

МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.192.46

П.Ясній, докт.техн.наук; В.Гуцайлук, канд.техн.наук; П.Пшоняк
Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ

Описано методику і результати дослідження впливу попереднього термомеханічного навантаження (ПТН) на опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі. Суть комбінованого ПТН полягає у накладанні додаткової циклічної складової на сходиці статичного навантаження. Компактні зразки товщиною 19 мм випробовували при позацентровому розтягові за схемою нагрів — навантаження — розвантаження — охолодження — руйнування. Виявлено, що комбіноване ПТН при 623 К до 26% підвищує опір крихкому руйнуванню сталі 15Х2МФА при 293 К у порівнянні із статичним перевантаженням. Отримані експериментальні результати порівнюються з розрахунковими за моделлю Г.Челла.

Умовні позначення

- $ПТН$ – попереднє термомеханічне навантаження;
 $КІН$ – коефіцієнт інтенсивності напружень;
 $РВТ$ – розкриття вершини тріщини;
 K_I – КІН при перевантаженні;
 $\bar{K}_I = K_I / K_{Ic}$ – відносний КІН при перевантаженні;
 ΔK – розмах КІН при перевантаженні;
 K_{Ic} – в'язкість руйнування при статичному навантаженні;
 K_f – критичний КІН після ПТН;
 $\bar{K}_f = K_f / K_{Ic}$ – безрозмірний критичний КІН після ПТН;
 K_{f}^s – критичний КІН після статичного ПТН;
 K_{f}^c – критичний КІН після комбінованого ПТН.

Опір крихкому руйнуванню ферито-перлітних сталей і, зокрема, матеріалів корпусів атомних реакторів типу ВВЕР може бути підвищений шляхом попереднього термомеханічного навантаження (ПТН), яке полягає у статичному навантажуванні конструкції при певній температурі, що перевищує температуру в'язко-крихкого переходу з наступним повним або частковим розвантаженням [1-5].

Вірогідно, що вперше вказаний метод був запропонований в праці Nicholisa R.W. та ін. у 1968 році [1]. Пізніше цю проблему досліджували Harrison T.C.[2], Chell G.G., Vitek V. [3], Loss F.I. [4], McGowan J.J. [5]. Ці і наступні їх публікації присвячені дослідженням впливу температурно-силових параметрів перевантаження на ефект ПТН та розробці моделей методів оцінки впливу ПТН на крихку міцність конструкційних сталей.

Окремі праці були присвячені стійкості ефекту ПТН під дією експлуатаційних факторів [6-8], зокрема впливу величини в'язкого підростання тріщини [9-12], витримки при високих температурах [6,12] та впливу циклічного навантаження після ПТН [8,9,13,14].

Загалом при випробуванні лабораторних зразків з тріщинами були отримані обнадійливі результати. Теоретичні розрахунки показували зростання критичного КІН при статичному навантаженні після ПТН K_f у 2...5 разів порівняно з в'язкістю руйнування K_{Ic} [15], що було підтверджено результатами випробувань на лабораторних

зразках, зокрема, корпусних теплостійких сталей і їх зварних швів товщиною 25...150 мм [8,11,12,14]. Однак даний метод виявився малоприматний для застосування на реальних конструкціях, оскільки для його здійснення необхідні навантаження, вищі допустимих для даних конструкцій. Одним з перспективних, хоча і трудомістких, методів реалізації ПТН на корпусах реакторів є термомеханічне перевантаження [16].

Відомо, що підвищення опору матеріалів крихкому руйнуванню після ПТН в загальному випадку обумовлено наведенням системи залишкових стискаючих напружень, затупленням вершини тріщини і деформаційним зміцненням матеріалу перед вершиною тріщини [15].

На основі попередніх досліджень було виявлено, що основними чинниками підвищення опору крихкому руйнуванню сталей корпусів атомних реакторів типу 15Х2МФА та їх зварного шва 10ХМФТ після ПТН є притуплення вістря тріщини та залишкові стискаючі напруження [8,12,14]. Причому для основного металу і зварного шва, після термообробки, що моделює радіаційне окрихчення матеріалу на кінець терміну експлуатації корпусу реактора типу ВВЕР – 440, основним чинником підвищення опору крихкому руйнуванню є притуплення вістря тріщини [8,12,14].

Авторами запропоновано спосіб підвищення ефективності методу попереднього термомеханічного навантаження, який полягає в тому, що на сходявці перевантаження додатково до статичного розтягу накладається низькоамплітудна циклічна складова [17,18].

Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів комбінованого ПТН (амплітуди і частоти перевантажування) на залишкове розкриття вершини тріщини і опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі.

Методика дослідження. Вплив комбінованого ПТН на опір крихкому руйнуванню досліджували при позакентровому розтязі компактних зразків (рис. 1,а) товщиною 19 мм на електрогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 з керуючим ПК типу ІВМ.

Попередньо на всіх зразках вирощували первинні втомні тріщини при коефіцієнті асиметрії циклу навантажування $R = K_{min}/K_{max} = 0,1$, частоті навантажування 50 Гц згідно з рекомендаціями [18] (тут K_{min} , K_{max} – найменший і найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень, КІН). Відносна довжина первинної тріщини становила 0,45 ... 0,55b (тут b — ширина зразка).

Упродовж ПТН і при випробуванні на тріщиностійкість вимірювальні величини зусилля (P), розкриття берегів тріщини поблизу вершини тріщини (δ) і розкриття берегів тріщини надрізу записували на двокоординатний самописець і запам'ятовуючий пристрій.

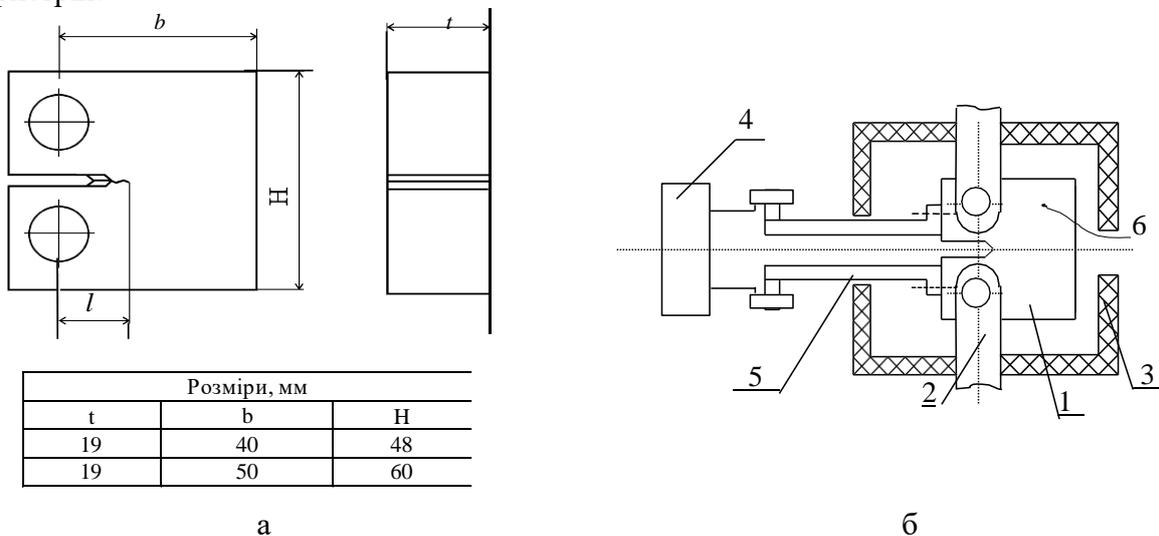


Рис. 1 Компактний зразок для випробування на тріщиностійкість при позакентровому розтязі: а; схема вимірювання берегів тріщини і нагріву зразка; 1 – зразок, 2 – захоплювачі, 3 – піч, 4 – тензометр, 5 – подовжувачі, 6 – термопара - б

При випробуванні в діапазоні температур 423...623 К зразок 1 із захоплювачами 2 поміщали в роз'ємну електронагрівну піч 3, закріплену на колонах випробувальної машини (рис. 1,б). Розкриття берегів надрізу вимірювали за допомогою тензметра 4, який під'єднували до торців зразка через подовжувачі 5.

Температуру вимірювали і регулювали з допомогою термопари 6. Після ПТН і охолодження до кімнатної температури зразок знімали з випробувальної машини. З допомогою металографічного мікроскопа типу МІМ-10 вимірювали залишкове розкриття берегів тріщини на обох поверхнях зразка на різній віддалі від її вершини. Похибка вимірювання не перевищувала 0,001 мм.

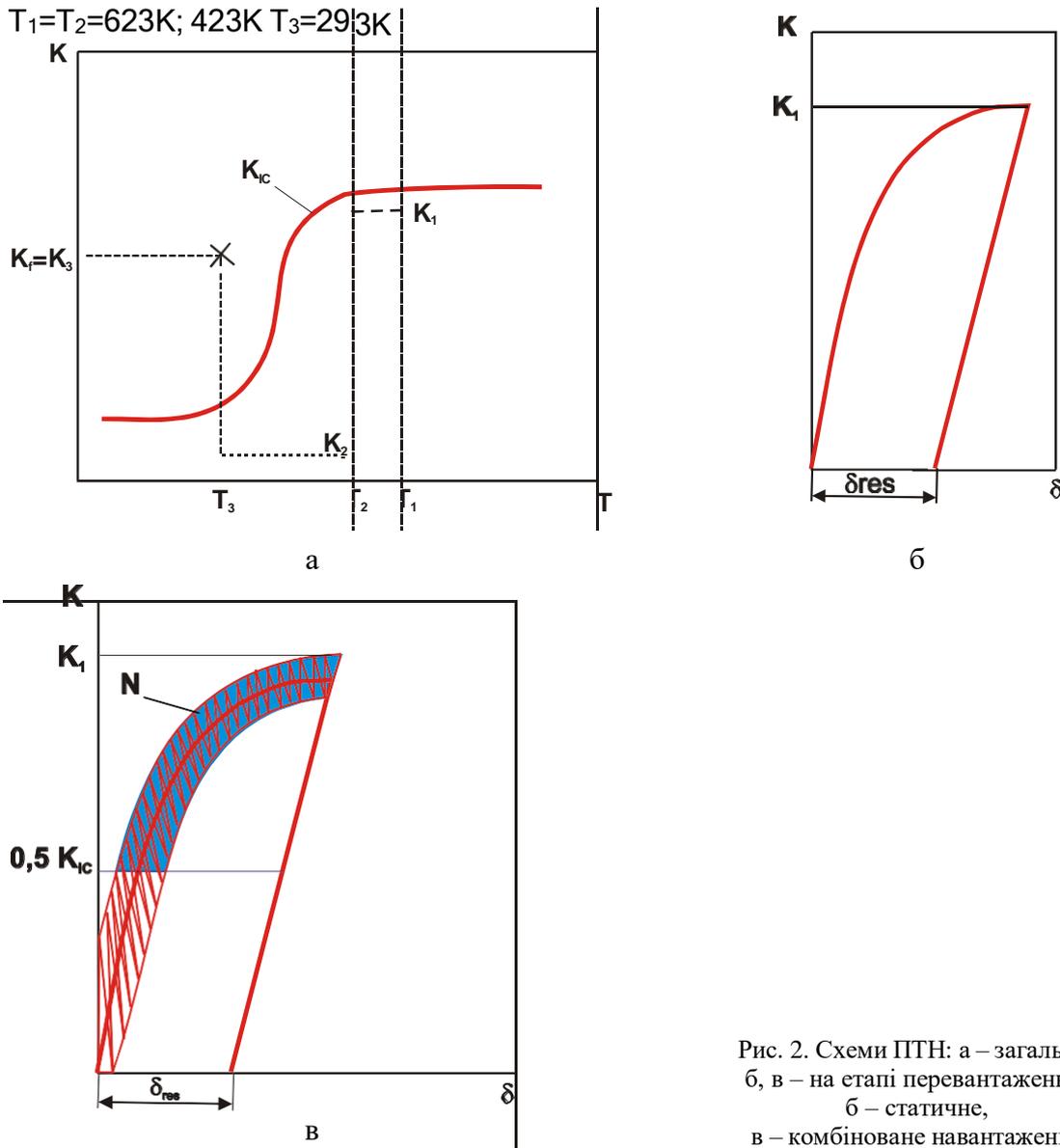


Рис. 2. Схеми ПТН: а – загальна; б, в – на етапі перевантаження: б – статичне, в – комбіноване навантаження

Оскільки в попередніх дослідженнях не було виявлено істотного впливу величини розвантаження K_2 на ефект ПТН для корпусних теплостійких сталей, в наших дослідженнях була використана схема ПТН з повним розвантаженням $K_2 = 0$ (рис. 2,а). Зразок нагрівався до температури $T_1 > T_{ок}$ і навантажувався до рівня $K_1 < K_c(T_1)$ ($K_c(T_1)$ – критичний КІН матеріалу при температурі T_1) потім повністю розвантажувався, охолоджувався до температури $T_2 = 293$ К і при цій температурі руйнувався при навантаженні $K = K_f$ (K_f – критичний КІН матеріалу при температурі $T_2 = 293$ К після ПТН).

При комбінованому ПТН на сходинці перевантаження до $K=K_I$ на розтяг накладали циклічне навантаження з розмахом КІН $\Delta K=K_{max}-K_{min}$, рис. 2,в (тут K_{max} , K_{min} — найбільший і найменший КІН циклу навантаження).

Результати дослідження та їх обговорення. Досліджували вплив параметрів комбінованого ПТН (амплітуди і частоти навантажування) на деформівний стан і тріщиностійкість корпусної теплостійкої сталі 15Х2МФА після термообробки, що моделює радіаційне окрихчення матеріалу на кінець терміну експлуатації корпусу реактора типу ВВЕР – 440.

Хімічний склад, режими термообробки і характеристики механічних властивостей сталі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад, режими термообробки і характеристики механічних властивостей сталі

Матеріал, склад, %	Термообробка	T, К	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
			МПа		%	
Сталь 15Х2МФА (П): 0,18С; 0,62Мо; 0,27Si; 0,29V; 0,48Mn; 2,58Cr; 0,019S; 0,16Ni; 0,013P; 0,011Ti	Гартування з 1273К 4 год. в олії, відпуск 6 год. (одноразовий) при 893К	77	1440	1590	3,1	2,9
		183	1160	1250	14,2	54,0
		293	1100	1160	16,6	67,2
		373	1040	1110	15,7	65,8
		473	956	1020	15,6	67,4
		623	880	970	15,2	65,2

Температура крихкості сталі 15Х2МФА $T_{k0}=393$ К [20].

Параметри ПТН наведені в таблиці 2. Відносний КІН при перевантажуванні складав 0,85 при температурі перевантажування 623К і 0,67, 0,75 при 423 К. Розмах КІН змінювався в межах 10...30 МПа $\sqrt{м}$, частота навантажування при $\Delta K=10$ і 20 МПа $\sqrt{м}$ складала 25 Гц. При $\Delta K=30$ МПа $\sqrt{м}$ частоту навантажування зменшували до 15 Гц, для того щоб забезпечити швидкість навантажування, приблизно рівну швидкості навантажування при $\Delta K=20$ МПа $\sqrt{м}$.

Таблиця 2

Параметри попереднього термомеханічного навантаження

T_I , К	$K_Q^{5\%}$, МПа $\sqrt{м}$	\bar{K}_I	f, Гц	ΔK , МПа $\sqrt{м}$	N, цикл	K_f , Мпа $\sqrt{м}$
623	125,8	0,85	25	10	1475 664	136,9 141,3
623		0,85	25	20	1280 900	151,1 143,9
623		0,85	15	30	780 475	157,2 134,4
423	161,8	0,67	0	0	0	107,1
423		0,75	0	0	0	149,2
423		0,75	25	20	1050	114,9
423		0,67	15	30	435	85,6

N — кількість циклів на ділянці $0,5K_Q^{5\%}-K_I$

Залежність залишкового і усередненого залишкового розкриття берегів тріщини $\bar{\delta}_{res}$ після ПТН при 423 К від відстані до її вістря подано на рис.3. Усереднене значення залишкового розкриття берегів тріщини δ_{res} визначали за результатами замірів

залишкового переміщення берегів тріщини на лицевій δ_1 і δ_2 зворотній поверхні зразка $\bar{\delta}_{res} = (\delta_1 + \delta_2) / 2$. Розглядувані залежності мають максимум розкриття берегів тріщини на віддалі 0,1...0,5 мм від її вершини. В подальшому спостерігається незначне зменшення розкриття берегів тріщини у міру віддалення від її вістря. Така залежність, мабуть, пов'язана із особливостями розподілу залишкових стискувальних напружень, які ініціюються в околі вістря тріщини після ПТН.

На рис.4 наведено залежність відносного КІН $\bar{K}_f = K_f / K_{Ic}$ сталі 15X2МФА від розмаху КІН ΔK на етапі перевантажування при 623 К і 423 К. У більшості випадків підростання тріщини при перевантажуванні зразків було відсутнє.

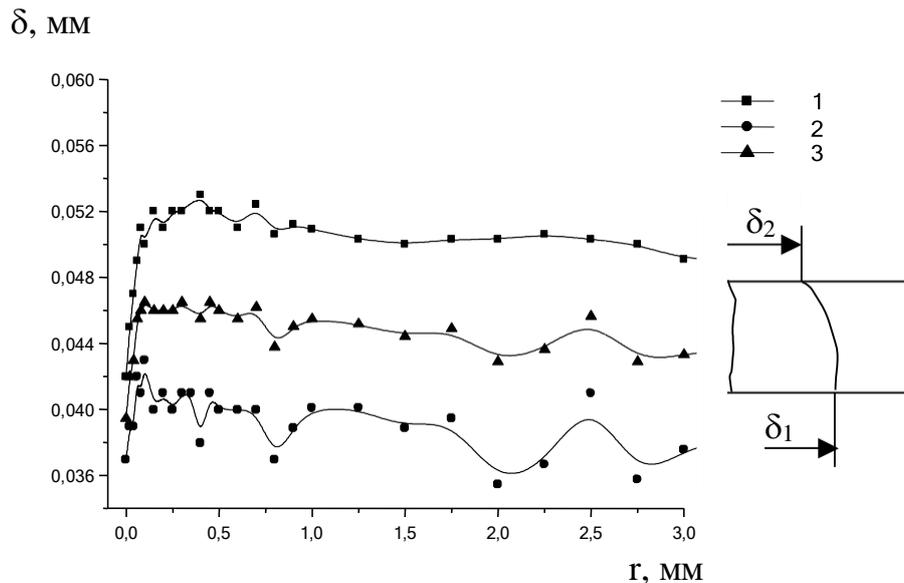


Рис. 3. Залежність залишкового розкриття тріщини в сталі 15X2МФА від віддалі до вістря тріщини після ПТН при $T_1=423$ К, $t=19$ мм, $\bar{K}_1 = 1,06$.

1 — лицева поверхня зразка $l = 22,85$ мм; 2 — зворотня поверхня зразка $l = 23,20$ мм; 3 — усереднене значення

Одночасне накладення на статичний розтяг додаткової циклічної складової при 623 К істотно (до 26%) підвищує опір крихкому руйнуванню сталі 15X2МФА у порівнянні із критичним КІН після статичного ПТН при однакових значеннях КІН \bar{K}_1 . Із збільшенням розмаху ΔK критичний КІН після перевантаження зростає і всі дані можуть бути описані єдиною залежністю. Виняток складає результат експерименту при $\Delta K=30$ МПа $\sqrt{м}$, де на етапі перевантаження в'язке підростання тріщини склало 0,63 мм. За відсутності в'язкого підростання тріщини найбільше зростання опору крихкому руйнуванню $\bar{K}_f = 2,4$ спостерігали при $\Delta K= 30$ МПа $\sqrt{м}$.

На відміну від цих результатів, накладення додаткової циклічної складової при температурі 423 К, яка близька до температури крихкості сталі, зменшує опір крихкому руйнуванню сталі 15X2МФА у порівнянні із статичним ПТН. Треба зазначити, що вказане зниження ефективності ПТН після накладення додаткової циклічної складової, порівняно із статичним перевантаженням, спостерігається для різних КІН \bar{K}_1 .

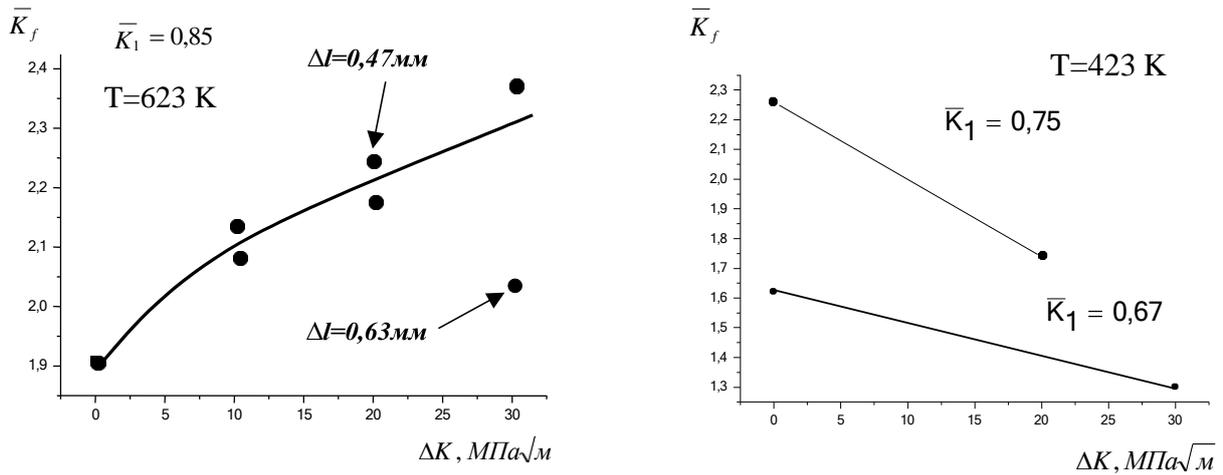


Рис 4. Залежність \bar{K}_f від ΔK при 623 К – а і 423 К – б.

Фотографії зламів компактних зразків, що випробовувались після різних режимів ПТН, приведені на рис.5.

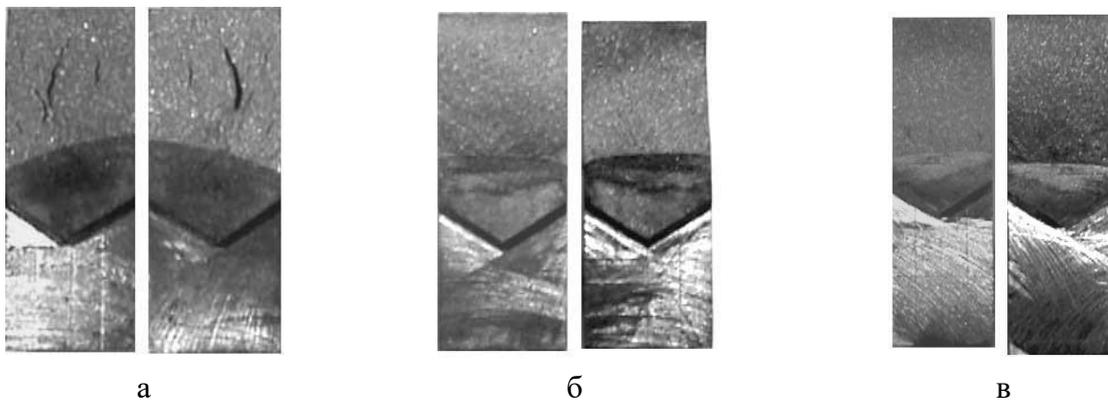


Рис 5. Поверхні руйнування компактних зразків: випробуваних після ПТН при $T=623\text{K}$ —а; б—статичне руйнування при $T=623\text{K}$, в —статичне руйнування при $T=423\text{K}$

Для зразків, що випробовувались після статичного ПТН було обчислено критичний КІН за моделлю Челла [7,15]. Результати розрахунку подано на рис. 6.

Як видно з рис. 6, для обох випадків розрахунок за моделлю Челла відображає якісні зміни критичного КІН K_f , проте дає дещо занижені дані у порівнянні з експериментом.

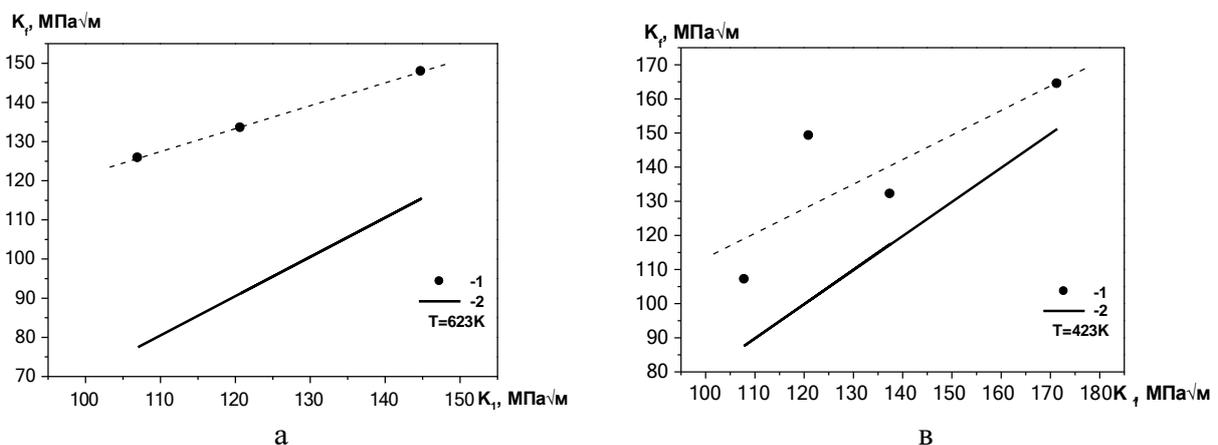


Рис 6. Залежність $K_f - K_1$ сталі 15X2MФА при температурі перевантаження: $T_I=623\text{ K}$ —а, $T_I=423\text{ K}$ —б. 1—експеримент; 2— розрахунок за моделлю Челла [7,15]

Висновки

1. Запропоновано більш ефективний у порівнянні із статичним, комбінований метод попереднього термомеханічного навантаження, який полягає у тому, що на сходинці перевантаження додатково до статичного розтягу накладається низькоамплітудна циклічна складова. Характер впливу додаткової циклічної складової при ПТН на критичний КІН сталі 15Х2МФА після термообробки, яка моделює радіаційне окрихчення на кінець терміну експлуатації, залежить від співвідношення температури попереднього навантаження і температури в'язко-крихкого переходу.
3. При температурі попереднього навантаження 623 К, яка значно вища від температури в'язко-крихкого переходу для даної сталі ($T_k=390$ К), комбіноване ПТН підвищує до 30% критичний КІН K_f сталі 15Х2МФА в порівнянні з статичним ПТН.
4. При температурі попереднього навантаження 423 К, яка близька до температури в'язко-крихкого переходу для даної сталі, комбіноване ПТН знижує критичний КІН K_f сталі 15Х2МФА в порівнянні з статичним ПТН.
5. Вплив комбінованого ПТН на критичний КІН сталі 15Х2МФА визначається двома факторами: розкриттям вершини тріщини і зміною напруження сколювання. При високій температурі (623К) у вершині тріщини ініціюється динамічна повзучість, що приводить до зростання розкриття вершини тріщини. З іншого боку, додаткова циклічна складова зменшує напруження сколювання у порівнянні з статичним навантаженням при тій самій пластичній деформації.

Робота виконана за сприяння Державного фонду фундаментальних досліджень.

The description technique and results of investigation of influence preliminary termomechanical loading (WPS) on resistance to brittle failure of heat resistance steel. The combined WPS compose overlay adding cyclical component on stage static of a loading. Compact specimens by thickness of 19 mm investigation at eccentric a tension under the scheme: heat - loading — unloading — cooling — fracture. Is detected, that combined WPS at 623 K up to 26 % increases resistance to brittle failure of steel 15Ch2MFA at 293 K in comparison with a static loading. The obtained experimental results are compared with calculated behind model of Chell.

Література

1. Nichols R.W., Kienzler R. and Nagel G. The use of overstressing technique to reduce the risk of subsequent brittle fracture. Part.1// British Welding J.-1968, Vol. 15-P.21-42, 75-84.
2. Harrison T.C., Fearnough G.D. The influence of warm-prestressing on the brittle fracture structure containing sharp defects// J. Basic Engineering.-1972.-June.-P.373-376.
3. Chell G.G., Vitek V.//Int. J. of Fract.-1977.-13.-P.882-886.
4. Loss F.I., Gray R.A., Hawthorne I.R. Significance of warm prestress to crack initiation during thermal shock//Nucl. Eng. Design.-1978.-46, No2.- P.395-408.
5. McGowan J.J. Application of warm prestressing effects to fracture mechanics analyses of nuclear reactor vessel during severe thermal shock//Nucl. Eng. Design.-1979.-51.-P.431.-444.
6. Katz Y., Bussiba A., Mathias H. Effect of warm prestressing on fatigue crack growth curves at low temperatures/Proc. Symp. Fatig. Low Temperatures.-Louisville,1985.-P.191-209.
7. Kotilainen H. The estimation of the beneficial effect of a warm-prestress during the emergency cooling of a nuclear pressure vessel/Proc. KTM/GKAE Seminar.- Moscow, 1983.
8. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинозривкість/ Львів: Світ, 1998. – 292 с.
9. Chongya Y.,Mingao Y. A calculation of threshold stress intensity range for fatigue crack prorogation in metals//Fatigue Fract. Eng. Mater. and Struct.-1980.-3.-P.189-192.
10. Hedner G. Influence of superimposed fatigue loads on the effect of warm prestressing//Adv. Fract. Res. Prepr.: Proc. 6th Int. Conf. Fract.-Oxford: Pergamon Press,1984.-4.-P.1975-1982.
11. Трощенко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г. Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщение 4. Вязкость разрушения после предварительного пластического деформирования материалов с трещинами // Проблемы прочности. – 1997. - №3. – С. 39– 53.
12. Покровский В. В., Иванченко А. Г. Влияние режимов предварительного термомеханического нагружения на повышения сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей // Проблемы прочности. – 1999. - №2. – С. 126 – 138.

13. Киселев В.А., Рывкин Е.Ю. Влияние предварительного теплового нагружения на сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению // Энергомашиностроение.-1988.-№10.-С.16-18.
14. Покровский В. В., Иванченко А. Г. Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению конструкционных теплоустойчивых сталей с трещинами. Сообщение 1. Модель и методика расчета эффекта предварительного термомеханического нагружения // Проблемы прочности. – 2002. - №6. – С. 96 – 106.
15. Chell G.G., Haigh J.R., Vitek V. A theory of warm prestressing: experimental validation and the implications for elastic plastic failure criteria// Int. J. Fract.-1981.-17, No1.-P.61-81.
16. V.V.Pokrovsky. Assessment of brittle-fracture resistance of reactor steels after thermomechanical loading under different conditions and stability of positive effect of warm prestressing. Int. Confer. Structural Integrity and lifetime of NPP equipment. Abstracts of Papers. Ed. V.T.Trochenko and V.V.Kharchenko.— Kiev, 2003.—p.97-98.
17. Ясний П.В., Підкользін В.Ю., Ковальчук Я.О. Деклараційний патент на винахід 23231А, F16L57/0 Спосіб підвищення стійкості елементу конструкції до поширення тріщин. опуб. Бюл. № 4/19.05.1998.
18. P.V.Yasniy, V.B.Hutsaylyuk, P.V.Pschonjak, Influence of mode of an overloading on semibrittle failure heat resistance steels.Int. Confer. Structural Integrity and lifetime of NPP equipment. Abstracts of Papers. Ed. V.T.Trochenko and V.V.Kharchenko.—Kiev,2003.—p.127.
19. ASTM E399-83. Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials//Annual Book of Standards.-Philadelphia:ASTM E399-83,1985.-P.547-582.
20. Трощенко В.Т., Ясний П.В., Покровский В.В. Влияние температуры испытаний на трещиностойкость конструкционных сталей//Физ.- хим. механика материалов.-1986.-№1.-С.98-106.

Одержано 15.10.2003 р.