

УДК 620.178.3

П. Ясній¹, докт. техн. наук; І. Окіпний¹, канд. техн. наук;
В. Лазар², канд. техн. наук

¹Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

²Мукачівський державний університет

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖУВАННЯ НА ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ 15Х2МФА

Досліджено вплив параметрів навантажування на діаграми деформування теплостійкої сталі 15Х2МФА у двох структурних станах, які моделюють радіаційне окрихчення корпусу атомного реактора на середину і кінець терміну експлуатації. Виявлено, що деформування комбінованим розтягом за температури 623 К призводить до зменшення границі текучості сталі 15Х2МФА(II). Встановлено, що пластичне деформування наводненого металу істотно понижує рівень напружень розтягу і комбінованого розтягу порівняно з ненаводненим.

Ключові слова: діаграма деформування, пластичне деформування, наводнювання, комбінований розтяг.

P. Yasniy, I. Okipny, V. Lazar

INFLUENCE OF LOADING PARAMETERS ON DEFORMATION DIAGRAMS OF 15Cr2MFA STEEL

It has been investigated influence of loading parameters on the deformation diagrams of heat-resistant steel 15Cr2MFA for two structural states which modelling the radiation embrittlement of frame of nuclear power reactor on the middle and at the end of term of life. It was find that deformation over combined tension at 623K temperature brings to decreasing of 15Cr2MFA steel fluidity limit. Hydrogen during plastic deformation substantially lowers the tension level comparatively with the virgin metal.

Key words: deformation diagrams, plastic deformation, hydrogenation, combined loading.

Під час експлуатації багато елементів конструкцій, зокрема трубопроводи, посудини високого тиску, мостові конструкції тощо, піддаються впливу сумісної дії статичного і низькоамплітудного навантаження [1-12]. Циклічна складова навантаження істотно впливає на характеристики деформування і руйнування (діаграми деформування, деформацію руйнування), а також на мікроструктуру матеріалу.

Виявлено, що сумісне циклічне і статичне навантаження при реалізації попереднього теплового перевантаження збільшує опір крихкому руйнуванню сталі [13]. Комбіноване навантажування з амплітудою циклічної складової 15 Гц значно збільшує загальну деформацію при однаковому рівні напружень, а також зменшує умовну границю текучості за комбінованого розтягу з 175МПа до 165МПа, що пов'язане з процесами динамічної повзучості [14].

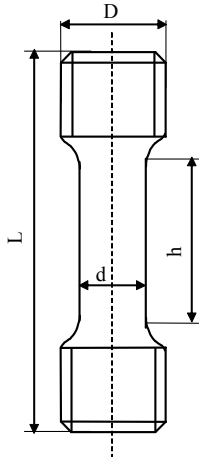
Основним механізмом зростання деформації при комбінованому навантаженні є подрібнення зерна. При деформуванні розтягом під дією комбінованого навантажування ширина базових зерен зменшується порівняно з первісним матеріалом (до 30 %) проти 10 % за квазістатичного навантажування. Подрібнення рівновісних зерен становило 13 балів при комбінованому розтягу порівняно з 11 – 12 балом при квазістатичному розтязі та 11 балом у первісному стані [15].

Квазістатичний комбінований розтяг сплаву АМг6 змінює механізм руйнування (стабілізує процес зародження і розвитку макротріщин відриву, формує у зламах стрічковий рельєф та тонкі і протяжні мікротріщини, яких немає при квазістатичному розтягу) [15].

Метою даної роботи є дослідження впливу температури, розмаху напружень за комбінованого розтягу, а також наводнювання на діаграми деформування теплостійкої

сталі 15Х2МФА після термообробки, що моделює радіаційне окрихчення корпусу реактора типу ВВЕР на середину і кінець розрахункового терміну експлуатації.

Методика дослідження. Для визначення впливу параметрів навантажування на діаграми деформування за одновісного розтягу використовували гладкі циліндричні зразки діаметром робочої ділянки 8 і 5 мм та базою вимірювання 20 і 10 мм відповідно (рис. 1).



L, мм	D, мм	d, мм	h, мм
50	M18*1,5	8	20
50	M18*1,5	5	20
60	M10*1,5	5	10

Рисунок 1 - Зразки для випробувань

Вплив водню на діаграми деформування досліджували за розтягу і комбінованого розтягу циліндричних зразків до рівня залишкової пластичної деформації 1,0 і 3,0% за температури деформування 623К [16]. Зразки наводнювали електролітичним методом згідно з методикою [17].

Технологію виготовлення зразків вибирали таким чином, щоб уникнути впливу технологічних факторів на механічні властивості матеріалу в зоні обробки. Точність виготовлення забезпечувалась відносно вимог [18, 19]. Відхилення діаметра робочої ділянки для всієї партії зразків не перевищувало 0,03 мм.

Ненаводнені циліндричні зразки деформували розтягом та комбінованим розтягом до деформації $\epsilon_{pl} = 0,5\%$, $1,0\%$ і $3,0\%$ в діапазоні температур 423...623 К. Статична складова навантажування задавалась від персонального комп'ютера, а циклічна – від низькочастотного генератора стандартних електричних імпульсів типу ГЗ-112. Деформацію вимірювали тензометричним давачем, робочі елементи якого увімкнуто за мостовою схемою. Похибка вимірювання деформації не перевищувала $4 \cdot 10^{-5}$ мм/мм. Розмах напружень при комбінованому розтязі складав $\Delta\sigma = 50, 90, 110, 180$ і 220 МПа, частота навантажування $f=25$ Гц ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, де σ_{max} і σ_{min} – найбільше і найменше напруження циклу).

Зусилля та поздовжню деформацію записували з періодом 55 мсек., кількість точок вимірювання задавали до початку експерименту. Паралельно для візуального контролю записували діаграми на двохкоординатний самописець в координатах "зусилля - поздовжня деформація". Результати досліджень записували на магнітоносій і обробляли за допомогою пакету прикладних програм.

Результати досліджень та їх обговорення

Вплив температури випробувань. Досліджували сталь 15Х2МФА, яка використовується для виготовлення корпусів атомних реакторів типу ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 у двох станах, які моделюють радіаційне окрихчення матеріалу під дією нейтронного опромінення на середину і кінець терміну експлуатації корпусу атомного реактора.

Хімічний склад, режими термообробки і механічні характеристики матеріалу при різних температурах наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад, режим термообробки і механічні властивості сталі 15Х2МФА

Матеріал, склад, %	Термообробка	Т, К	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ	ψ
			МПа		%	
Сталь 15X2МФА (II) 0,18С; 0,62Мо; 0,27Si; 0,29V; 0,48Mn; 2,58Cr; 0,019S; 0,16Ni; 0,013P; 0,011Ti	Гартування з 1273 К 6 год. в олії, відпуск	293	900	1000	15,8	39,2
		623	790	878	10,0	56,1
Сталь 15X2МФА (III) Хімічний склад той самий	Гартування з 1273 К 4 год. в олії, відпуск 6 год. (одноразовий) при 893 К	77	1440	1590	3,1	2,9
		293	1100	1160	16,6	67,2
		473	956	1016	15,6	67,2
		623	880	970	15,2	54,0

На рис. 2 подано загальний вигляд діаграм деформування за різних режимів навантаження.

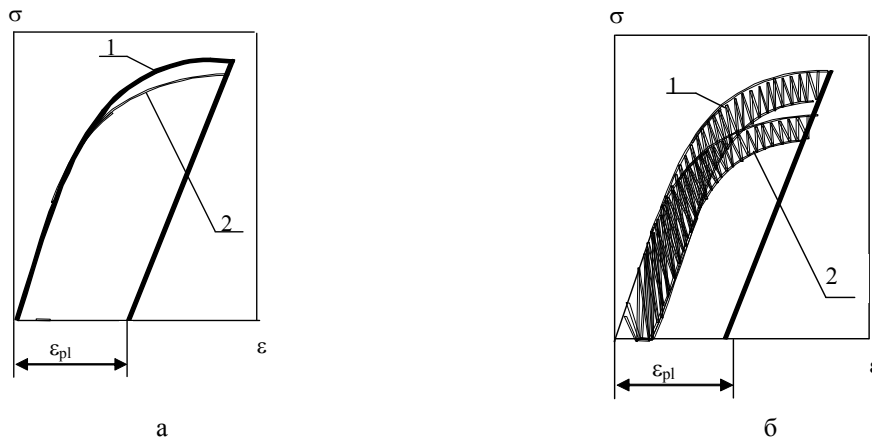


Рисунок 2 - Загальний вигляд діаграм деформування за розтягу – а і комбінованого розтягу – б при 423К – 1 і 623К - 2

Діаграма деформування сталі 15X2МФА при температурі 423 К зміщується вгору у порівнянні з діаграмою деформування при 623 К як при розтязі, так і при комбінованому розтязі.

Вплив параметрів циклічного навантаження. Вплив параметрів навантаження на діаграми деформування досліджували на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм і 8 мм із сталі 15X2МФА(III) і 15X2МФА(II).

Комбінований розтяг знижує поточне напруження сталі у двох структурних станах порівняно з розтягом за однакової деформації (рис. 3).

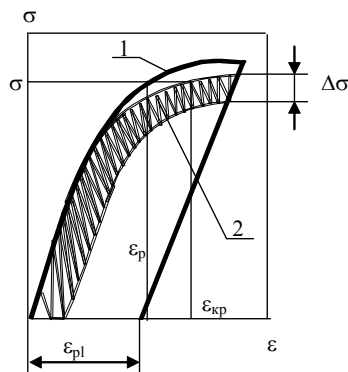


Рисунок 3 - Схеми навантажування: 1 –розтяг, 2 – комбінований розтяг (розтяг з накладанням циклічної складової)

На рис. 4 подано діаграми деформування сталі 15Х2МФА(III) за різних режимів навантаження.

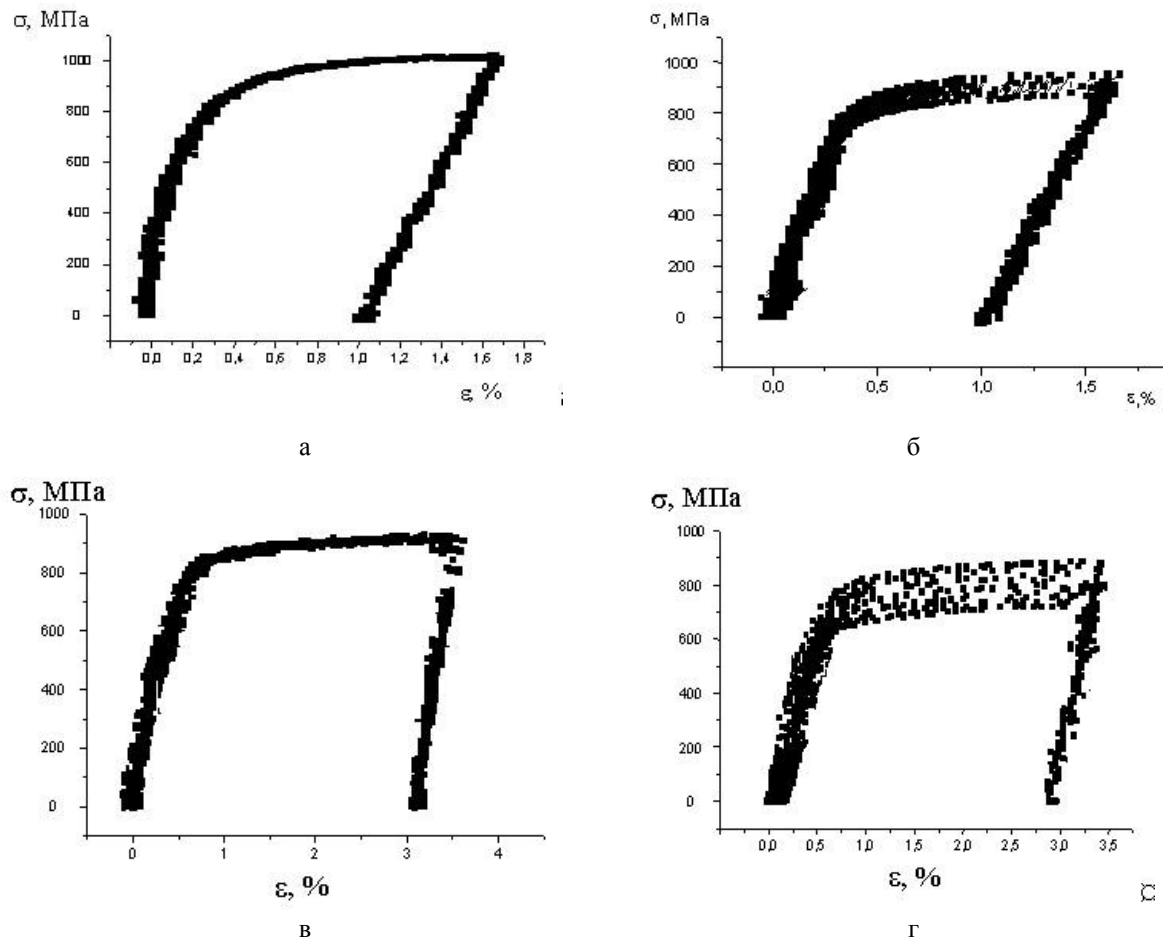


Рисунок 4 - Діаграми деформування сталі 15Х2МФА(III) за температури 623К до 1,0% – а, б та сталі 15Х2МФА(II) за температури 623К до 3,0% – в, г при розтязі – а, в і комбінованому розтязі – б, г

Виявлено, що комбінований розтяг при високих температурах (623К) суттєво знижує значення напружень на діаграмах деформування для сталі 15Х2МФА у двох структурних станах, які моделюють радіаційне окрихчення корпусу реактора на середину і кінець розрахункового терміну експлуатації.

На рис. 5 подано залежність $\sigma_{0,2}$ від розмаху напружень за температури деформування 423 і 623К.

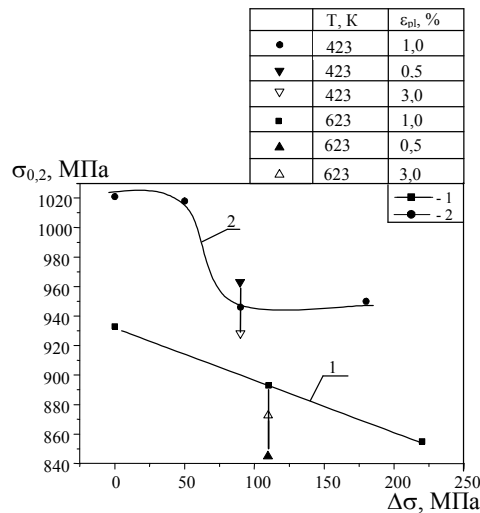


Рисунок 5 - Залежність $\sigma_{0,2}$ від розмаху напружень при температурі деформування 623К (1) і 423К (2)

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

Для опису процесу інтенсифікації пластичної деформації за комбінованого розтягу запропоновано безрозмірний параметр $\Delta\bar{\varepsilon} = \Delta\varepsilon / \varepsilon_p$ ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{кр} - \varepsilon_p$, $\varepsilon_{кр}$ і ε_p – пружно-пластична деформація відповідно при деформації комбінованим розтягом і розтягом при одному і тому ж значенні напружень).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що комбінований розтяг істотно збільшує пластичну деформацію $\Delta\varepsilon$ за однакових напружень (рис. 6 а). Більш істотне зростання $\Delta\varepsilon$ під дією комбінованого навантаження спостерігається при температурі 623К порівняно із 423К.

Із збільшенням напруження комбінованого пластичного деформування параметр $\Delta\bar{\varepsilon}$ зростає як при 623К (2), так і при 423К (1) (рис. 6 б), однак слід зауважити, що більш стрімке зростання спостерігається за температури деформування 623К.

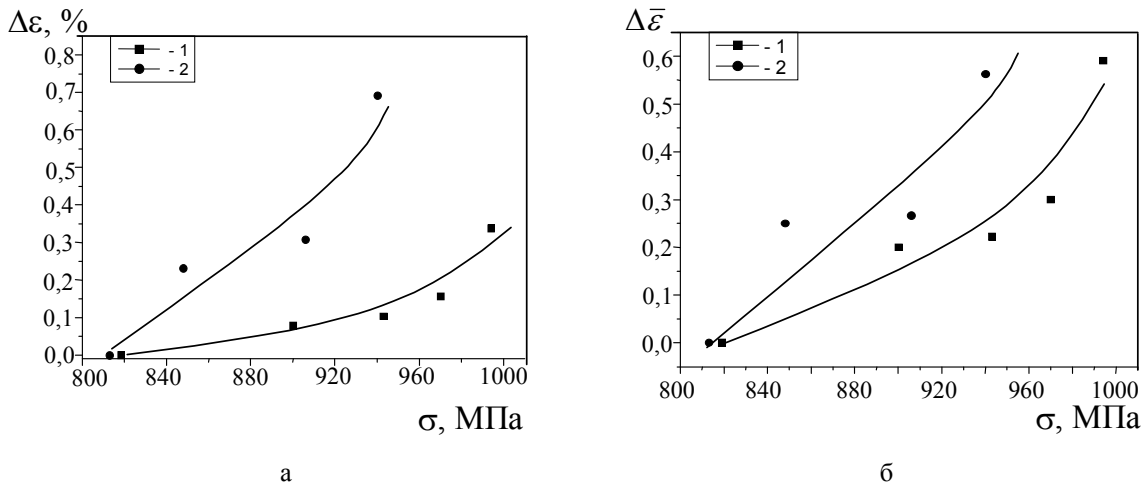


Рисунок 6 - Залежність $\Delta\varepsilon$ (а) і $\Delta\bar{\varepsilon}$ (б) від напруження комбінованого пластичного деформування при $T = 423K$, $\varepsilon_{pl} = 1,0\%$ (1) та при $T = 623K$, $\varepsilon_{pl} = 3,0\%$ (2)

На рис. 7 подано залежність розмаху напружень за комбінованого розтягу сталі 15Х2МФА від показника деформаційного зміцнення.

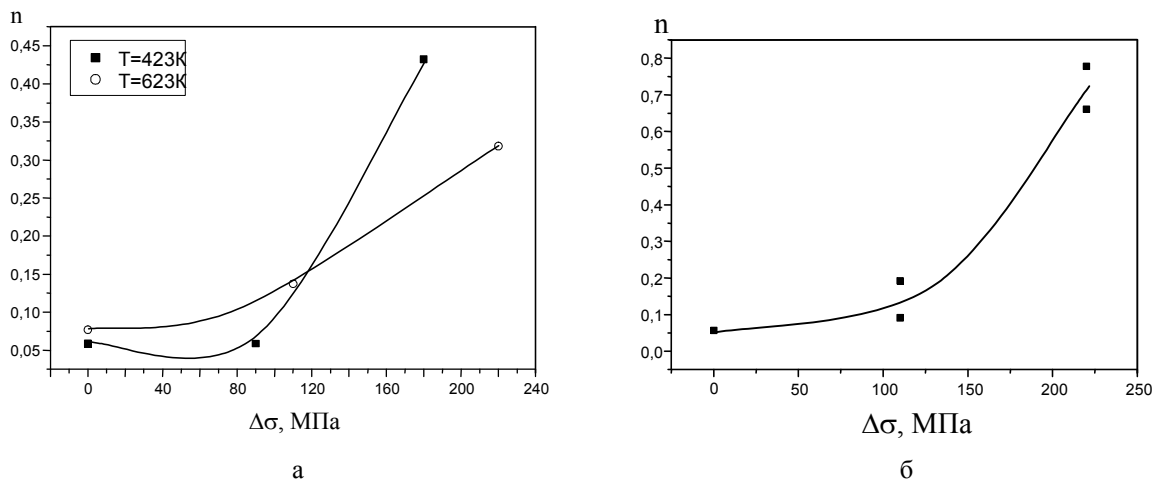


Рисунок 7 - Вплив розмаху напружень при пластичному деформуванні сталі 15Х2МФА(III) – а і сталі 15Х2МФА(II) – б на показник деформаційного зміцнення

Збільшення розмаху напружень за комбінованого розтягу до 110 МПа збільшує показник деформаційного зміцнення сталі в обох структурних станах (рис. 7). Проте подальше збільшення розмаху напружень до 220 МПа також збільшує n , однак більш стрімко для сталі 15X2МФА(II) у порівнянні із сталлю 15X2МФА(III), що зумовлено деформаційним зменшенням сталі.

Вплив наводнювальних середовищ. Відомо, що внаслідок опромінення матеріалу корпусу реактора збільшується вплив адсорбованого водню на пластичність, тобто матеріал швидше переходить до крихкого стану. Джерелами наводнювання матеріалу, зокрема корпусів атомних реакторів, є водень, який утворюється внаслідок електрохімічних реакцій, а також водень металургійного і технологічного походження.

Вплив наводнювальних середовищ на діаграми деформування сталі 15X2МФА(II) досліджували на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм і довжиною робочої зони 20 мм.

Виявлено, що границя текучості $\sigma_{0,2}$ сталі 15X2МФА(II) більша за розтягу у порівнянні з комбінованим розтягом для наводненого і ненаводненого матеріалу. Водень на 10 % зменшує границю текучості порівняно з ненаводненим матеріалом як за розтягу, так і комбінованого розтягу (рис. 8). Треба зазначити, що комбінований розтяг зменшує границю текучості як наводненої, так і ненаводненої сталі у порівнянні з розтягом.

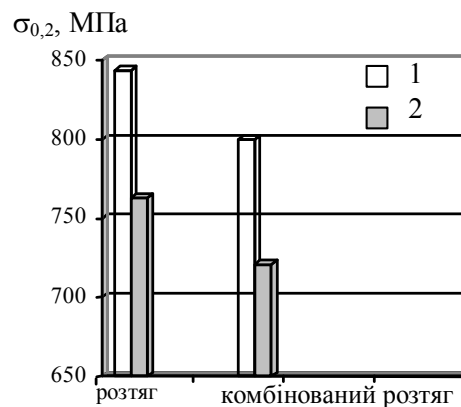


Рисунок 8 - Величина границі текучості ненаводненої (1) і наводненої (2) сталі 15X2МФА(II) за розтягу та комбінованого розтягу ($\Delta\sigma = 110$ МПа, $f = 25$ Гц, $T = 623$ К)

Отже, водень і комбіноване навантаження загалом зменшують границю текучості сталі 15Х2МФА(II).

На рис. 9 наведено діаграми деформування розтягом і комбінованим розтягом електролітично наводнених зразків із сталі 15Х2МФА(II).

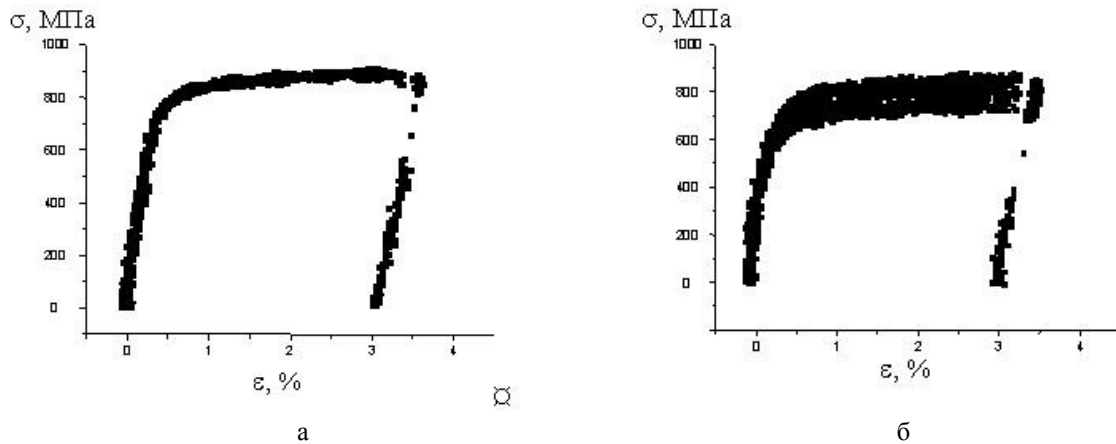


Рисунок 9 - Діаграми деформування наводнених зразків із сталі 15Х2МФА(II) за температури 623К до $\varepsilon_{pl} = 3,0\%$ за розтягу – а і комбінованого розтягу – б

Для того, щоб наводнений зразок здеформувати розтягом до $\varepsilon_{pl} = 3,0\%$ при температурі 623К, потрібно прикласти напруження 903 МПа, в той час як для аналогічного здеформування зразка за комбінованого розтягу достатньо прикладених напружень в 875 МПа (рис. 9).

Також слід зауважити, що за однакових умов деформування значення напружень залишаються дещо нижчими для наводненого зразка як за розтягу, так і за комбінованого розтягу.

Отже, присутність водню під час пружно-пластичного деформування істотно понижує рівень напружень за однакової деформації як для комбіновано розтягу, так і для розтягу у порівнянні з ненаводненим металом.

Аналіз експериментальних даних свідчить, що комбінований розтяг збільшує пластичну деформацію $\Delta\varepsilon$ за однакових напружень (рис. 10 а), а наводнювання, в свою чергу, дещо його зменшує порівнянно із ненаводненим металом. Аналогічна ситуація спостерігається для залежності $\Delta\bar{\varepsilon}$ від напружень. Тобто наводнювання також дещо понижує параметр $\Delta\bar{\varepsilon}$.

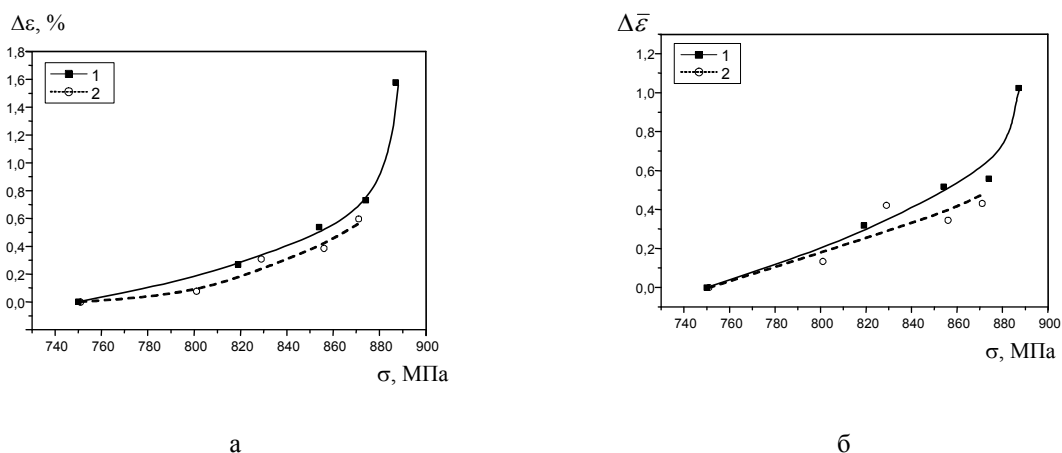


Рисунок 10 - Залежність $\Delta\varepsilon$ (а) і $\Delta\bar{\varepsilon}$ (б) від напруження комбінованого розтягу при $T = 623\text{K}$, $\varepsilon_{pl} = 3,0\%$ ненаводненої (1) і наводненої (2) сталі 15Х2МФА(II)

На рис. 11 наведено графік впливу водню на показник деформаційного зміцнення n сталі 15Х2МФА(II).

Присутність водню приблизно на 16 % знижує показник деформаційного зміцнення за деформування до 3,0 % і на 35 % знижує при деформуванні до 1,0 %. Тобто можна зробити висновок, що електролітичне наводнювання зменщує сталь 15X2МФА(II).

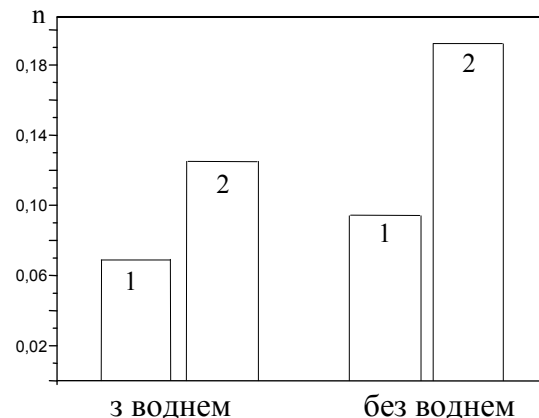


Рисунок 11 - Вплив електролітичного наводнення на показник деформаційного зміцнення при рівні пластичної деформації 3,0 % - 1 і 1,0 % - 2

Із збільшенням пластичної деформації (рис. 11) показник деформаційного зміцнення досліджуваної сталі зменшується.

Висновки

1. Деформування комбінованим розтягом при температурі 623 К зменшує границю текучості наводненої і ненаводненої теплостійкої сталі 15X2МФА(II) у стані, що моделює радіаційне окрихчення корпусу реактора типу ВВЕР на середину терміну експлуатації. Наводнювання приблизно на 10 % зменшує границю текучості сталі 15X2МФА(II) порівняно з ненаводненим матеріалом як за статичного, так і комбінованого розтягу.
2. Присутність водню під час пластичного деформування істотно понижує рівень напружень і збільшує показник деформаційного зміцнення сталі 15X2МФА(II) за розтягу і комбіновано розтягу порівняно з ненаводненим металом.

Література

1. Бреславський Д.В. Розробка методу розрахунку повзучості та довготривалої міцності циклічно навантажених елементів машинобудівних конструкцій: Автореферат дисертації доктора техн. наук: 05.02.09 / Харківський держ. політехн. універс. - Харків, 1999. -34с.
2. Бреславський Д. Рівняння стану повзучості металевих матеріалів за умов швидкого циклічного навантаження // Вісник Тернопільського державного технічного університету. -1998. - Том 3, число 1. -С. 32-38.
3. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. -СПб: Политехника, 1993. -391с.
4. Eckert R., Laird C., Bassani J. // Matls. Sci. Engng. -1987. -№91. -P.41.
5. Lukas P., Kunz L. Effect of vibration on creep behaviour of CMSX single crystal // Materials Science of Engineering. -1996. -A214. -P.167-169.
6. Lukas P., Kunz L. and Sklenicka V. Interaction of high cycle fatigue with high temperature creep in two creep-resistant steels // Materials Science of Engineering. -1990. -№129. -P.249-255.
7. Lukas P., Kunz L. and Sklenicka V. Interaction of High Cycle Fatigue with High Temperature Creep // Strength of Materials. -1994. -P.17-24.
8. Sankaka R., Schiffers H., Shuster H. Influence of time and temperature dependent processes on strain controlled low cycle fatigue behaviour of alloy 617/K // Met.Trans. -1989. - 19A, №2. -P.359-371.
9. Sklenicka V., Lukas P., Kunz L. Behaviour of defects at high temperatures // Mechanical Eng. Publication. - London. -1993. -P.27-32.
10. Vasina R., Lukas P., Kunz L. and Sklenicka V. Interaction of High Cycle Fatigue and Creep in 9%Cr-1%Mo Steel at Elevated Temperature // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. -1995. -Vol.18, №1. -P.27-35.
11. Wang Z., Rahka K. and Laird C. // Fatigue Fract. Engng. Matls. Struct. - 1986. -№9. -P.219.

12. Wolf H., Schiessel M. and Blum W. // Proc. 7-th Int. Conf. on the Strength of Metals and Alloys. –Montreal, 1985. -Vol.1. -P.607.
13. Пат. № 23231А, МКВ F16L57/00. Україна. Спосіб підвищення стійкості елементу конструкції до поширення тріщин / П.В. Ясній, В.Ю. Подкользін, Я.О. Ковальчук (Україна). - № 96072851; Заявл. 16.07.96; Опубл. 19.05.98.
14. Ясній П.В., Галушак М.П. Методика і деякі результати дослідження впливу циклічного навантажування на діаграми деформування сплаву АМг6 // Вісник Тернопільського державного технічного університету. -1998. –Т. 3, № 4. -С. 62-66.
15. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І. Мікромеханізми руйнування сплаву АМг6 в умовах повзучості і короткотермінового розтягу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. -2000. - Том 5, № 1. -С.6-11.
16. Ясній П. В., Окіпний І. Б. Вплив попередньої пластичної деформації на напруження сколювання// Збірник наукових праць “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій”, За заг. ред. Андрейківа О. Є., Лучка Й. Й., Божидарніка В.В. – Львів: Каменяр, 2005. Випуск 6. – С.409-415.
17. Цирульник О., Окіпний І. Вплив водню і пластичної деформації на напруження сколювання теплостійкої сталі // Вісник Тернопільського державного технічного університету—2006.— Т 11, №1. - С. 5-11.
18. РД-50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
19. МК 163-37-75. Методы контроля. Определение параметра вязкости разрушения при плоской деформации. – М.: ВИЛС, 1975.

Одержано 26.01.2009 р.