

УДК 620.192.7

**В. Гуцайлюк, канд. техн. наук; І. Окіпний; О. Ясній***Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО КОМБІНОВАНОГО РОЗТЯГУ НА НАПРУЖЕННЯ СКОЛЮВАННЯ

*Досліджено вплив попереднього деформування комбінованим розтягом на напруження сколювання сталі 15Х2МФА після термообробки, яка моделює радіаційне окрихчення матеріалу корпусу реактора типу ВВЕР-440 під кінець терміну експлуатації.*

Відомо, що попереднє пружнопластичне деформування (ППД) змінює не тільки характеристики механічних властивостей матеріалів, а й істотно впливає на опір крихкому руйнуванню [1, 2], ударну в'язкість [3], температуру в'язко-крихкого переходу [4]. В'язкість руйнування в умовах статичного навантаження після ППД може збільшуватись, зменшуватись, змінюватись нелінійно у залежності від температури, амплітуди попереднього пружнопластичного деформування та інше.

Оскільки опір крихкому руйнуванню в залежності від ППД і температури описують за допомогою локальних критеріїв руйнування, то у якості такого критерію можна використати напруження сколювання  $\sigma_{ск}$ , яке визначають за результатами випробування циліндричних зразків.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що ППД може збільшувати або зменшувати напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  в залежності від виду навантаження (квазістатичне, циклічне) і способу деформування (розтяг, стиск) [5-7].

Однак не достатньо висвітлене питання впливу на напруження сколювання попереднього деформування, яке поєднує статичну та циклічну складову.

Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів попереднього деформування комбінованим розтягом (температури та амплітуд) на напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  корпусної теплостійкої сталі.

### Методика дослідження

Характеристики механічних властивостей та напруження сколювання визначали за одновісного розтягу гладких циліндричних зразків двох типорозмірів: діаметром робочої ділянки 8мм та довжиною робочої частини 20 мм та 5 мм і 10 мм відповідно.

Випробування проводили на сервогідролінійній випробувальній машині СТМ-100 виробництва АНТК імені О.К. Антонова (м. Київ), з керуванням від персонального комп'ютера типу ІВМ РС/АТ.

Зразки попередньо деформували комбінованим розтягом (розтяг з накладанням циклічної складової) до рівня пластичної деформації  $\epsilon_{pr} = 0,5\%$ ;  $1,0\%$  та  $3,0\%$  в діапазоні температур 423...623К.

Зразок нагрівали до заданої температури за допомогою електropечі, нагрівання якої регулювалося за допомогою стандартного високоточного регулятора температури типу ВРТ-2. Температура нагрівання зразка контролювалась хромель-алюмелевою термопарою, яка приварювалась до зразка. Похибка вимірювання та підтримання температури зразка не перевищувала  $\pm 1$ К.

Для винесення тензометричного давача з зони дії високої температури була реалізована вимірювальна схема, яка подана на рис. 1.

Схеми навантажування зразків подані на рис.2. Деформацію вимірювали тензометричним давачем, робочі елементи якого увімкнено за мостовою схемою. Похибка вимірювання деформації не перевищувала  $4 \cdot 10^{-5}$  мм/мм. Розмах циклічної складової напруження при комбінованому розтязі складав  $\Delta\sigma = 50, 90, 110, 180$  і  $220$  МПа, частота навантаження  $f=25$  Гц, де  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{max} - \Delta\sigma_{min}$ ;  $\Delta\sigma_{max}$  і  $\Delta\sigma_{min}$  – найбільше і найменше напруження циклу.

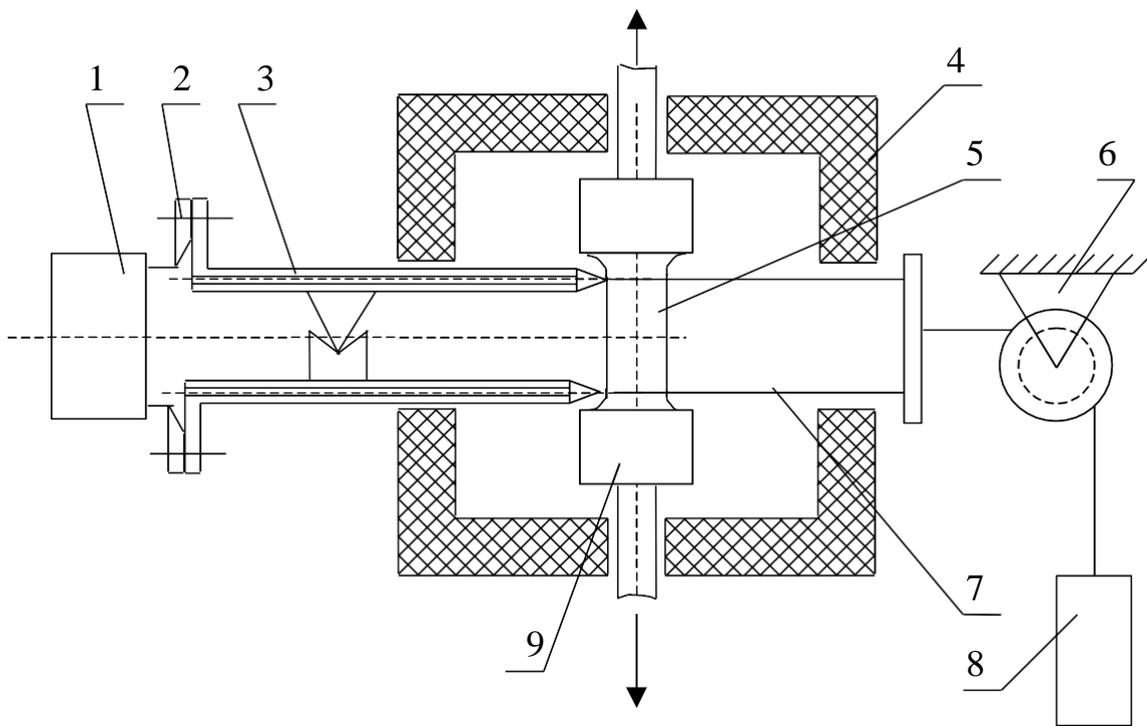


Рис. 1. Схема вимірювання деформації при ППД у діапазоні температур 423...623К.  
1 – тензодавач, 2 – ніж, 3 – подовжувач, 4 – піч, 5 – зразок, 6 – блок, 7 – трос, 8 – вантаж, 9 – захоплювач

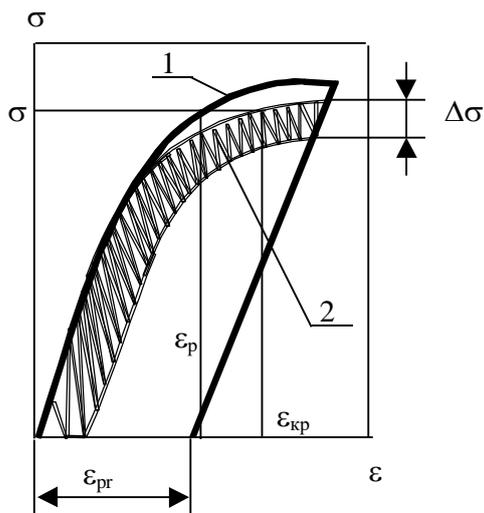


Рис. 2. Схеми навантажування.  
1 – розтяг, 2 – комбінований розтяг (розтяг з накладанням циклічної складової)

Зусилля  $P$  та поздовжню деформацію дискретно реєстрували через 55 мсек, загальна кількість точок вимірювання задавалась до початку експерименту. Результати досліджень записувалися на магнітоносій і оброблялись у математичній оболонці MathCad. Паралельно для візуального контролю здійснювався запис діаграми на двохкоординатний самописець в координатах "зусилля - поздовжня деформація".

Напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  деформованого матеріалу визначали при температурі 77К у термоізолюваній камері, заповненій рідким азотом.

Зразок встановлювався у захоплювач, один з яких (верхній) через кульовий шарнір з'єднаний з динамометром, а інший нерухомо закріплений на дні камери, яка таким чином кріпилась до рухомого штока.

Під час випробувань реєстрували зусилля  $P$  та переміщення штока  $S$  на магнітоносій та виводилось на двохкоординатний самозаписувальний потенціометр. При визначенні  $\sigma_{ск}$  діаграма зусилля – переміщення штока у всіх випадках була лінійною. Поперечна залишкова макроскопічна деформація після руйнування зразків

була відсутня. Коректними вважались результати випробувань, отримані на тих зразках, крихке руйнування яких відбувалось у межах робочої ділянки зразка.

Напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  визначали за формулою:

$$\sigma_{ск} = P_K / S_K,$$

де  $P_K$  - зусилля руйнування;

$S_K = \pi \cdot d^2 / 4$  - площа поперечного перерізу зразка після руйнування;

$D$  - діаметр зразка після руйнування.

### Результати дослідження та їх обговорення

Хімічний склад і режими термообробки сталі 15Х2МФА наведені у праці [8].

Характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА в діапазоні температур 77...623 К [8] подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА

T, К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
77	1440	1590	3,10	2,90
293	1100	1160	16,6	67,2
423	956	1020	15,6	65,8
623	880	970	15,2	65,2

Параметри попереднього пластичного деформування та напруження сколювання приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри попереднього пластичного деформування та напруження сколювання сталі 15Х2МФА

№ з/п	Температура, К	$\varepsilon_{пр}$ , %	$\Delta\sigma$ , МПа	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_{ск}$ , МПа
1	623	1,0	-	1019	1746
2	623	1,0	110	956,3	1618
3	623	0,5	-	936,8	1701
4	623	0,5	110	948,5	1504
5	423	1,0	-	1107	1706
6	423	0,5	-	1040	1680
7	423	1,0	90,0	1016	1565
8	423	0,5	90,0	1031	1602
9	623	3	-	1048	1789
10	623	3	110	1081	1686
11	423	3	90,0	1062	1725
12	77	-	-	-	1632
13	623	1	220	1124	1712
14	423	1	180	1126	1676
15	423	1	50,0	1150	1672

На рис. 3 представлено фотографії зламів циліндричних зразків, які попередньо деформували розтягом і комбінованим розтягом до 1,0 % при 623 К.

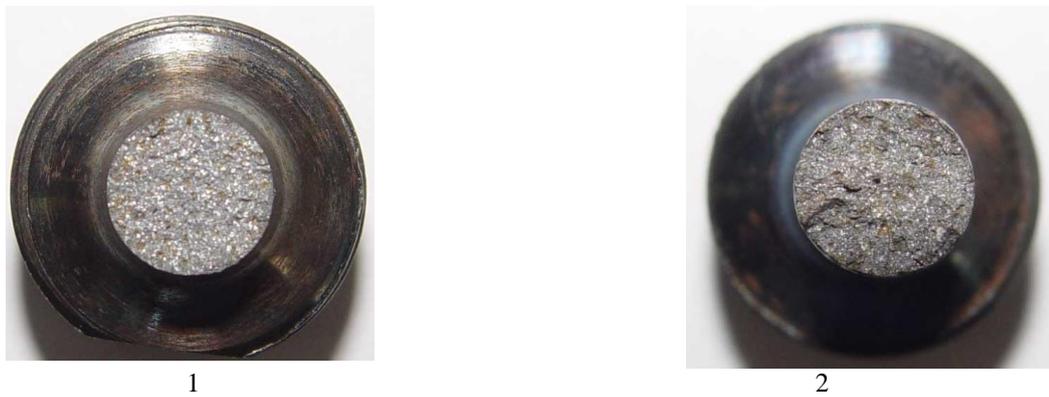


Рис. 3. Злами зразків після попереднього деформування розтягом (1) і комбінованим розтягом (2)

Залежність напруження сколювання від рівня попередньої пластичної деформації наведено в рис. 4.

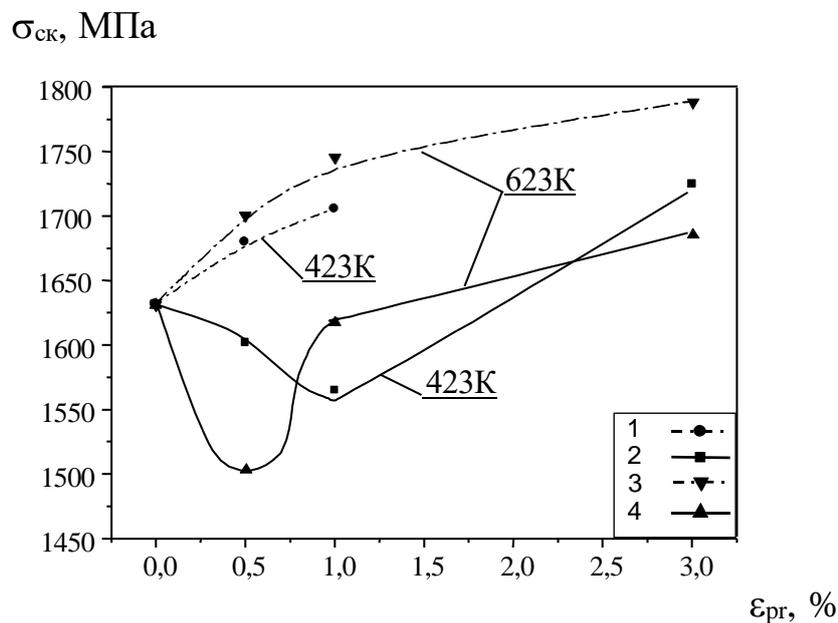


Рис. 4. Залежність напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  сталі 15X2MФА від попередньої пластичної деформації розтягом (1, 3) і комбінованим розтягом (2, 4) при 423 К (1, 2) і 623 К (3, 4) і  $\Delta\sigma = 90,0$  МПа (2),  $\Delta\sigma = 110$  МПа (4)

З рис. 4 випливає, що попереднє пластичне деформування розтягом при температурі 423К...623К збільшує напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  сталі 15X2MФА у порівнянні з первісним матеріалом. Треба зазначити, що більш істотне збільшення напруження сколювання спостерігається після деформування при температурі 623К. Проте вплив попереднього комбінованого навантаження при температурі 423К і 623К на напруження сколювання залежить від величини пластичної деформації. При деформуванні комбінованим розтягом до  $\epsilon_{пр}=0,5$  % (623К) і 1,0 % (423К) напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  зменшується у порівнянні з недеформованим матеріалом. Мінімальне значення  $\sigma_{ск}$  досягає у точках, де  $\epsilon_{пр}=0,5\%$ ;  $T=623\text{К}$  та  $\epsilon_{пр}=1,0\%$ ;  $T=423\text{К}$  (рис. 4). При збільшенні попередньої деформації комбінованим розтягом до 3,0 % напруження сколювання зростає для обох температур.

Залежність напруження сколювання від розмаху циклічної складової напруження  $\Delta\sigma$  під час попереднього комбінованого розтягу наведена на рис. 5.

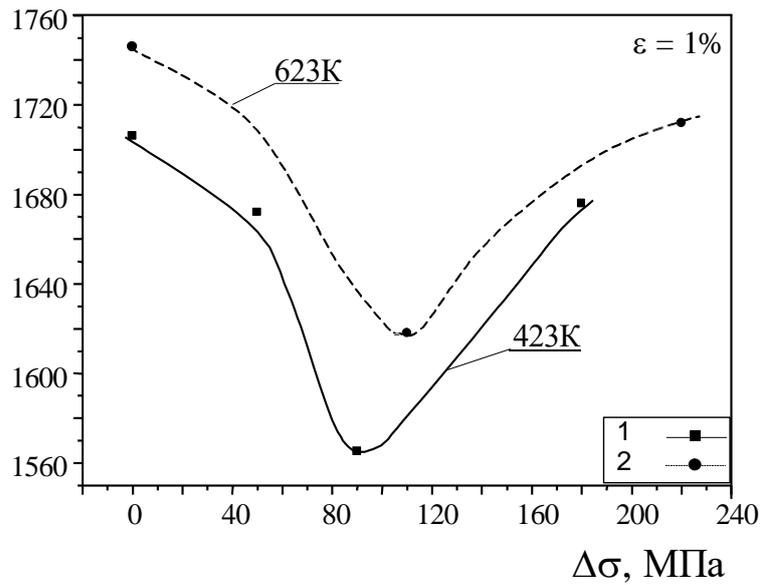
$\sigma_{ск}$ , МПа

Рис. 5. Залежність напруження сколювання від розмаху напруження попереднього пластичного деформування до  $\varepsilon_{пр} = 1,0\%$  при 423К (1) і 623К (2)

Збільшення розмаху напруження до 90,0 МПа і 110 МПа відповідно при температурі 423К і 623К зменшує на 8...10 % напруження сколювання порівняно з недеформованим матеріалом. Подальше зростання  $\Delta\sigma$  до 180 МПа і 220 МПа відповідно при 423К і 623К збільшує  $\sigma_{ск}$ , однак воно залишається меншим у порівнянні з  $\sigma_{ск}$  недеформованого матеріалу.

На рис. 6 показана залежність  $\sigma_{0,2}$  від розмаху напружень при 623 і 423К. Виявлено зменшення умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  із зростанням розмаху напружень  $\Delta\sigma$  при комбінованому розтязі за температури попереднього пластичного деформування 623К (1) і 423К (2). Треба зазначити, що із збільшенням температури ППД границя текучості  $\sigma_{0,2}$  сталі 15Х2МФА зменшується.

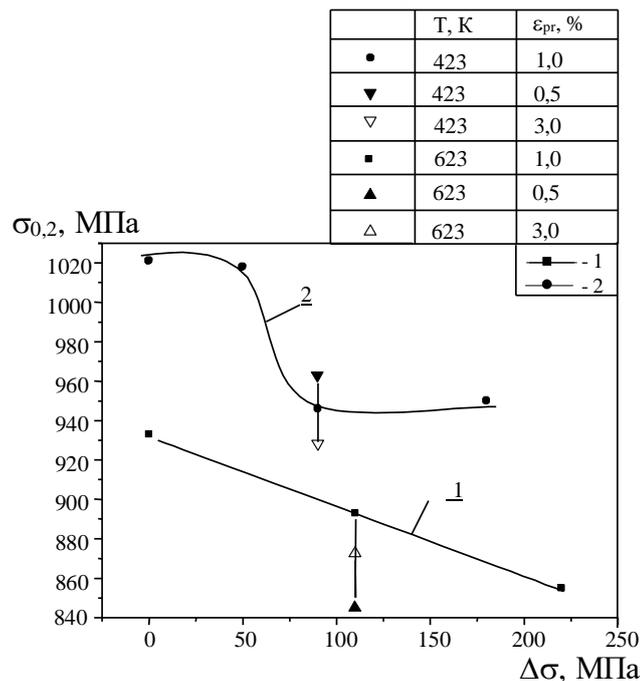


Рис. 6. Залежність  $\sigma_{0,2}$  від розмаху напружень при температурі попереднього деформування 623К (1) і 423К (2)

Для опису процесу інтенсифікації пластичної деформації за комбінованого розтягу нами запропоновано параметр  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon / \epsilon_p$ , тут  $\Delta\epsilon = \epsilon_{кр} - \epsilon_p$ ,  $\epsilon_{кр}$  і  $\epsilon_p$  – пружнопластична деформація відповідно при деформації комбінованим розтягом і розтягом при рівних напруженнях (рис. 2).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що комбінований розтяг істотно збільшує пластичну деформацію  $\Delta\epsilon$  за однакових напружень (рис. 7а). Причому більш істотне зростання  $\Delta\epsilon$  під дією комбінованого навантаження спостерігається при температурі 623К порівняно із 423К.

Із збільшенням напруження комбінованим ППД параметр  $\Delta\epsilon$  зростає як при  $T = 623\text{K}$  (2), так і при  $T = 423\text{K}$  (1) (рис. 7б).

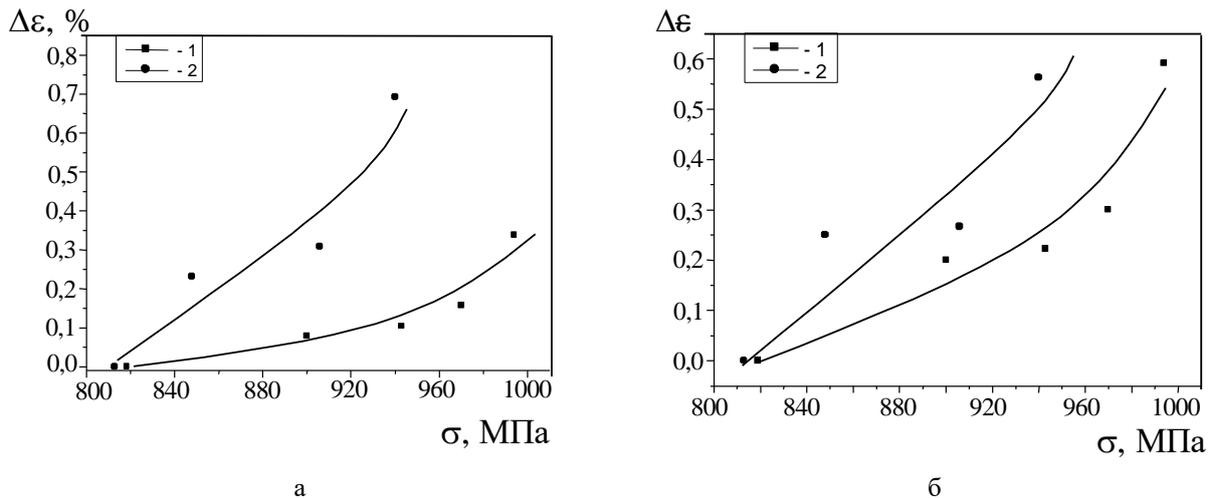


Рис. 7. Залежність  $\Delta\epsilon$  (а) і  $\Delta\epsilon$  (б) від напруження комбінованого ППД при  $T = 423\text{K}$ ,  $\epsilon_{pr} = 1,0\%$  (1) та при  $T = 623\text{K}$ ,  $\epsilon_{pr} = 3,0\%$  (2)

### Висновки

1. Попередня пластична деформація розтягом при 423К і 623К збільшує напруження сколювання сталі 15Х2МФА порівняно з недеформованим матеріалом. Проте характер впливу попереднього комбінованого розтягу на напруження сколювання залежить від рівня пластичної деформації. При комбінованому розтязі до  $\epsilon_{pr} = 1,0\%$  при  $T = 423\text{K}$  та  $0,5\%$  при  $T = 623\text{K}$  напруження сколювання зменшується порівняно з первісним матеріалом. Подальше збільшення ППД приводить до зростання  $\sigma_{ск}$  у порівнянні з первісним матеріалом, але у всіх випадках напруження сколювання при комбінованому розтязі залишається меншим, ніж після попереднього деформування розтягом.
2. Як в умовах попереднього розтягу, так і комбінованого розтягу більше зростання напруження сколювання спостерігається після деформування при температурі 623К в порівнянні з 423К. Збільшення розмаху напружень до  $\Delta\sigma = 90,0 \dots 110$  МПа зменшує на  $8 \dots 10\%$  напруження сколювання сталі 15Х2МФА порівняно з недеформованим матеріалом. Подальше збільшення розмаху до  $\Delta\sigma = 180$  (220) МПа при температурі 423 (623)К збільшує  $\sigma_{ск}$ .
3. При зростанні напруження ППД при температурі 423К та 623К різниця між пластичною деформацією при комбінованому розтязі і розтязі збільшується до  $0,3\%$  і  $0,7\%$  відповідно.

*The influence of preliminary combined tensile deformation on cleavage stress of steel 15Ch2MFA in a condition which simulates radiating embrittle of a material of the case reactor such as WWER-440 by the end of the reactor vessel operating life is investigated.*

*Робота виконана за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень по темі Ф7/348-2001.*

**Література**

1. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Синявский Д.П. и др. Влияние истории деформирования и асимметрии цикла нагружения на характеристики циклической вязкости разрушения сплава ВТ9//Пробл. прочности. – 1982. - №12.-С.3-6.
2. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Синявский Д.П. и др. Влияние истории деформирования на характеристики циклической вязкости разрушения сплава ВТ9//Пробл. прочности. – 1982. - №4.- С.28-32.
3. Paris P.C., Gomez M.P., Anderson W.E. A ration analytic theory of fatigue// The Trend in Engineering the University of Washington.- 1961.- 13, № 1 – P.9-14.
4. Трощенко В.Т., Покровский В.В. Влияние цикличности нагружения на характеристики трещиностойкости сталей. Сообщ. 2//Пробл. прочности .– 1980. - №12. – С.14-17.
5. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
6. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Каплуненко В.Г. Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщение 1. Результаты экспериментальных исследований//Пробл. прочности. – 1997. - №1.-С.5 – 20.
7. Roman I., Ono Kanji. Model for fracture toughness alteration due to cyclic loading//Int. J. of Fract. – 1982. – №19.- P.67-80.
8. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.

*Одержано 02.09.2004 р.*