

УДК 620.187.3

В.Б. Гладь, зав. лаб.

В.Б. Гуцайлюк, к.т.н.

П.В. Ясній, д.т.н.

Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя

**МІКРОМЕХАНІЗМИ ВТОМНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTІ СТАЛІ 15X2МФА**

*Досліджено мікромеханізми утворення мікротріщин і пор в сталі 15X2МФА в умовах циклічного пружно-пластичного деформування. Виявлено, що мікротріщини в об'ємі матеріалу утворюються в основному вздовж смугової дислокаційної структури всередині зерен, а також по границях структурних елементів, де є включення дисперсних фаз. Накопичення втомної пошкоджуваності і збільшення густини дислокацій в малокуткових границях після попереднього циклічного пружно-пластичного деформування призводить до зменшення напруження сколювання.*

Відомо, що втомні пошкодження і тріщини починаються на вільній поверхні внаслідок специфіки поверхневого шару матеріалу [1]. Виділено три типи зародження втомних тріщин: тріщини зароджуються в смугах ковзання; зародження тріщин пов'язане з границями структурних елементів; тріщиноутворення обумовлене включеннями, частинками другої фази.

В умовах малоциклової втоми, коли кожен цикл навантаження супроводжується значною пластичною деформацією, втомне пошкодження виникає в усьому об'ємі матеріалу [2].

Фрактографічні дослідження зламів зразків із сталі 15X2МФА, після попереднього циклічного пружно-пластичного деформування, при температурі 77 К виявили, що з ростом амплітуди деформації зменшується кількість ямок та зростає крихка складова руйнування [3]. Також з ростом амплітуди пружно-пластичної деформації характер механізму руйнування змінюється від внутрішньозернового до міжзернового. Причому, із збільшенням відносного напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  зменшується [3]. Інші дослідження сталі 15X2МФА [4] вказують на зростання напруження сколювання із збільшенням відносного напруження зразків. Автори пояснюють зростання напруження сколювання формуванням коміркової дислокаційної структури, зменшенням розміру комірок із збільшенням відносного напруження і підвищенням напруження, необхідного для поширення тріщини через границі коміркової структури. Таким чином, мікроструктурні особливості матеріалу після циклічного пружно-пластичного деформування істотно впливають на його механічні характеристики.

Метою даної роботи є дослідження засобами електронної просвічувальної мікроскопії впливу циклічного пружно-пластичного деформування на мікромеханізми втомної пошкоджуваності сталі 15X2МФА.

**Матеріали і методика досліджень**

Досліджували методом електронної просвічувальної мікроскопії мікроструктуру зразків із сталі 15X2МФА після випробування на циклічне пружно-пластичне деформування, а також первісного стану матеріалу.

Сталь 15X2МФА досліджували після термічної обробки, що моделює радіаційне окрихлення матеріалу під дією нейтронного опромінення на кінець терміну експлуатації корпусу атомного реактора ВВЕР-440. Для випробувань використовували гладкі циліндричні зразки з діаметром робочої ділянки 5 мм. Характеристики механічних властивостей сталі 15X2МФА:  $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа;  $\sigma_e = 1160$  МПа;  $\delta = 16,6$  %;  $\Psi = 67,2$  %.

Циклічне пружно-пластичне деформування проводили на електрогідравлічній машині СТМ-100 при температурі 293 К в режимі жорсткого навантажування за коефіцієнта асиметрії циклу

$$R = \frac{\epsilon_{\min}}{\epsilon_{\max}} = -1 \quad (\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max} - \text{найменша і найбільша пружно-пластична деформація циклу) з$$

частотою 0,25 Гц. Амплітуда пружно-пластичної деформації  $\epsilon_a$  складала 0,46 %; 0,6 %; 0,8 % [3]. Кількість циклів навантаження  $N = 325, 650, 975$  циклів для  $\epsilon_a = 0,46$  %;  $N = 175, 290, 525$  циклів для  $\epsilon_a = 0,6$  %;  $N = 50, 110, 150$  циклів для  $\epsilon_a = 0,8$  %. Також для зразків первісного стану матеріалу і після попереднього циклічного пружно-пластичного деформування визначали напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  при температурі 77 К [3].

Об'єкти для мікроструктурного дослідження методом тонких фольг в електронному просвічувальному мікроскопі ПЕМ-125К вирізали у поздовжньому напрямку зразків на відстані 1 мм від циліндричної поверхні. Остаточного стоншення об'єктів досягали методом струминого електролітичного подірування фольги в електроліті, що складається з 10 %  $\text{HClO}_4$  + 90 %  $\text{CH}_3\text{COOH}$  при напрузі 140 В і струмі 90 мА.

### Результати досліджень

Первісний стан сталі 15Х2МФА, що моделює радіаційне окрихлення матеріалу під дією нейтронного опромінення, характеризується одномірною смуговою дислокаційною структурою, яка представляє собою систему паралельних дислокаційних субграниць. Напрямок субграниць смугової дислокаційної структури відповідає напрямкам перлітних колоній зерен. В матеріалі первісного стану густина дислокацій в малокутових границях, яку розраховували на основі аналізу мікродифракційних картин, складає  $0,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Електронно-мікроскопічні дослідження зразків після циклічного пружно-пластичного деформування виявили, що дислокаційна картина зберігає переважно одномірну смугову дислокаційну структуру. В той же час спостерігається зменшення відстані між паралельними дислокаційними субграницями, а також збільшення кута їх розорієнтації порівняно з первісним станом матеріалу.

За аналізом мікродифракційних картин розраховано зміну густини дислокацій в малокутових границях в умовах циклічного пружно-пластичного деформування зразків із сталі 15Х2МФА. Залежність густини дислокацій в малокутових границях від кількості циклів навантажування для досліджуваних значень амплітуди пружно-пластичної деформації  $\epsilon_n$  подано на рис. 1. В умовах циклічного пружно-пластичного деформування із збільшенням кількості циклів і амплітуди деформації зростає густина дислокацій в малокутових границях.

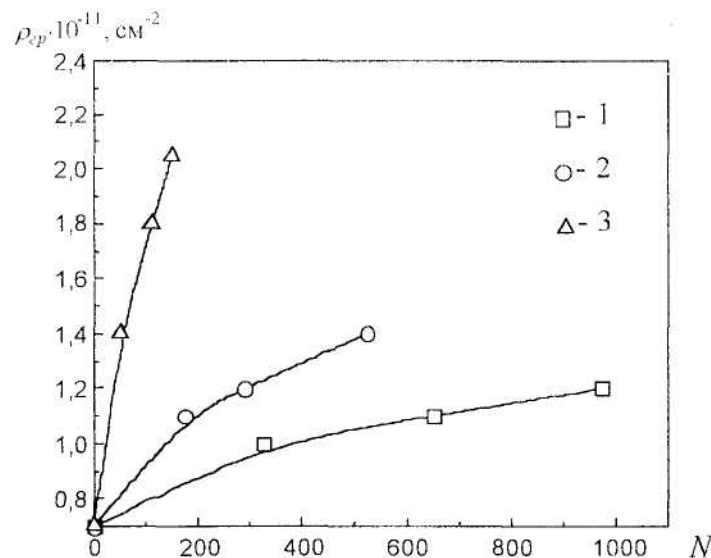


Рис. 1. Залежність густини дислокацій в малокутових границях сталі 15Х2МФА від кількості циклів пружно-пластичного деформування:  
1 -  $\epsilon_n = 0,46\%$ ; 2 -  $\epsilon_n = 0,6\%$ ; 3 -  $\epsilon_n = 0,8\%$

Основна відмінність структури циклічної пружно-пластичної деформованої сталі 15Х2МФА порівняно з первісним станом – це присутність мікротріщин і пор в об'ємі матеріалу. Із зростанням кількості циклів і амплітуди деформації кількість мікротріщин і їх довжина зростає. Таким чином, в об'ємі матеріалу накопичується втомне пошкодження.

Зародження мікротріщин є колективним ефектом в дислокаційних структурах, перебудовою їх з перегоренням накопиченої в них енергії в поверхневу енергію мікротріщини [5]. Отже, утворення мікротріщин незалежно від механізму їх зародження є результатом еволюції дислокаційної структури матеріалу.

На основі проведених досліджень виявлено п'ять основних механізмів утворення мікротріщин і пор у сталі 15Х2МФА в умовах циклічного пружно-пластичного деформування:

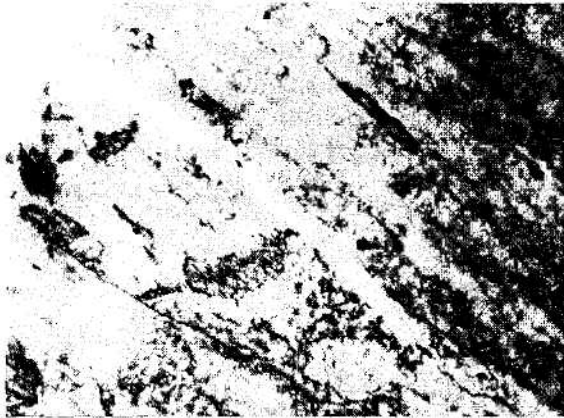
1. Утворення мікротріщин вздовж смугової дислокаційної структури (паралельно дислокаційним субграницям, або паралельно напрямкам перлітних колоній) – рис. 2,а, в, з.

2. Утворення мікротріщин вздовж границь зерен або границь перлітних колоній, які ініційовані дисперсними включеннями, що розташовані на границях структурних елементів (видно включення на берегах мікротріщини) – рис. 2,д.

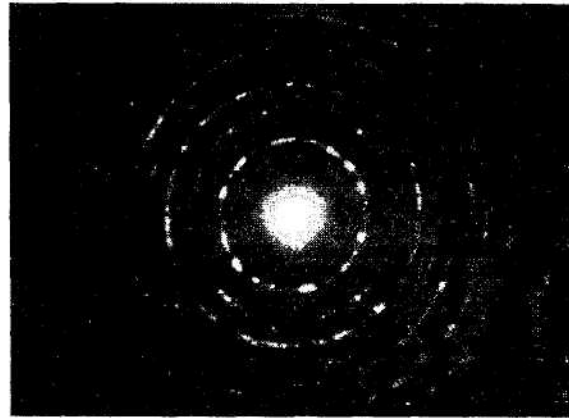
3. Утворення мікротріщин вздовж границь зерен або границь перлітних колоній, які ініційовані самими границями (немає включень на берегах мікротріщини) – рис. 2,е.

4. Утворення мікротріщин біля масивних включень – рис. 2,є, ж.

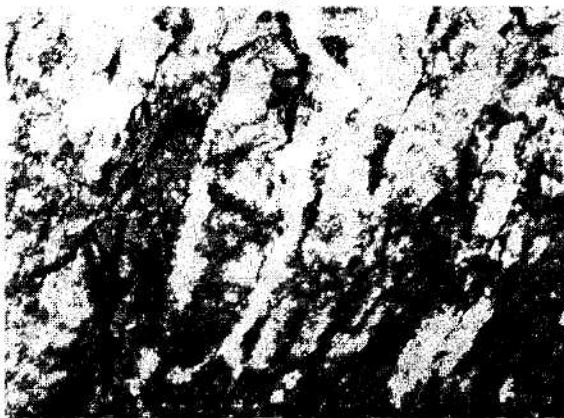
5. Утворення пор на цементитних включеннях внаслідок відшарування цементитних пластин від фериту, яке спостерігалось при значних пружно-пластичних деформаціях матеріалу  $\epsilon_d = \pm 0,8\%$  – рис. 3.



а



б



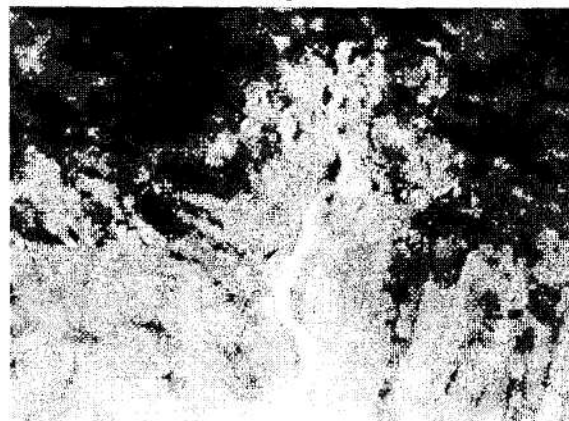
в



г



д



е

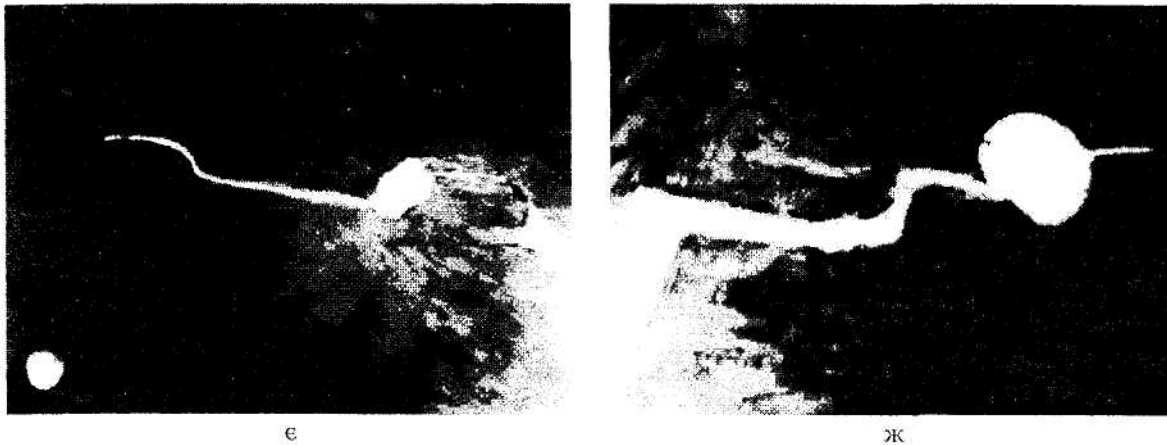


Рис. 2. Мікротріщини в сталі 15X2MFA після циклічного пружно-пластичного деформування: а, в, г, д  $\times 30000$ ; е  $\times 12000$ ; з  $\times 3000$ ; ж  $\times 8000$ ;  
б – мікродифракція з ділянки тріщини (а)

Переважаюча кількість мікротріщин утворена за першим механізмом – вздовж смугової дислокаційної структури. Мікродифракційна картина з ділянки тріщини (рис. 2,б) вказує на значну розорієнтацію в дислокаційних субграницях, а також початок процесу аморфізації матеріалу, оскільки видно дифузне кільце на мікродифракції. Таким чином, в процесі циклічного пружно-пластичного деформування зростає густина дислокацій в субграницях, в локальних об'ємах густина дислокацій досягає граничного значення, що призводить до вичерпання пластичності і утворення мікротріщин. Оскільки із збільшенням амплітуди пружно-пластичної деформації і кількості циклів зростає густина дислокацій в малокутових границях (рис. 1), відповідно збільшується кількість локальних об'ємів матеріалу, де густина дислокацій досягає граничного значення і утворюються мікротріщини.

Утворення мікротріщин вздовж границь зерен або границь перлітних колоній, які ініційовані самими границями (немає включень на берегах мікротріщини), спостерігається рідко. Для більшості мікротріщин на границях структурних елементів виявлено включення дисперсних фаз, що вказує на основну роль включень в мікромеханізмах накопичення втомних пошкоджень на границях структурних елементів. Очевидно, включення є ефективними бар'єрами на шляху дислокацій, що спричиняють накопичення граничної кількості дислокацій і утворення мікротріщин. Таким чином, збільшення кількості включень вздовж границь структурних елементів сприяє окрихленню матеріалу.

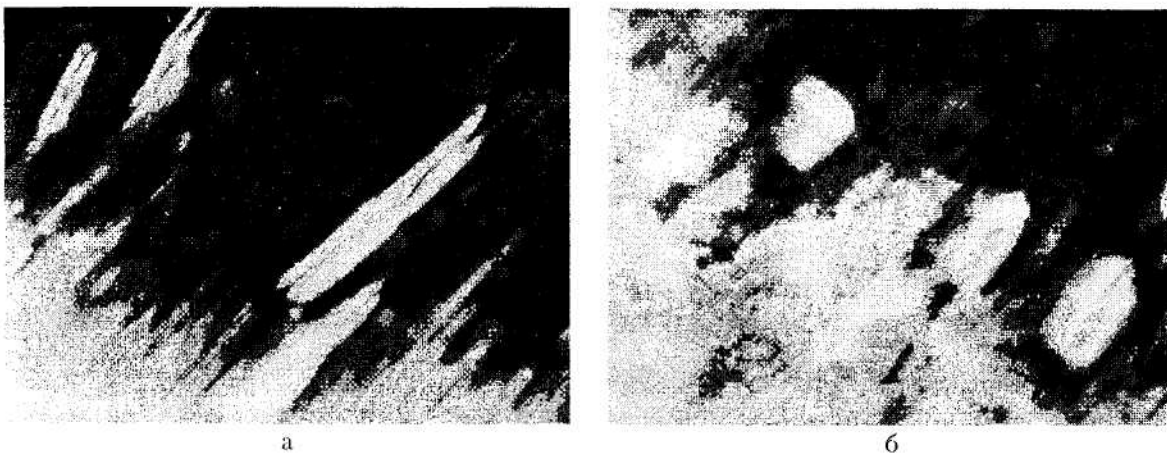


Рис. 3. Пори на цементитних включеннях в сталі 15X2MFA після циклічної пружно-пластичної деформації  $\varepsilon_a = \pm 0,8\%$ : а –  $\times 15000$ ; б –  $\times 25000$



На рис. 2, е, ж видно лише великі пори, які утворені масивними включеннями, і тріщини біля них, а самі включення стравлені під час електролітичного полірування фольги. Необхідно відмітити, що тріщини біля масивних включень поширюються переважно вздовж смугової дислокаційної структури. Отже, мікротріщини в об'ємі зерен виникають і поширюються переважно вздовж смугової дислокаційної структури, незалежно від того – ініційовані вони включеннями чи в результаті накопичення граничної густини дислокацій в субграніцях смугової структури.

Утворення пор на цементитних включеннях внаслідок відшарування цементитних пластин від фериту спостерігали при значних пружно-пластичних деформаціях матеріалу ( $\epsilon_n = \pm 0,8 \%$ , рис. 3). Пори утворюються в результаті порушення когезивного зв'язку на границі цементит-ферит. Утворення пор на включеннях в процесі циклічного навантажування пов'язують з утворенням плоских скупчень дислокацій, які здатні порушити когезивний зв'язок включень і матриці [1].

Очевидно, збільшення густини дислокацій сприяє накопиченню втомної пошкоджуваності матеріалу, що впливає на напруження сколювання. Досліджено залежність напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  при температурі 77 К від густини дислокацій в малокутювих границях сталі 15Х2МФА після попереднього циклічного пружно-пластичного деформування (рис. 4). При зростанні густини дислокацій в малокутювих границях смугової дислокаційної структури, після попереднього пружно-пластичного деформування незалежно від амплітуди деформації, зменшується напруження сколювання.

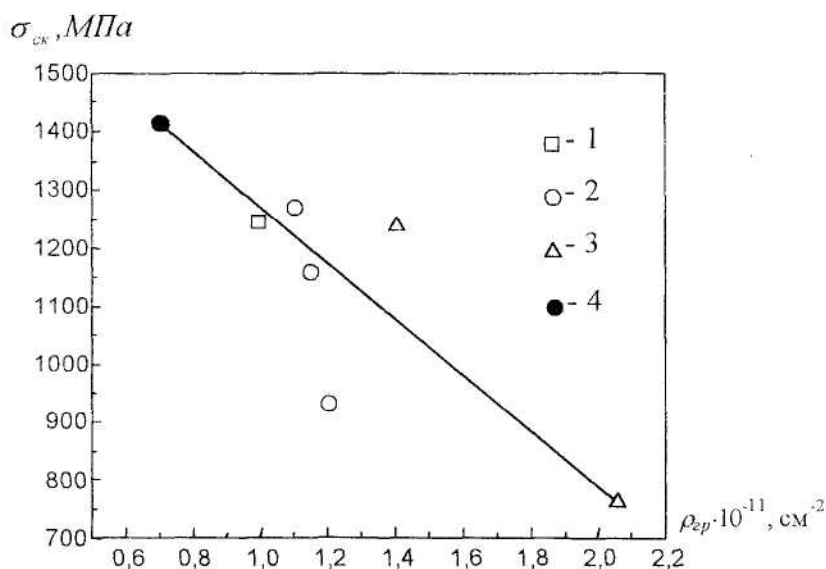


Рис. 4. Залежність напруження сколювання сталі 15Х2МФА від густини дислокацій в малокутювих границях: 1 –  $\epsilon_n = 0,46 \%$ ; 2 –  $\epsilon_n = 0,6 \%$ ; 3 –  $\epsilon_n = 0,8 \%$ ; 4 – первісний стан матеріалу

В умовах малоциклової втоми, коли кожен цикл навантаження супроводжується істотною пластичною деформацією, втомне пошкодження у вигляді мікротріщин і пор виникає в усьому об'ємі матеріалу. Присутність мікропор зменшує нетто-переріз зразка, що обумовлює зменшення напруження сколювання, оскільки граничний стан досягається за менших значень номінальних напружень, а наявність значної кількості мікротріщин також полегшує утворення макротріщини шляхом її росту з наявних дефектів структури.

Відомі праці, в яких виявлено, що напруження сколювання сталі 15Х2МФА зростає після циклічного пружно-пластичного деформування [4]. Зростання напруження сколювання в деформованій структурі автори пояснюють двома причинами: утворенням внутрішньозернової субструктури, яка відіграє роль додаткових бар'єрів, здатних гальмувати мікротріщину; збільшенням розорієнтації границь структурних складових, що існують в первісному стані матеріалу. При зростанні пластичної деформації формується коміркова дислокаційна

структура, з подальшим зменшенням розміру комірок до граничного значення, та одночасно накопичуються дислокації на границях структурних елементів, що зменшує розмір ефективного структурного блока. Зростання напруження, необхідного для поширення мікротріщин через границі коміркової структури і границі структурних елементів, обумовлене зменшенням розміру комірок та збільшенням кількості границь.

Необхідно відмітити, що зростання напруження сколювання отримане при відносно малих циклічних напрацюваннях матеріалу. При більшому циклічному напрацюванні і відповідно накопиченні значної втомної пошкоджуваності авторами виявлено зменшення напруження сколювання, що пов'язують з підвищенням напружень в нетто-січенні зразка і досягненні критичного стану за менших номінальних напружень [4].

Описане в праці [4] збільшення напруження сколювання сталі 15X2МФА із збільшенням відносного циклічного напрацювання пов'язане очевидно з тим, що досліджували матеріал після іншої термічної обробки ( $\sigma_{0,2} = 560$  МПа;  $\sigma_s = 665$  МПа), який характеризується відповідно іншою мікроструктурою. В процесі циклічного напрацювання в матеріалі збільшується густина дислокацій і формується коміркова дислокаційна структура, стінки якої є додатковим бар'єром на шляху розповсюдження мікротріщин. Проте при значному циклічному напрацюванні сталі 15X2МФА даної термічної обробки напруження сколювання зменшується.

Мікроструктура сталі 15X2МФА після термічної обробки, що моделює радіаційне окрихлення матеріалу під дією нейтронного опромінення ( $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа;  $\sigma_s = 1160$  МПа), характеризується смуговою дислокаційною структурою із значною густиною дислокацій в малокутових границях ( $\rho_p = 0,7 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>). В умовах циклічного пружно-пластичного деформування із збільшенням кількості циклів і амплітуди деформації зростає густина дислокацій в паралельних дислокаційних субграницях, в локальних об'ємах густина дислокацій досягає граничного значення, що призводить до вичерпання пластичності і утворення мікротріщин і пор. Причому, переважна кількість мікротріщин утворюється і поширюється вздовж смугової дислокаційної структури. Таким чином, збільшення густини дислокацій в сталі 15X2МФА, яка характеризується смуговою дислокаційною структурою, сприяє накопиченню втомної пошкоджуваності матеріалу у вигляді мікротріщин і пор, досягненні граничного стану в субграницях смугової структури, що полегшує утворення і ріст макротріщини, внаслідок чого зменшується напруження сколювання.

Очевидно, зменшення або збільшення напруження сколювання після попереднього циклічного пружно-пластичного деформування зразків із сталі 15X2МФА пов'язане з структурою матеріалу до циклічного напрацювання. В сталі після термічної обробки ( $\sigma_{0,2} = 560$  МПа;  $\sigma_s = 665$  МПа) формується коміркова дислокаційна структура, яка при відносно невеликому циклічному напрацюванні сприяє зростанню напруження сколювання. Після термічної обробки ( $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа;  $\sigma_s = 1160$  МПа) в сталі присуття смугова дислокаційна структура, накопичення пошкоджуваності в якій починається з перших циклів пружно-пластичного деформування, що зменшує напруження сколювання при відносно невеликому циклічному напрацюванні. При значному циклічному напрацюванні і відповідно накопиченні значної втомної пошкоджуваності напруження сколювання зменшується для обох станів сталі.

### Висновки

1. Мікротріщини в об'ємі матеріалу сталі 15X2МФА в умовах циклічного пружно-пластичного деформування утворюються в основному вздовж смугової дислокаційної структури всередині зерен, а також по границях структурних елементів, де є включення дисперсних фаз.

2. Накопичення втомної пошкоджуваності у вигляді пор в умовах попереднього циклічного пружно-пластичного деформування призводить до зменшення нетто-перерізу зразка, а наявність значної кількості мікротріщин полегшує утворення макротріщини з наявних дефектів структури і її ріст вздовж субграниць смугової дислокаційної структури з граничною густиною дислокацій, що обумовлює зменшення напруження сколювання.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / Под. общей ред. В.В. Папасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.

2. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. 456 с.
3. *Гуцайлук В.Б., Ясний П.В.* Вплив циклічного пружно-пластичного деформування на механізм руйнування і напруження сколювання теплостійкої сталі // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2001. – № 16. – С. 8–17.
4. *Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – С-Пб.: Политехника, 1993. – 391 с.
5. *Владимиров В.И.* Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

ГЛАДЬО Володимир Богданович – завідувач лабораторії кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел. 8(035) 253509

ГУЦАЙЛЮК Володимир Богданович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел. 8(035) 253509

E-mail: hucajluk@tu.edu.te.ua

ЯСНИЙ Петро Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, проректор з наукової роботи Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел. 8(035) 253674

E-mail: yasniy@tu.edu.te.ua

Подано 16.10.2002