецю, котрий був туди витиснений при нанесенні мітки.

Вплив корозійного середовища на втому сталі СТ17Г1С досліджували: на зразках без мітки; на зразках без мітки, які витримували два місяці в корозійній рідині під навантаженням; на зразках із міткою і на зразках із міткою, витриманих два місяці в корозійній рідині під навантаженням.

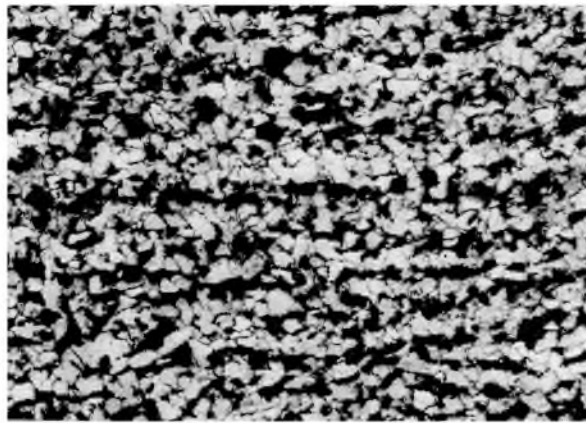
Результати випробувань на втому зразків, вирізаних із труб нафтового сортаменту, з урахуванням дії корозійного середовища представлено на рис. 6. Дані статистичної обробки випробувань на втому цих зразків наведено в табл. 2.

Аналіз результатів досліджень зразків у корозійному середовищі показав, що вони мало відрізняються від результатів досліджень у повітрі як за розкидом точок (про це свідчить коефіцієнт кореляції $r_{1/1}$), так і за величиною границі витривалості для зразків без мітки.

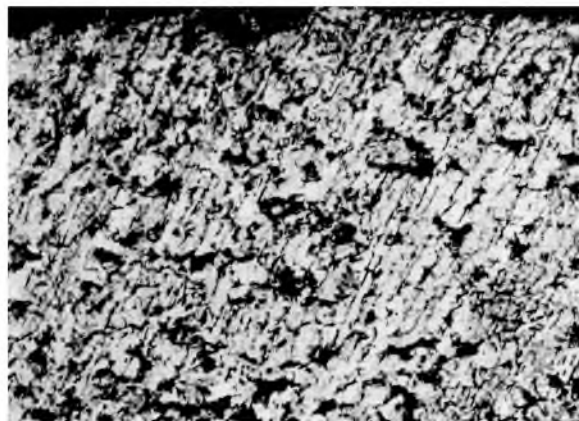
Т а б л и ц я 2

Рівняння кривих втоми зразків зі сталі СТ17Г1С,
досліджених у корозійному середовищі

Тип зразка	Кількість зразків, шт.	$r_{1/1}$	$\sigma_i = A - B \lg N_i$		$S(\sigma_a \lg N)$	$\sigma_{-1}^{\text{розр}}$, МПа (на базі 10^7 цикл)
			A	B		
Без мітки	8	-0,9262	1174,9	-132,70	18,83	246,0
Без мітки (витримано в корозійній рідині)	5	-0,9796	952,9	-102,00	8,089	238,9
Із міткою	6	-0,9820	1103,0	-139,13	15,377	127,9
Із міткою (витримано в корозійній рідині)	5	-0,8940	1131,6	-139,40	26,983	155,8



a



б

Рис. 5. Мікроструктура вирізаного з труби зразка після випробувань на втому: *a* – основний матеріал, $\times 320$; *б* – поверхневий шар матеріалу в місці нанесення мітки, $\times 500$.

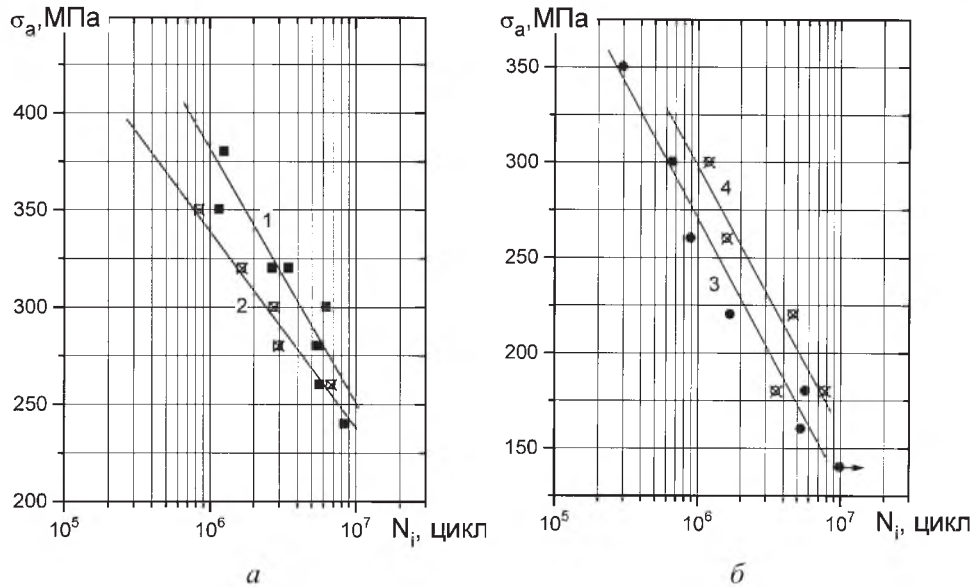


Рис. 6. Результати випробувань на втому зразків, вирізаних із труб: 1 – без мітки, випробування у корозійному середовищі; 2 – без мітки, попередньо витримані у корозійній рідині під напруженням, випробування у корозійному середовищі; 3 – із міткою, випробування у корозійному середовищі; 4 – із міткою, попередньо витримані у корозійній рідині під напруженням, випробування у корозійному середовищі.

За випробувань зразків із міткою на великій базі ($\sim 10^7$ цикл) має місце вплив корозійного середовища. Так, для цих зразків за випробувань у повітрі границя витривалості на базі 10^7 цикл $\sigma_{-1} = 180$ МПа, за випробувань у корозійному середовищі $\sigma_{-1}^{\text{розр}} = 128 \dots 155$ МПа.

Окрім цього, було проведено ще один експеримент із метою визначення впливу корозійного середовища на втому зразків без мітки. Це пов'язано з тим, що при витримці зразків у корозійній рідині впродовж двох місяців під напруженням для їх стягнення було використано оцинковані болти, що могли стати протекторним захистом при кородуванні. Відомо, що для захисту металу від впливу корозії часто використовують протекторний захист [4]. Так, в суднобудуванні – це магнієві, алюмінієві або цинкові протектори [5]. Тому для коректнішого експерименту нову партію зразків без міток витримували у корозійній рідині впродовж двох місяців під напруженням, але у цьому випадку для їх стягнення використовували сталеві болти без цинкового покриття. Було проведено випробування на втому цієї групи зразків у корозійному середовищі. Результати статистичної обробки даних випробувань представлено на рис. 7 та у табл. 3.

Для порівняння на рис. 7 наведено результати випробувань та крива втоми 1 зразків із протекторним захистом, що зазнали впливу корозії. Можна відмітити стале зниження циклічної міцності зразків без протекторного захисту, що підтверджує як розташування кривої втоми 2, так і зменшення величини границі витривалості майже на 11%.

Т а б л и ц я 3

Рівняння кривої втоми зразків зі сталі СТ17Г1С, досліджених у корозійному середовищі

Тип зразка	Кількість зразків, шт.	$r_{1/1}$	$\sigma_i = A - B \lg N_i$,		$S(\sigma_a \lg N)$	σ_{-1} , МПа (на базі 10^7 цикл)
			A	B		
Без мітки (витримано у корозійній рідині без протекторного захисту)	7	-0,8668	938,9	-103,7	21,58	$\frac{200,0}{212,8}$

Примітка. Над рискою наведено дані експерименту, під рискою – розрахункові.

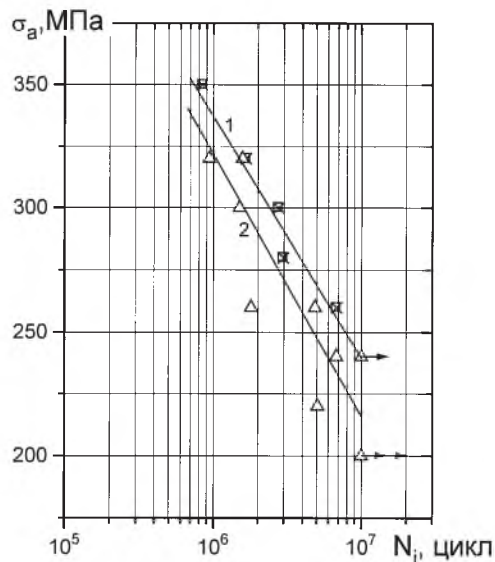


Рис. 7. Результати випробувань на втому зразків, вирізаних із труб: 1 – без мітки, попередньо витримані у корозійній рідині під напруженням із протекторним захистом, випробування у корозійному середовищі; 2 – без мітки, попередньо витримані у корозійній рідині під напруженням без протекторного захисту, випробування у корозійному середовищі.

Висновки

1. Наведена мітка змінює поверхневий шар матеріалу, що призводить до зменшення величини границі витривалості зразків зі сталі СТ17Г1С на 25%.

2. Вплив корозійного середовища несуттєво впливає на характеристики опору втомі як зразків без міток, так і з мітками. Лише при випробуваннях на великих базах ($\sim 10^7$ цикл) зразки з мітками зумовлюють зниження границі витривалості на 15...29%.

3. Відсутність протекторного захисту за витримки зразків без міток у корозійній рідині впродовж двох місяців під напруженням викликає стале зниження циклічної міцності зразків, що підтверджується зменшенням величини границі витривалості на 11%.

Резюме

Исследуется влияние поверхностного дефекта и коррозионной среды на характеристики сопротивления усталости образцов из стали СТ17Г1С, которая широко используется для труб в нефтегазовой промышленности. Полученные результаты позволили оценить степень снижения ограниченных пределов выносливости образцов из стали СТ17Г1С при наличии поверхностного дефекта и действии коррозионной среды.

1. *Грязнов Б. А., Городецкий С. С., Налимов Ю. С. и др.* Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД. – Киев: Наук. думка, 1992. – 262 с.
2. *ГОСТ 25.502–79.* Методы механических испытаний металлов. – Введ. 01.01.81.
3. *Закс Л.* Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 600 с.
4. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В.* Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1987. – 254 с.
5. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Торгов В. Н.* Влияние протекторной защиты на циклическую прочность и трещиностойкость нержавеющей сталей и сплава ВТЗ-1 в коррозионной среде // Пробл. прочности. – 1981. – № 6. – С. 7 – 11.

Поступила 01. 03. 2006