

УДК 620.192.7

В.Б. Гуцайлюк, м.н.с.

П.В. Ясній, д.т.н.

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

**ВПЛИВ ЦИКЛІЧНОГО ПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ І НАПРУЖЕННЯ СКОЛЮВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ**

*Досліджено вплив амплітуди попереднього пружнопластичного деформування на напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  і мікромеханізми руйнування сталі 15Х2МФА. Запропоновано експериментально-розрахункову залежність  $\sigma_{СК}$  від параметра Одквіста.*

Відомо, що попереднє циклічне пружнопластичне деформування впливає не лише на характеристики механічних властивостей матеріалів, але й на опір крихкому руйнуванню [1, 2], ударну в'язкість [3], температуру в'язко-крихкого переходу [4]. В'язкість руйнування в умовах статичного навантаження  $K_{IC}$  під дією пружнопластичної деформації може зменшуватись, збільшуватись, змінюватись немонотонно в залежності від матеріалу, температури пружнопластичної деформації і випробування на  $K_{IC}$ , амплітуди пружнопластичної деформації та кількості циклів навантажування [1–5].

Відомо, що опір матеріалу крихкому руйнуванню в залежності від температури і попереднього пружнопластичного деформування матеріалу можна описати через локальні критерії руйнування, зокрема напруження сколювання  $\sigma_{СК}$ , які визначають за результатами експериментальних випробувань гладких зразків чи зразків з концентратором при низьких температурах.

Проте, якщо напруження сколювання є сталим і незалежним від температури випробувань, то існуючі окремі дослідження свідчать про істотний вплив пружнопластичної деформації, зокрема циклічної, на вказану характеристику [6–10].

В одних випадках попередня пластична деформація призводить до збільшення напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  [8–10], в інших випадках отримано зменшення  $\sigma_{СК}$  при відносно великій довговічності, яке пов'язують із зменшенням площі нетто – перерізу зразка за рахунок збільшення кількості втомних мікротріщин [8].

У роботі [11] отримане зменшення  $\sigma_{СК}$  пояснюється тим, що попереднє деформування стиском змінюється механізм руйнування від внутрішньозернового до міжзернового.

У даній статті представлено результати дослідження впливу попередньої циклічної пружнопластичної деформації на напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  і механізми руйнування сталі 15Х2МФА (при 293К  $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа,  $\sigma_a = 1160$  МПа). Хімічний склад і режими термообробки сталі наведені у праці [6]. На рис. 1 наведено мікроструктуру сталі 15Х2МФА у первісному стані.



Рис. 1. Мікроструктура сталі 15Х2МФА у первісному стані  $\times 100$

Характерною особливістю є наявність перлітних пакетів, розміщених як біля границь зерен, так і у вигляді включень.

Для випробувань використовували гладкі циліндричні зразки, діаметр робочої ділянки яких становив 5 мм та довжина робочої частини 20 мм. Випробування проводили на електрогідравлічній машині СТМ-100, яка керується ЕОМ типу ІВМ286.

Попереднє пружнопластичне деформування, а також випробування на циклічну міцність зразків здійснювали при 293К у режимі жорсткого навантажування і коефіцієнті асиметрії циклу  $R_\epsilon = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max} = -1$  ( $\epsilon_{\min}$ ,  $\epsilon_{\max}$  – найменша і найбільша загальна деформація циклу навантажування) з частотою 0,25 Гц. Частоту попереднього циклічного навантажування вибирали з умови відсутності саморозігрівання зразка.

Поява тріщини фіксувалась візуально, а також за допомогою двокоординатного самописця, який реєстрував різке зменшення максимального зусилля.

Циліндричні зразки піддавали попередньому пружнопластичному деформуванню з амплітудою  $\epsilon_a = 0,46; 0,6; 0,8$  % при відносному напруженні  $N/N_T = 0,25 \dots 0,75$ . Тут  $N_T$  – кількість циклів до зародження тріщини.

Упродовж випробувань зусилля і деформацію реєстрували на магнітоносій та на двокоординатний самописець типу Н110 у координатах зусилля-деформація. База вимірювання деформації становила 10 мм.

Напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  первісного і деформованого матеріалу визначали при температурі 77К. Зразки випробовувались у термоізолюваній камері, заповненій рідким азотом. Під час випробувань реєстрували на магнітоносій та виводили на двокоординатний самописець типу Н110 поточне значення – зусилля  $P$  та переміщення  $\Delta l$  штока. У всіх випадках діаграми  $P-\Delta l$  зберігали лінійний характер до руйнування. Поперечна, залишкова макроскопічна деформація була відсутня.

Необхідно зауважити, що коректними вважались результати випробувань, отримані на тих зразках, крихке руйнування яких відбувалось на робочій ділянці зразка, в межах бази вимірювання.

Напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  визначалось наступним чином:

$$\sigma_{ск} = P_K / S, \tag{1}$$

де  $P_K$  – критичне зусилля руйнування;  $S = \pi \cdot d^2 / 4$  – мінімальна площа поперечного перерізу зразка після руйнування;  $d$  – діаметр зразка після руйнування.

Умови попереднього циклічного пружнопластичного деформування зразків при температурі 293К та значення напруження сколювання  $\sigma_{ск}$ , визначене при температурі 77К, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри попереднього циклічного пружнопластичного деформування та напруження сколювання зразків сталі 15Х2МФА

№ з/п	Розмах повної деформації $\Delta\epsilon$ , %	Розмах пластичної деформації $\Delta\epsilon_p$ , мм/мм	Параметр Одквіста $\chi$	Кількість циклів навантаження $N$ , цикл	Відносна довговічність $\bar{N}$	Напруження сколювання $\sigma_{ск}$ , МПа
1	0	0	0	0	0	1416
2	0,92	$1,44 \cdot 10^{-3}$	0,907	315	0,241	1244
3	1,2	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,91	176	0,251	1273
4	1,2	$2,61 \cdot 10^{-3}$	1,02	212	0,303	1159
5	1,2	$2,61 \cdot 10^{-3}$	1,508	290	0,414	934
6	1,6	$6,86 \cdot 10^{-3}$	0,686	50	0,25	1237
7	1,6	$6,86 \cdot 10^{-3}$	2,058	150	0,75	763,04

Залежність напруження сколювання  $\sigma_{ск}$  сталі 15Х2МФА від довговічності  $\bar{N}$  та розмаху пластичної деформації  $\Delta\epsilon_p$  ілюструють графіки на рис. 2.

Із збільшенням відносного напруження зменшується напруження сколювання  $\sigma_{ск}$ , причому для різних значень повної деформації  $\Delta\epsilon$  існує єдина залежність виду:

$$\sigma_{ск}(\bar{N}) = U + A \cdot e^{B(\bar{N})}, \tag{2}$$

де  $A, B, U$  – сталі матеріалу. Для сталі 15Х2МФА:  $A = 2573$  МПа;  $B = -0,431$ ,  $U = 2573$  МПа.

При зростанні розмаху пластичної деформації  $\Delta\epsilon_p$  напруження сколювання також зменшується, проте характер його зміни, на відміну від залежності (2), лінійний і може бути представлений наступним чином:

$$\sigma_{ск}(\Delta\varepsilon_p) = C + D \cdot \Delta\varepsilon_p, \tag{3}$$

де  $C, D$  – сталі матеріалу. Для нашого випадку:  $C = 1398$  мПа;  $D = 1,131 \cdot 10^4$  мПа.

Очевидно для прогнозування впливу попередньої пружнопластичної деформації на опір крихкому руйнуванню  $K_{IC}$  необхідно знати залежність  $\sigma_{СК}$  від параметра навантаження, який містить відносну довговічність та розмах пластичної деформації.

За таку функцію можна використати параметр Одквіста  $\chi$  [8]:

$$\chi = 2 \cdot \bar{N} \cdot \Delta\varepsilon_p. \tag{4}$$

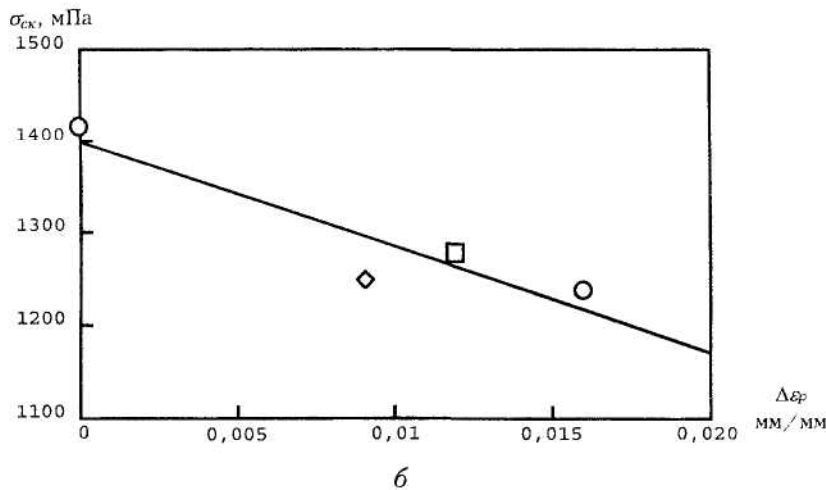
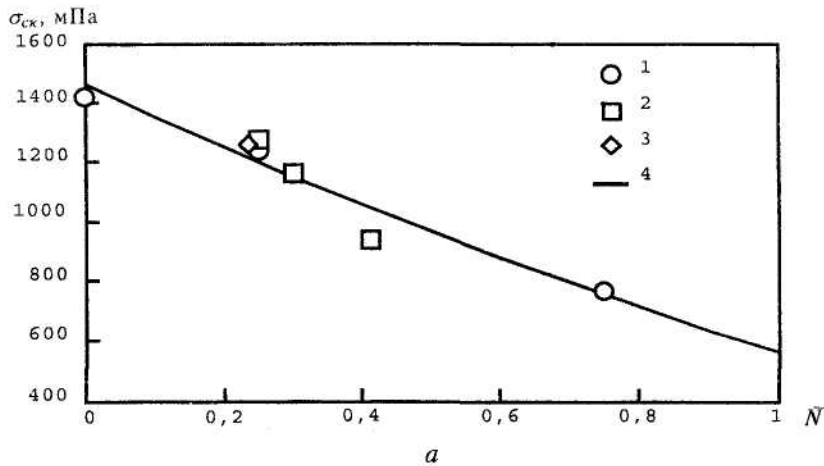


Рис. 2. Залежність напруження сколювання сталі 15Х2МФА: а) від  $\bar{N}$ ; б) від  $\Delta\varepsilon_p$

( $\bar{N} = 0,3$ ) при  $\Delta\varepsilon = 1,6\%$  – 1;  $\Delta\varepsilon = 1,2\%$  – 2;  $\Delta\varepsilon = 0,92\%$  – 3;  
1–3 – експеримент; 4 – апроксимація експериментальних результатів

Для розрахунку параметра Одквіста для проміжних значень  $\Delta\varepsilon_p$  використовували залежність  $\Delta\varepsilon_p$  від  $\Delta\varepsilon$ , побудовану за результатами випробувань зразків  $\varnothing 5$  мм і 10 мм [7] при відносній довговічності  $\bar{N} = 0,5$  (рис. 3).

Дану залежність можна описати експоненціальною функцією:

$$\Delta\varepsilon_p = L \cdot e^{G \cdot \Delta\varepsilon}, \tag{5}$$

де  $L = 8,382 \cdot 10^{-5}$  мм/мм;  $G = 300,341$  мм/мм – сталі для даного матеріалу.

Таким чином, незалежно від величини амплітуди деформації та відносного напруцювання напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  відносно параметра Одквіста  $\chi$  можна описати наступною формулою:

$$\sigma_{ск}(\chi) = M + J \cdot e^{P \cdot \chi}, \tag{6}$$

де  $J, P, M$  – сталі матеріалу. Для сталі 15Х2МФА:  $M = 395$  мПа;  $J = 1900$  мПа,  $P = -0,208$  (рис. 4).

Для виявлення механізмів зниження напруження сколювання з збільшенням напрацювання і амплітуди деформації проаналізуємо кінетику накопичення втомних пошкоджень [6], а також мікромеханізми руйнування сталі.

Під час циклічного пружнопластичного деформування зразки після напрацювання різної тривалості знімали з випробувальної машини, фотографували поверхню із збільшенням 250× на мікроскопі "Neofhot-2".

Було виявлено, що втомні мікротріщини виникають як наслідок ковзання у найбільш сприятливо орієнтованих стосовно напрямку максимальних дотичних напружень зернах. Упродовж циклічного деформування спостерігалось відхилення від початкової орієнтації, яке можна пов'язати з виходом мікротріщини на границю зерна.

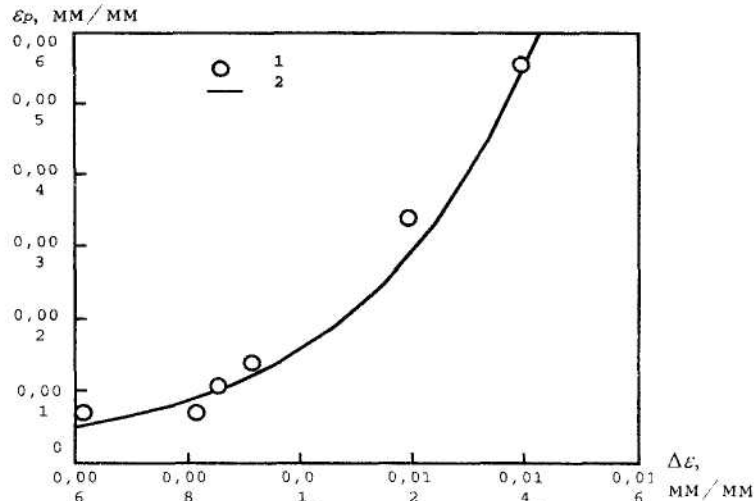


Рис. 3. Залежність розмаху пластичної деформації  $\Delta \epsilon_p$  від розмаху повної деформації  $\Delta \epsilon$ : 1 – експеримент; 2 – апроксимація результатів

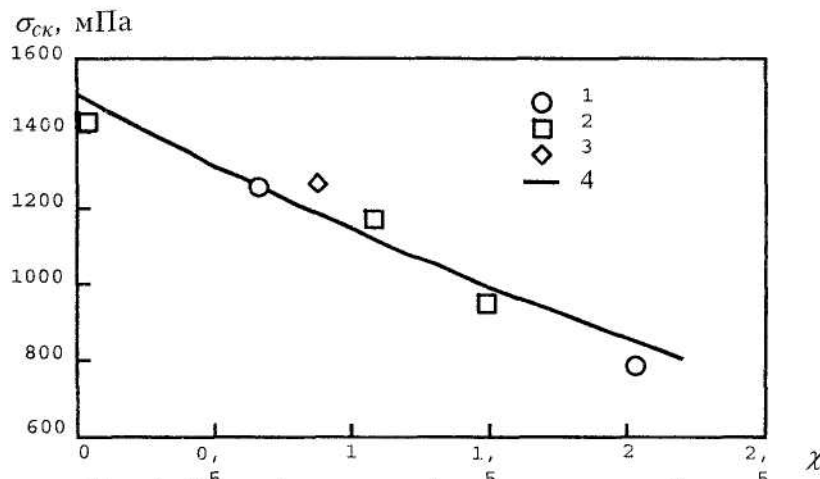


Рис. 4. Залежність границі сколювання  $\sigma_{ск}$  від  $\chi$ : 1 ( $\Delta \epsilon = 1,6\%$ ), 2 ( $\Delta \epsilon = 1,2\%$ ), 3 ( $\Delta \epsilon = 0,92\%$ ) – експеримент; 4 – апроксимація результатів

З збільшенням параметра Одквіста, а також відносного напрацювання спостерігається збільшення густини  $q$  і середньої довжини  $\bar{l}$  втомних мікротріщин (рис. 5). Проте у всіх випадках середня довжина мікротріщин не перевищувала середнього розміру зерна (150 мкм).

Фрактографічні дослідження зламів зразків з сталі 15Х2МФА при температурі 77К проводились на растровому електронному мікроскопі типу Combaх в діапазоні збільшення від 200 до 2000 крат.

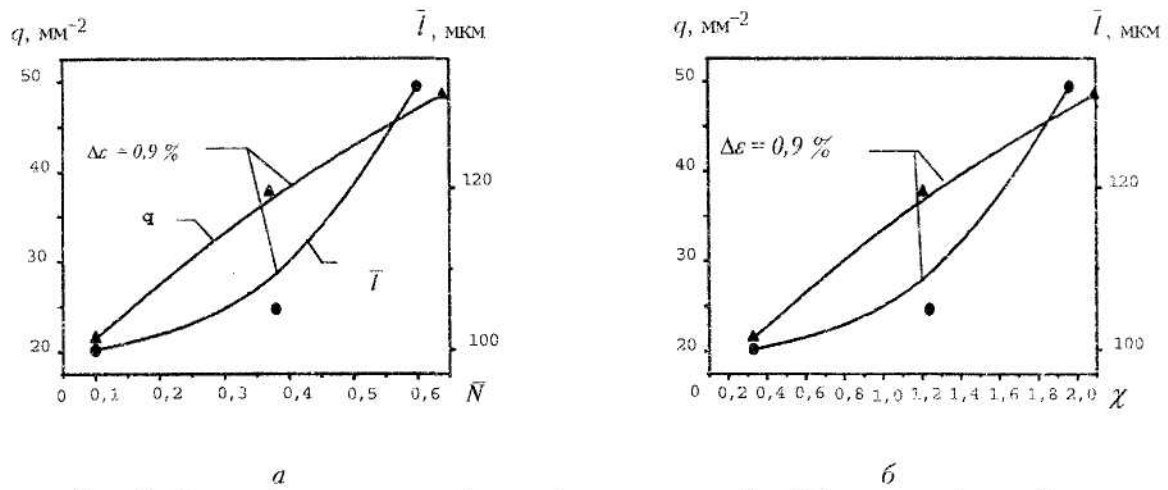
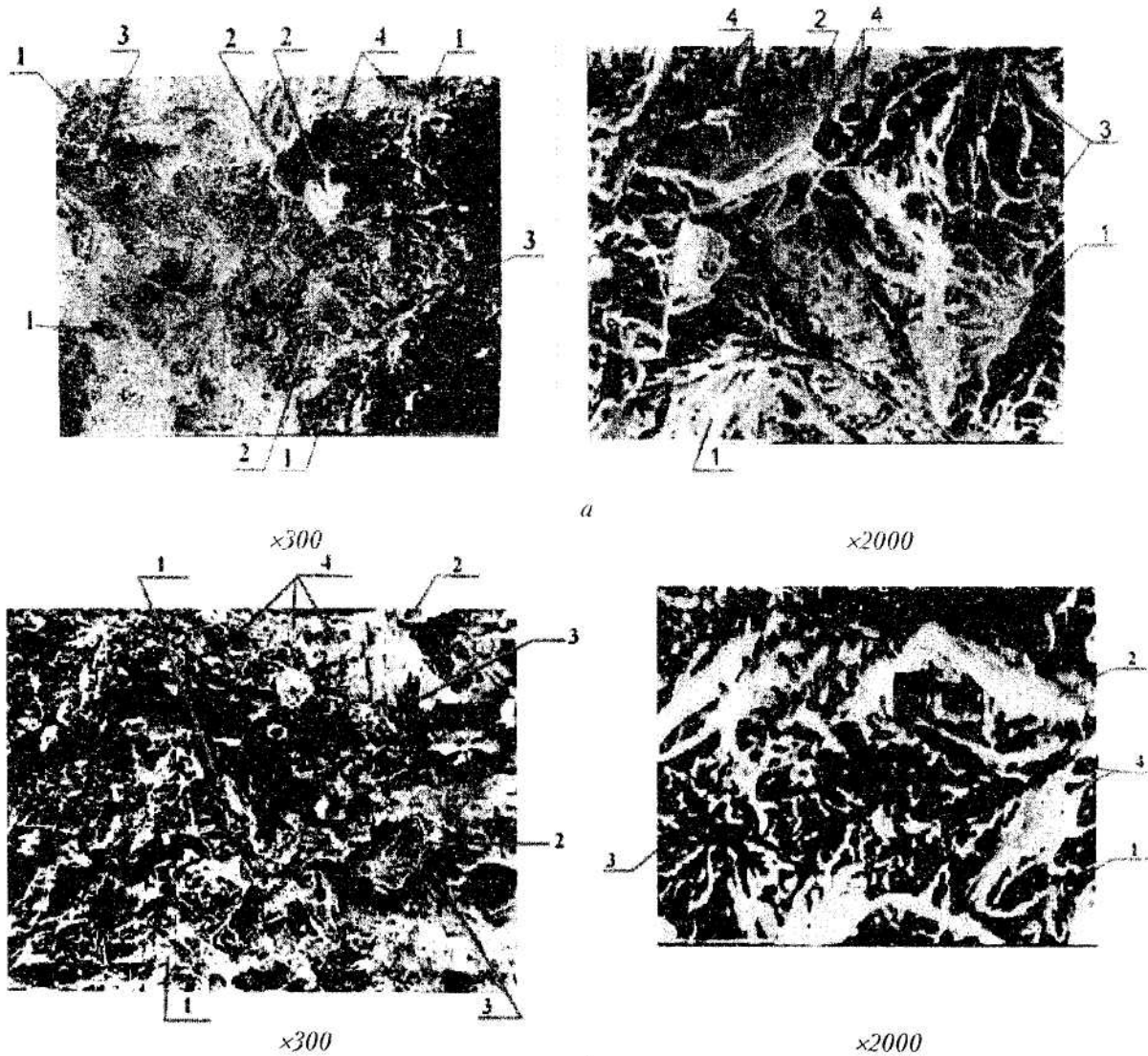


Рис. 5. Залежність густини мікротріщин  $q$  та середньої довжини мікротріщин сталі 15Х2МФА при 293 К,  $R_e = -1$ :

*a* – від відносної довговічності  $\bar{N}$ ; *б* – від параметра

Фотографії поверхні руйнування зразків в первісному стані і після напрацювання показано на рис. 6.



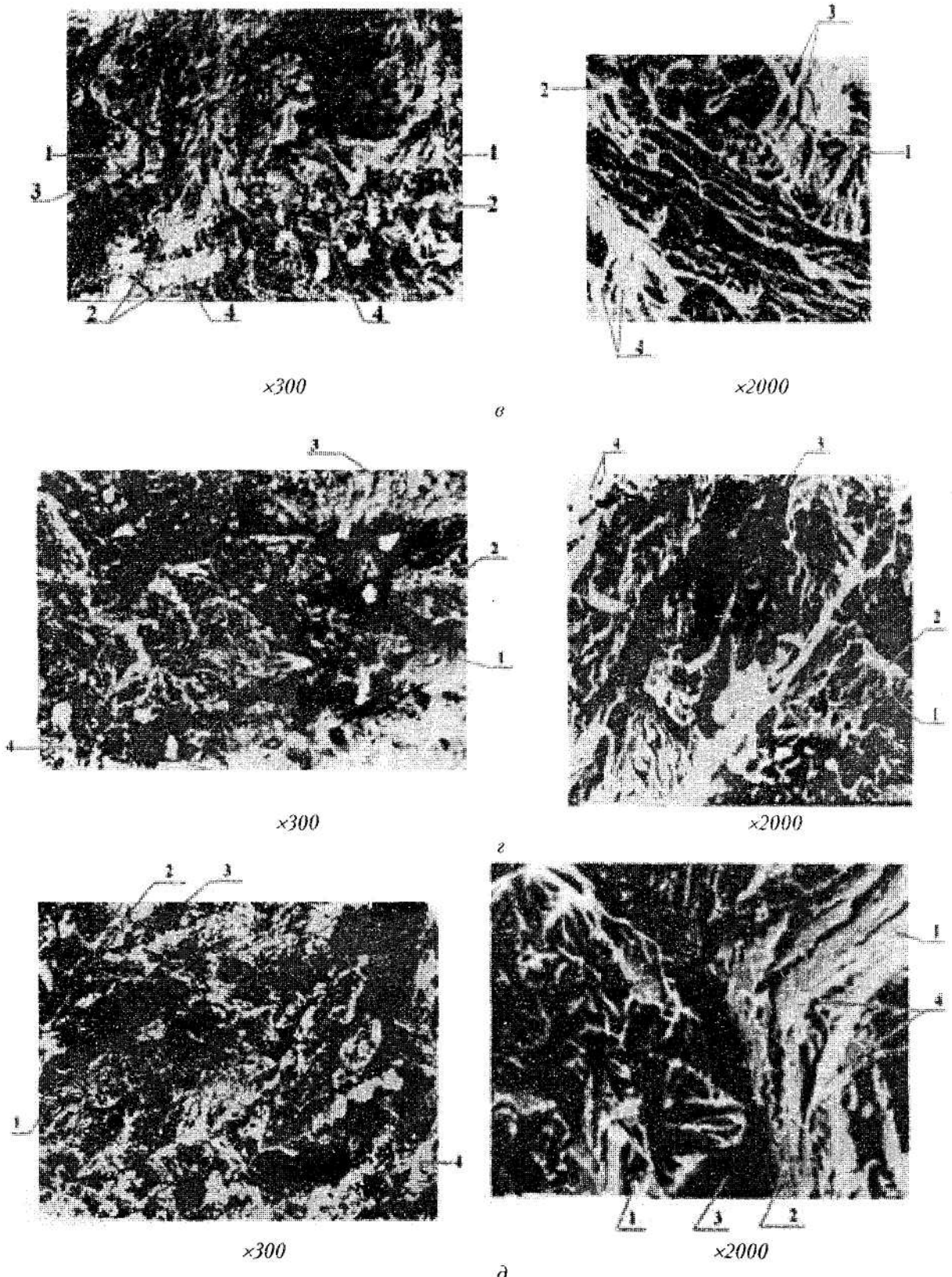


Рис. 6. Поверхні руйнування зразків, що піддані попередньому циклічному пружнопластичному деформуванню після розриву при  $T = 77\text{ K}$ : 1 – фасетки внутрішньозернового сколювання і квазісколу; 2 – фасетки міжзернового руйнування; 3 – вторинні тріщини міжзернового і внутрішньозернового типу; 4 – ямки відриву:  
 а –  $N = 315$  цикл,  $\Delta\varepsilon = 0,92\%$ ,  $\chi = 0,907$ , б –  $N = 650$  цикл,  $\Delta\varepsilon = 0,92\%$ ,  $\chi = 1,872$ ;  
 в –  $N = 50$  цикл,  $\Delta\varepsilon = 1,6\%$ ,  $\chi = 0,686$ , г –  $N = 150$  цикл,  
 $\Delta\varepsilon = 1,6\%$ ,  $\chi = 2,058$ ; д –  $N = 0$  цикл,  $\Delta\varepsilon = 0\%$ ,  $\chi = 0$

У зламі зразка з первісного матеріалу (рис. 6, *a*) спостерігається багато ознак локальної пластичної деформації та крихкого руйнування, а також ознаки як міжзернового, так і внутрішньозернового руйнування. Наявність цих складових свідчить, що руйнування проходить за змішаним механізмом і на даному етапі практично не можливо виділити переважаючий механізм.

Характерними особливостями зламу є наявність фасеток міжзернового руйнування, як покритих малими і великими ямками, так і слідами деформації ковзання, фасетки квазісколу, вторинні тріщини зернограничного характеру, а також ямки.

Наявність фасеток квазісколу свідчить про присутність механізму внутрішньозернового руйнування. Ямки на поверхні фасеток утворюються за рахунок руйнування перлітних колоній та інших включень. Наявність ліній ковзання на поверхні фасеток квазісколу свідчить про те, що відбувається локальне переміщення дислокацій.

На цьому рисунку також можна відмітити і ряд ямок овальної форми на границі зерна. Очевидно їх можна вважати мікропорами, які зароджуються на границі зерен біля включень і перлітних колоній.

Злам зразка, підданого попередній пластичній деформації з амплітудою  $\Delta\varepsilon = 0,92\%$ ,  $N = 315$  цикл (рис. 6, *b*), свідчить про те, що в зоні руйнування на мікрорівні досить відчутний вплив локальної пластичної деформації (наявність ямок).

Руйнування проходить під дією інтегрального механізму, в основі якого є локальна пластична деформація та міжзернове і внутрішньозернове руйнування (наявність фасеток міжзернового руйнування як вкритих малими і великими ямками, так і слідами деформації ковзання; вторинних мікротріщин зернограничного характеру). Фасетки квазісколу дають змогу стверджувати, що у зламі присутній і механізм внутрішньозернового руйнування.

При тому ж розмаху деформації  $\Delta\varepsilon = 0,46\%$ , але при збільшенні кількості циклів  $N = 650$  (зростанні  $\chi$ ) (рис. 6, *в*) зростає кількість фасеток міжзернового руйнування, а фасеток сколу внутрішньозернового руйнування в чистому вигляді майже не виявилось. Це може свідчити про зменшення в'язкої складової руйнування та збільшення впливу міжзернового та внутрішньозернового механізмів руйнування. Дійсно, спостерігається зменшення кількості ямок, за рахунок злиття мікропор, проте різко зростає кількість і розмір (ширина і довжина) вторинних мікротріщин, причому деякі з них призводять до структурного розшарування матеріалу. Необхідно зауважити, що розшарування структури у чистому вигляді не спостерігається, оскільки тут присутні й інші фактурні складові (фасетки сколу, ямки, вторинні тріщини як міжзернового, так і внутрішньозернового характеру).

Злами зразків на рис. 6, *г* ( $\Delta\varepsilon = 1,6\%$ ;  $N = 50$  цикл), *д* ( $\Delta\varepsilon = 1,6\%$ ;  $N = 150$  цикл), які були деформовані при збільшенні амплітуди пластичної деформації, відрізняються від попередніх інтенсивним процесом утворення вторинних мікротріщин, особливо міжзернових. На поверхні фасеток внутрішньозернового сколу помітні східці, язички, гребінки, струмки.

У порівнянні з розмахом амплітуди  $\Delta\varepsilon = 0,92\%$  (рис. 6, *б, в*) з ростом величини пластичної деформації зменшується кількість ямок (зменшення інтенсивного локального пластичного деформування) та зростає крихка складова руйнування (фасетки квазісколу, фасетки міжзернового та внутрішньозернового руйнування), про що свідчить зростання кількості вторинних мікротріщин. У всіх випадках спостерігається змішаний механізм руйнування.

Таким чином, з ростом величини амплітуди пружнопластичного деформування характер механізму руйнування змінюється від внутрішньозернового до міжзернового руйнування, зменшується частка в'язкої складової руйнування (локальної пластичної деформації, спричиненої рухом дислокацій). Спостерігається ріст кількості вторинних мікротріщин внутрішньозернового, а особливо міжзернового характеру. Оскільки механізм утворення міжзернових мікротріщин потребує менше енергозатрат у порівнянні з іншими механізмами, що присутні у даному матеріалі, це спричиняє до зменшення напруження сколювання пластично деформованих зразків.

Нами здійснена спроба узагальнити відомі результати дослідження впливу пружнопластичної деформації (розтяг, стиск, циклічне деформування) на  $\sigma_{ск}$ . Характеристики механічних властивостей матеріалів, що аналізувались, наведені у таблиці 2 [8], [9], [11].

Таблиця 2

Характеристики механічних властивостей теплостійких сталей

№ з/п	Матеріал, літературне джерело	$\sigma_{0,2}^*$	$\sigma_{\sigma}^*$	Температура деформування, К	Режим навантаження
		МПа	МПа		
1	15X2МФА	1100	1160	293	циклічне ППД
2	15X2МФА [9]	653	694	573	статичний розтяг
3	15X2МФА [8]	620	740	293	статичний розтяг
4	15X2НМФА [8]	560	640	293	циклічне ППД
5	15X2МФА [11]	560	665	293	циклічне ППД

$\sigma_{0,2}^*, \sigma_{\sigma}^*$  – характеристики механічних властивостей при температурі деформування

Узагальнення результатів дослідження впливу попередньої пружнопластичної деформації на  $\sigma_{СК}$  сталі 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа,  $\sigma_{\sigma} = 1160$  МПа) та сталей, наведених у табл. 2, показано на рис. 7.

Наведені експериментальні залежності можна поділити на дві групи. До першої віднесемо залежності, які зростають із збільшенням  $\chi$ ; до другої – в яких  $\sigma_{СК}$  зменшується із збільшенням  $\chi$ .

Зростання величини  $\sigma_{СК}(\chi)$  сталі 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 560$  МПа,  $\sigma_{\sigma} = 665$  МПа при  $T = 293$  К) автор пояснює двома можливими причинами: утворення внутрішньозернової субструктури, яка відіграє роль додаткових бар'єрів, що гальмують мікротріщину; збільшення розорієнтації границь існуючих у вихідному зерні структурних складових [8].

При зростанні пластичної деформації відбувається виникнення комірчастої (щільникової) структури, з зменшенням діаметра комірок та одночасним накопиченням дислокацій на зовнішніх (головних) границях зерен, а при досягненні певної величини – "насичення" на інших. Зростання напруження, необхідного для розповсюдження мікротріщин через ці границі, обумовлене збільшенням числа самих границь та зменшенням розміру комірки.

Проте дане пояснення справедливе при достатньо малих втомних тріщинах, розмір яких порядку комірки субструктури зерна. При великих значеннях  $\chi$ , а відповідно значних втомних пошкодженнях, розмір яких порядку декількох діаметрів зерна,  $\sigma_{СК}(\chi)$  може зменшуватись [8].

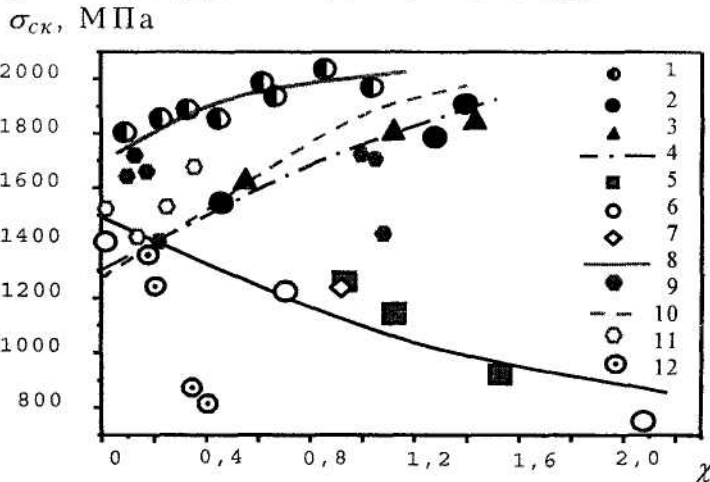


Рис. 7. Залежність напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  від параметра Одквіста  $\chi$  для теплостійких сталей: 1-5 – дивись нумерацію таблиці 2:

- 1 –  $\sigma_{СК}$  при  $T = 77$  К (5 –  $\Delta\varepsilon = 1,2$  %; 6 –  $\Delta\varepsilon = 1,8$  %; 7 –  $\Delta\varepsilon = 0,92$  %;
- 8 – апроксимуюча крива); 2 –  $\sigma_{СК}$  при  $T = 77$  К (1) [9];
- 3 –  $\sigma_{СК}$  при  $T = 77$  К та 4,35 К (2 –  $\Delta\varepsilon = 6$  %; 3 –  $\Delta\varepsilon = 2$  %; 4 – значення  $\sigma_{СК}$  для сталі у вихідному стані) [8]; 4 –  $\sigma_{СК}$  при  $T = 77$  К та 4,35 К (9 –  $\Delta\varepsilon = 2$  %; 11 –  $\Delta\varepsilon = 1$  %; 10 – значення  $\sigma_{СК}$  для сталі у вихідному стані) [8]; 5 –  $\sigma_{СК}$  при  $T = 77$  К (12) [11]

Зменшення  $\sigma_{СК}(\chi)$  обумовлюється підвищенням напружень у нетто-перерізі зразка (нетто-переріз – переріз зразка без врахування площі, яку займають втомні тріщини), що призводить до досягнення критичного стану при менших номінальних напруженнях у перерізі.

Зменшення  $\sigma_{СК}$  для сталі 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 560$  МПа,  $\sigma_{\sigma} = 665$  МПа при  $T = 293$  К) після деформування стиском пояснюється зміною механізму руйнування від сколу і квазісколу [8] до



механізму внутрішньозернового і міжзернового руйнування [11]. Під час попереднього пластичного деформування відбувається загострення мікропор, що сприяє більшій кількості гострих мікротріщин, які швидше розповсюджуються по границях зерен, оскільки там відсутні бар'єри, одночасно розповсюджуються і тріщини внутрішньозернові, але їх поширенню перешкоджають бар'єри, які утворюють деформаційні субструктури. Наслідком зміни механізму руйнування і є значне зниження напруження сколювання.

Порівнюючи результати [8] з отриманими у нашому дослідженні, необхідно зауважити, що як і у роботі [9], термообробка матеріалу та його механічні властивості при тій же температурі попереднього пластичного деформування були інші. Локальні механізми руйнування в обох випадках теж були різними. Механізм сколу і квазісколу у [8] та інтегральний механізм руйнування з вираженою в'язкою складовою при малому розмахові амплітуди пластичної деформації та зростанням крихкої складової при збільшенні розмаху амплітуди пластичної деформації. Це очевидно і призводить до того, що напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  зменшується.

Монотонне зростання критичного напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 653$  мПа,  $\sigma_{\theta} = 694$  мПа при  $T = 573$  К) [9] із зростанням  $\chi$  у роботі, очевидно, можна пояснити тими фактами, що механічні властивості матеріалу при температурі, за якої здійснювали попереднє пружнопластичне деформування, дещо інші ніж у нашому випадку.

Попередня пружнопластична деформація здійснювалась при температурі вище температури в'язко-крихкого переходу. Одночасно, це очевидно також призводить до того, що дані, отримані для аналогічного діапазону зміни пластичної деформації  $\chi$  і того ж матеріалу, що і у роботі [8], дещо більші за величиною.

При порівнянні результатів дослідження, наведеного у цій статті, з результатами роботи [11] необхідно зауважити, що механічні характеристики матеріалів, що піддавались попередньому пластичному деформуванню, були різними. У роботі [11] досліджувались зразки зі сталі 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 560$  мПа,  $\sigma_{\theta} = 665$  мПа) у вихідному стані, а у нашому випадку досліджували сталь 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 1100$  мПа,  $\sigma_{\theta} = 1160$  мПа) після термообробки, яка імітує окрихчення матеріалу під дією нейтронного опромінення.

Хоча попереднє пластичне деформування і здійснювалось різними способами (стиском [11] і розтягом), однак механізм руйнування практично аналогічний, тобто внутрішньозерновий і міжзерновий з явно вираженим переважанням останнього при зростанні амплітуди деформації.

Потрібно зазначити, що при попередньому циклічному пластичному деформуванні зменшення напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  відбувається більш повільно, ніж у випадку попереднього пластичного деформування стиском (рис. 7).

Підсумовуючи результати даного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Попереднє циклічне пружнопластичне деформування при контрольованій амплітуді деформації зменшує напруження сколювання  $\sigma_{СК}$  сталі 15X2МФА після термообробки, яка імітує окрихчення матеріалу під дією нейтронного опромінення у порівнянні з недеформованим матеріалом. Залежність  $\sigma_{СК}$  від параметра Одквіста  $\chi$  є інваріантною до амплітуди пружнопластичної деформації та кількості циклів навантажування.
2. Характер впливу попередньої пластичної деформації на напруження сколювання сталей з різними механічними властивостями визначається різним впливом попередньої пластичної деформації на мікромеханізми руйнування. Циклічне пружнопластичне деформування сталі 15X2МФА ( $\sigma_{0,2} = 1100$  мПа,  $\sigma_{\theta} = 1160$  мПа) змінює співвідношення між складовими змішаного механізму руйнування: зменшується частка внутрішньозернового руйнування, що переважає у недеформованому стані, та зростає частка міжзернового руйнування у пластично деформованому матеріалі.
3. Реалізація того чи іншого мікромеханізму руйнування залежить від температури, при якій проводиться попереднє пружнопластичне деформування, механічних властивостей матеріалу при цій температурі. Попередня пружнопластична деформація при температурі вище температури в'язко-крихкого переходу призводить до зростання напруження сколювання, а нижче температури в'язко-крихкого переходу – до зменшення напруження сколювання.