П. Ясній, Я. Ковальчук, О. Ващенко

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН В СПЛАВІ АМг6

Досліджували вплив попереднього пластичного деформування розтягом-стиском (e=0; +0,106; -0,102) на швидкість росту втомних тріщин (РВТ) в алюмінієвому сплаві АМг6. Попередньо деформували плоскі зразки з поперечним перерізом робочої ділянки 10x24 мм і виконували бічний надріз. Швидкість РВТ визначали при одновісному розтягові з коефіцієнтом асиметрії циклу навантажування R=0,1, частотою 50 Гц.

Задача прогнозування закономірностей поширення втомних тріщин в попередньо пластично деформованих (ППД) матеріалах є актуальною у зв'язку з широким застосуванням прогресивних технологічних методів обробки матеріалів тиском. Крім того елементи конструкцій можуть піддаватися дії експлуатаційних чи аварійних статичних навантажень, в результаті яких у матеріалі виникають ділянки пластичної деформації.

Впливу попередньої пластичної деформації на характеристики циклічної тріщинотривкості матеріалів, зокрема швидкість росту втомної тріщини (РВТ), присвячено багато досліджень, наприклад, [1....10,17,18]. Встановлено, що попередня пластична деформація різним чином впливає на кінетику РВТ в залежності від виду ППД (розтяг [7-9], згин [12], прокатування [10]) , її рівня, класу матеріалу [17] тощо. Розроблено модель росту втомної тріщини, яка дозволяє прогнозувати поширення тріщини з врахуванням впливу попереднього одноразового пластичного деформування на її поширення [18]. Запропоновано класифікацію матеріалів за чутливістю швидкості РВТ до ППД, яка грунтується на схильності матеріалів до циклічного зміцнення чи знеміцнення [17].

Разом з тим не вивчене питання впливу пластичного деформування різного знаку (розтяг, стиск) на характеристики циклічної тріщинотривкості.

Метою даної роботи є дослідження впливу попередньої одноразової пластичної деформації розтягом і стиском на швидкість РВТ і спроба узагальнити запропоновану раніше [17] класифікацію матеріалів за чутливістю швидкості РВТ до ППД розтягом.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Досліджували алюмінієво-магнієвий сплав АМг6. При 293К сплав АМг6 мав такі характеристики механічних властивостей: $\sigma_{0,2}$=185 МПа, $\sigma_в$=380 МПа, δ=18%, ψ= 34%.

Вплив попередньої пластичної деформації на швидкість росту втомних тріщин досліджували за одновісного розтягування плоских зразків з бічною тріщиною, робоча ділянка яких мала поперечний переріз 10x24 мм (рис.1).

Зразки виготовляли з прокатного циліндричного прутка діаметром 32 мм. Гладкі зразки піддавали різній попередній пластичній деформації одновісним статичним розтягуванням (стискуванням). Рівень залишкової деформації після розтягу (стиску) був $e_п$=0,08; 0,106 і -0,102 і не перевершував максимальної рівномірної пластичної деформації. Після цього робили надріз, вирощували початкову втомну тріщину і досліджували швидкість РВТ. Крім того, випробуванням піддавали і зразки з недеформованого матеріалу.

Попередню пластичну деформацію визначали за формулою

$$e_п=\ln(1/1-\psi_п)\,, \qquad (1)$$

де $\psi_п={}_\Delta F/F_0$ - відносне зменшення площі поперечного перерізу робочої ділянки зразка після попереднього пластичного деформування; ${}_\Delta F$ - абсолютне зменшення площі поперечного перерізу робочої ділянки зразка після попереднього пластичного деформування; F_0 - площа поперечного перерізу зразка до деформування.

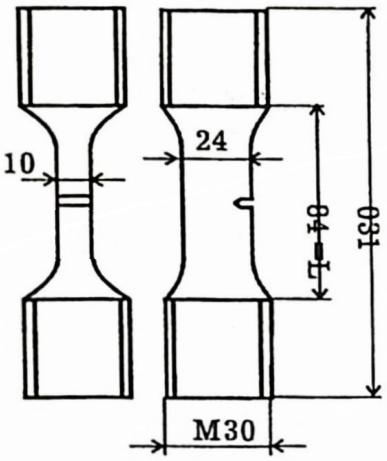

Рис.1. Зразок для випробувань із сплаву АМг6

Швидкість росту втомних тріщин в сплаві АМг6 досліджували на сервогідравлічній випробувальній машині типу СТМ-100 з керуючою ЕОМ IBM PC/AT при контрольованому розмахові зусилля з коефіцієнтом асиметрії циклу навантажування R=0,1 і температурі 293К у відповідності з рекомендаціями [11]. Частота навантажування складала 50 Гц.

Параметри закриття тріщини обчислювали за результатами запису діаграми навантаження-зміщення берегів тріщини поблизу її вістря.

Ефективний розмах КІН визначали за формулою

$$\Delta K_{eff}=K_{max}-K_{op}, \quad (2)$$

де K_{op} - КІН, при якому відбувається відкриття (закриття) вістря тріщини; K_{max} - максимальне значення КІН.

Розмах ефективного порогового КІН визначали

$$\Delta K_{th\,eff}=K_{th}-K_{th\,op}, \quad (3)$$

де K_{th} -максимальний пороговий КІН; $K_{th\,op}$ - КІН, при якому відбувається відкриття (закриття) вістря тріщини за порогового значення КІН.

При визначенні закриття тріщини в процесі випробування частоту навантажування зменшували від 50 Гц до 1 Гц. Чисельні дані зусилля - зміщення берегів тріщини біля її вістря записували на жорсткий диск ПЕОМ і оброблялись за допомогою програми OBRRUT за методикою [11].

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На рис. 2 представлені діаграми втомного руйнування (ДВР) сплаву АМг6 в недеформованому стані і після різної попередньої пластичної деформації, які описують залежність між швидкістю росту втомних тріщин (РВТ), розмахом КІН (рис.2,а) та ефективним розмахом КІН (рис.2,б).

Попередня пластична деформація стискуванням e=-0,102 збільшує швидкість росту втомних тріщин у всьому діапазоні зміни ΔK за винятком високоамплітудної ділянки ДВР. Найбільше підвищення швидкості РВТ (до 15 раз) спостерігається на припороговій ділянці діаграми.

Вплив попередньої пластичної деформації розтягуванням на швидкість РВТ в сплаві АМг6 не є однозначним. При $\Delta K<8$МПа$\sqrt{м}$ швидкість РВТ в ППД матеріалі є більша, а при $\Delta K>8$МПа$\sqrt{м}$ - менша порівняно з недеформованим матеріалом. Треба зауважити, що при однаковій за величиною, але протилежній за знаком попередній пластичній деформації, швидкість росту втомної тріщини після стиску приблизно в 6 разів більша порівняно з розтягом.

Отримані результати були проаналізовані з точки зору закриття тріщини (ЗТ). На рис. 3 приведені залежності зміни абсолютного (рис. 3,а) і відносного значень K_{op} (рис. 3,б) від розмаху КІН.

Виявлено, що ППД знижує величину K_{op}, причому після стискування цей ефект більш суттєвий, особливо для навантажень, що відповідають середній ділянці ДВР. Разом з тим на припороговій ділянці КІН K_{op} практично не чутливий до ППД (рис. 3,а)

Із збільшенням розмаху КІН (рис. 3,а) спостерігається збільшення величини K_{op}, яка може бути обумовлена дією таких чинників, як шорсткість поверхні руйнування, циклічна пластичність в околі вістря тріщини та окислення поверхні руйнування. Візуальним аналізом, а також електронно-мікроскопічними дослідженнями зламів зразків із сплаву АМг6, випробуваними на циклічну тріщинотривкість, не виявлено слідів корозії, пов'язаної з окисленням поверхні або фретінгом. Тому основними механізмами впливу на величину K_{op} є шорсткість поверхні руйнування [12], і циклічна пластичність матеріалу у вістрі тріщини. ППД розтягуванням і стисканням приводить

до зменшення КІН закриття тріщини K_{op} порівняно з матеріалом в стані постачання. Причому, при однакових за модулем рівнях ППД значніше зменшення K_{op} (до 2 разів) K_{op} спостерігається після деформування стиском.

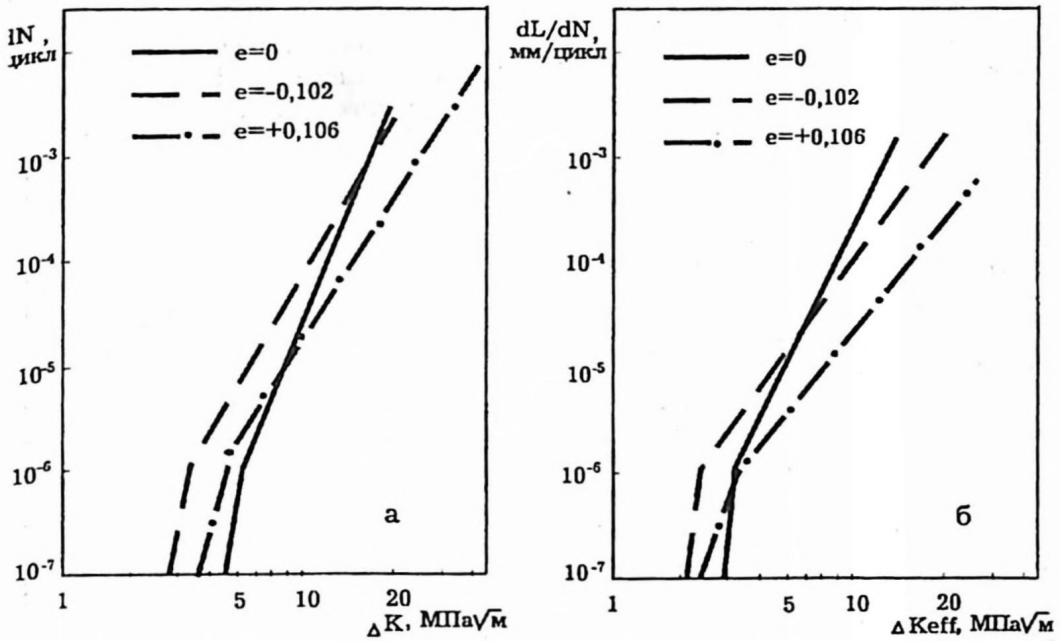

Рис. 2.ДВР сплаву АМг6 в стані постачання і після ППД.

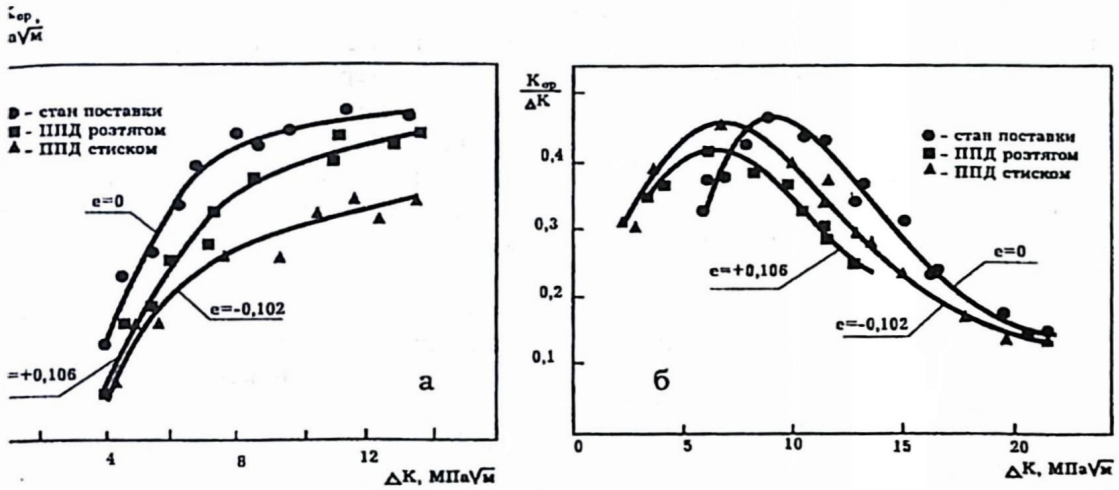

Рис.3. Вплив ППД на параметри закриття втомної тріщини.

На рис. 3,б приведені залежності $K_{op}/\Delta K=f(\Delta K)$. Для зразків деформованих розтягуванням і стискуванням отримані практично еквідистантні криві в межах досліджуваного діапазону ΔK.

На рис 2,б приведені залежності швидкості РВТ від ефективного розмаху КІН для вихідного матеріалу і після різної ППД розтягом і стиском. Характер впливу ППД різного знаку на вказані залежності приблизно такий самий, як і у випадку ДВР,

представленої в координатах V-$_{\Delta}$K.

При РВТ з швидкістю, близькою до порогової закриття тріщини, в основному зумовлене пластичністю (ЗТП) [12]. Будь-які зміни структури, що змінюють пластичність матеріалу, ведуть до такої ж зміни ЗТП. Одним із методів зміни пластичності матеріалу є попереднє пластичне деформування.

ЗТП реалізується найбільше на тих ділянках фронту тріщини, де розвиток пластичності максимальний. Ці особливості ЗТП не дають можливості достатньо точно прогнозувати кількісний вплив тих чи інших структурних факторів на ЗТП, однак дозволяють передбачити тенденції його зміни.

Таким чином, вплив ППД на швидкість РВТ не може бути опосередкований тільки через величину закриття втомної тріщини.

ППД знижує розмах порогового КІН $_{\Delta}K_{th}$ в порівнянні з недеформованим матеріалом (рис. 4). Причому, більш суттєве зниження (приблизно в 2 рази) спостерігається після стискування. Розмах ефективного порогового КІН $_{\Delta}K_{th\ eff}$ практично не залежить від попередньої деформації розтягуванням, проте знижається в 1,5 разів після ППД стискуванням $e_п$=-0,102.

Отже, як і для швидкості РВТ, вплив ППД на пороговий КІН не у всіх випадках опосередкований закриттям втомної тріщини.

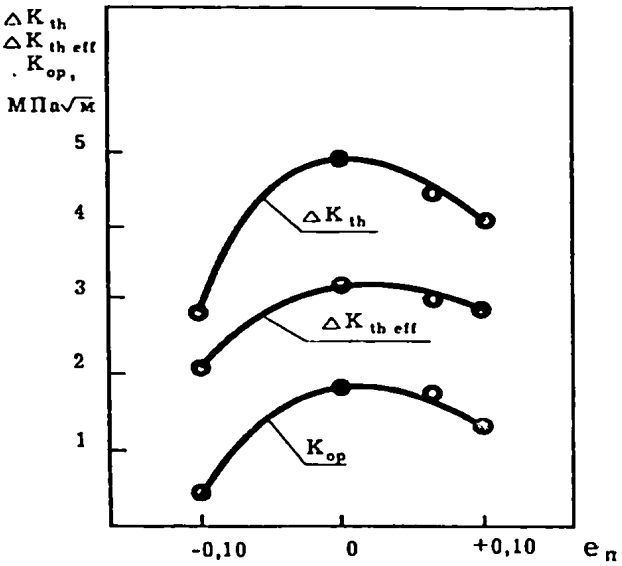

Рис.4. Вплив ППД на порогові КІН для сплаву АМг6.

У відповідністю з концепцією порогів втоми РВТ в конструкційних матеріалах супроводжується деформаційним притупленням її вістря. Величина притуплення вістря тріщини посилюється в міру зниження рівня міцності матеріалу і підвищення розмаху КІН $_{\Delta}$K [13]. Для враховування затуплення реальної тріщини, що виконує роль фактора релаксації напружень в зоні передруйнування, відомий підхід [12], згідно з яким втомна тріщина розглядається як концентратор напружень із радіусом надрізу ρ, рівним радіусу вістря затупленої тріщини. Тоді розмах напружень у вістрі тріщини за циклічного навантажування описується виразом [12].

$$_{\Delta}\bar{\sigma}_{th}={}_{\Delta}K_{th\ eff}/\sqrt{\rho_{th}}\ , \qquad (4)$$

де ρ_{th} - радіус вістря тріщини на межі витривалості.

Отримана характеристика може служити кількісним показником здатності матеріалу релаксувати напруження у вістрі тріщини.

Згідно структурної концепції [16], пороговий розмах КІН $_{\Delta}K_{th}$ містить в собі дві складових: $_{\Delta}K_{th\ cl}$, що враховує вклад ЗТ, $_{\Delta}K_{th\ eff}$, що відповідає пороговому ефективному розмаху КІН:

$$_{\Delta}K_{th}={}_{\Delta}K_{th\ cl}+{}_{\Delta}K_{th\ eff}={}_{\Delta}K_{th\ cl}+(1/\alpha)_{\Delta}\bar{\sigma}_{th}x\sqrt{\rho_{th}}\ , \qquad (5)$$

де α - коефіцієнт релаксації напружень, що враховує мікро і макрогілкування тріщини [14].

$$\alpha={}_{\Delta}K'_{th\ eff}/{}_{\Delta}K_{th\ eff}, \qquad (6)$$

де $_{\Delta}K'_{th\ eff}$ - ефективний пороговий розмах КІН ідеалізованої прямої тріщини, яка поширюється без відхилення від магістрального напрямку.

Отже, порогова тріщинотривкість металів і сплавів залежить від чотирьох опосередкованих структурою факторів: ЗТ; схильності до релаксації напружень в результаті затуплення вістря тріщини; гілкування тріщини, а також розмаху

порогового напруження $_{\Delta}\bar{\sigma}_{th}$.

На основі результатів проведених експериментів і огляду літературних даних узагальнено класифікацію матеріалів за чутливістю швидкості РВТ до ППД на випадок стискання. Результати аналізу приведені в таблиці і на рис. 5.

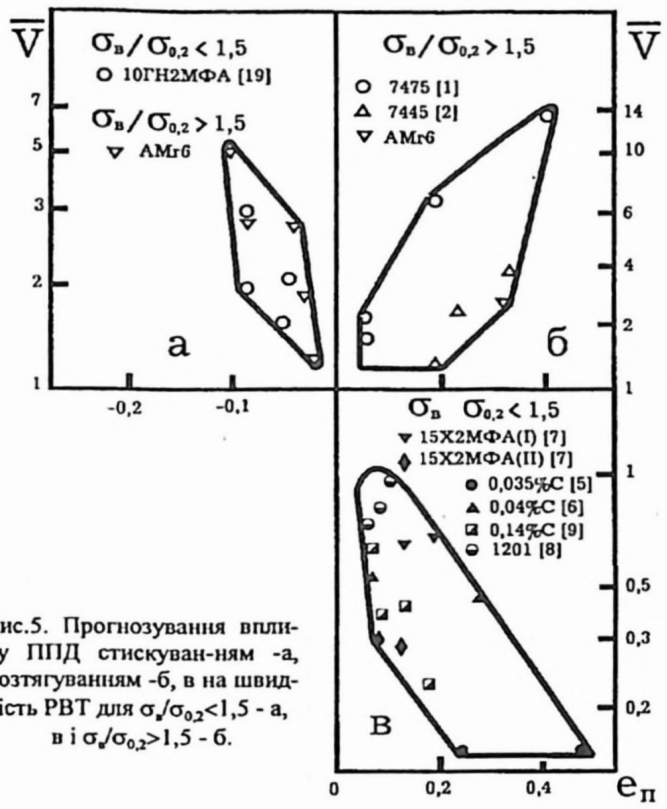

Рис.5. Прогнозування впливу ППД стискуван-ням -а, розтягуванням -б, в на швидкість РВТ для $\sigma_в/\sigma_{0,2}<1,5$ - а, в і $\sigma_в/\sigma_{0,2}>1,5$ - б.

Відносну швидкість $\bar{V}$ визначали для середньої ділянки ДВР як

$$\bar{V}=V_д/V, \qquad (7)$$

де V і $V_д$ - швидкість РВТ відповідно для матеріалу в стані постачання і після ППД.

В роботах (див. таблицю), з яких взяті дані про циклічну тріщинотривкість матеріалів, рівень ППД визначали за формулами:

- для холодного вальцювання

$$\varphi=\ln X_1/X_0, \qquad (8)$$

де X_0 і X_1 - товщина пластинки відповідно до і після вальцювання;

- для статичного розтягування:

$$_{\Delta}\varepsilon_{пр} = {}_{\Delta}a/a, \qquad (9)$$

де $_{\Delta}a$ - абсолютне видовження; а - база вимірювання;

В основу класифікації покладена схильність матеріалу до зміцнення чи зневміцнення упродовж циклічного деформування. Схильність матеріалу до зміцнення чи зневміцнення можна описати через показник степені діаграми статичного деформування або відношення межі міцності до умовного порогу текучості [14].

У відповідності з [14], матеріали, в яких $\sigma_в/\sigma_{0,2}\geq 1,4$ відносяться до циклічно зміцнювальних, $\sigma_в/\sigma_{0,2}\leq 1,2$ циклічно зневміцнювальних і $1,2<\sigma_в/\sigma_{0,2}<1,4$ циклічно стабільних. В нашому випадку взято значення $\sigma_в/\sigma_{0,2}=1,5$ за величину, яка розмежовує матеріали на циклічно зміцнювальні ($\sigma_в/\sigma_{0,2}\geq 1,5$) і циклічно стабільні і циклічно зневміцнювальні ($\sigma_в/\sigma_{0,2}<1,5$). Вказане значення близьке до величини, яка встановлена в праці [14] і витікає з аналізу даних відносної швидкості РВТ після ППД.

Зауважимо, що поділ матеріалів на циклічно зміцнювальні і циклічно зневміцнювальні є до певної міри умовним. Один і той же матеріал може зміцнюватись і зневміцнюватись в залежності від амплітуди навантажування і режиму випробувань (жорсткий чи м'який).

ППД розтягуванням збільшує швидкість РВТ для циклічно зміцнювальних матеріалів ($\sigma_в/\sigma_{0,2}>1,5$) у порівнянні із станом постачання і зменшує для циклічно зневміцнювальних матеріалів ($\sigma_в/\sigma_{0,2}<1,5$).

На відміну від деформування розтягуванням, ППД стискуванням сприяє збільшенню швидкості РВТ для всіх досліджуваних матеріалів, не залежно від їх схильності до циклічного зміцнювання чи зневміцнювання.

Таблиця

Вплив однократної пластичної деформації на циклічну тріщиностійкість при 293 К

№ п/п	Матеріал, літературне джерело	$\sigma_в/\sigma_{0,2}$	Попередня деформація			t, мм	$\bar{V}$	ΔK,	Формула для ППД
			Вид	Ступінь деформації, мм/мм	Відпал				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7475 [1]*1	1,52	- хв -"-	0 0,1 0,2	- 373К, 1 год -"-	1,0 -"- -"-	- 3,0 (3,0)*2 4,0(6,0)*2	7...36 8...40 -"-	8
2	7475 [2]	1,67	- хв -"- -"-	0 0,11 0,22 0,31	- - - -	2,5 -"- -"- -"-	- 1,1 3,0 3,5	10 -"- -"- -"-	8
3	АМг6 [3,4]	2,03	- хв -"-	0 0,30 0,45	- - -	2,3 5,0 -"-	- 2,6 13,0	12,4 -"- -"-	8
4	Сталь 0,035%С [5]	1,32	- хв -"-	0 0,25 0,50	- - -	15 -"- -"-	- 0,13 0,13	10 -"- -"-	8
5	DOCOL 450DL 0,04C; 0,04Si; 1,15Mn; 0,59Cr; 0,05A1; 0,006N; 0,005S;0,18P[6]	2,00*3	- хв -"-	0 0,05 0,20	- - -	1,1 -"- -"-	- 0,57 0,50	20 -"- -"-	8
6	15Х2МФА (I) [7]	1,21	- р -"-	0 0,092 0,132	- - -	12,5 -"- -"-	- 0,6 0,6	20 -"- -"-	1
7	15Х2МФА (II) [7]	1,09	- р -"-	0 0,052 0,078	- - -	7,05 -"- -"-	- 0,33 0,33	16 -"- -"-	1
8	Сплав 1201 [8]	1,48	- р -"- -"-	0 0,01 0,03 0,05	- 448К, 16год -"- -"-	2,5...5 -"- -"- -"-	- 0,707 0,760 0,834	15 -"- -"- -"-	9

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	Сталь В2772 0,14С; 1,5Mn [9]	-	- р -"- -"- -"- -"-	0 0,02 0,04 0,06 0,08 0,10	- - - - - -	12,5	-	-	9
10	10ГН2МФА[19]	1,27	с	-0,05 -0,10	-	12,5	1,7 2,5	20 -"-	1
11	АМг6	2,03	- р с	0 0,106 -0,102	- -	12,0 12,0	- 10,0	-	1

хв - холодне вальцювання;
р - розтягування; с - стискування;
*1 - в дужках вказано джерело, звідки взята характеристика;
*2 - дослідження проводили у вакуумі;
*3 - умовну границю текучості визначали при допуску на пластичну деформацію 0,1 %;
*4 - $R=K_{min}/K_{max}=0,3$.

ВИСНОВКИ

1. ППД розтягуванням і стискуванням збільшує швидкість РВТ в сплаві АМг6 при $_{\Delta}K$=10...14МПа$\sqrt{м}$ і зменшує швидкість РВТ при $_{\Delta}K$>14МПа$\sqrt{м}$. При однаковій абсолютній величині ППД швидкість РВТ після стиску є більшою порівняно з розтягом.

2. Після стискування спостерігається більше зниження КІН відкриття тріщини K_{op} в деформованому сплаві порівняно з матеріалом в стані постачання спостерігається після стискування.

3. Виявлено, що вплив ППД розтягуванням і стискуванням на швидкість РВТ в сплаві АМг6 не є опосередкований тільки закриттям втомної тріщини. Додатковим фактором впливу на швидкість РВТ в сплаві АМг6 (деформованому і в стані постачання) може бути затуплення вістря тріщини, яке не проявляється через K_{op}.

4. На основі отриманих результатів та літературних даних узагальнено класифікацію матеріалів щодо чутливості швидкості РВТ до попередньої деформації для випадку стискування. Згідно класифікації ППД стискуванням збільшує швидкість РВТ для всіх досліджуваних матеріалів, не залежно від їх класу (циклічно зміцнювальні, циклічно стабільні чи циклічно знеміцнювальні)

Summary: The effect of the preliminary plastic stress-strain deformation (e=0; + 0,106; - 0,102) on the fatigue crack growth rate in the aluminium alloy (AMg 6) was investigated. Flat specimens with the cross-section of the working area of 10x24 mm were preliminary deformed and the side north was mode. The rate (PBT) was found under the streth when the assynsetry coefficient of the loading cycle was R = 0,1, friguency - 50 Hz.

Література

1. 1.Shulte K., Nowack H., Lutjering G. Influence of monotonic and cyclic predeformation of high-strength aluminium alloys//Eng. Fract. Mech.-1980.- 13,N14.P.1009-1021.
2. Lindigkeit J.,Gysler A.,Lutjering G. The effect the predeformation on fatigue crack propogation behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in inert and corrosive environment//Z. Metallkde.-1981.-72,N5.-322-328.
3. Hult J.A.H., McClintock F.A. Elastic- plastic stress and strain distributions around sharp notches under repeated shear/Proc. 9-th Int. Congr. Appl. Mech., Brussels,1957.-8.-P.51-58.
4. Нешпор Г.С. Исследование кинетики и вязкости разрушения алюминиевых сплавов//Технология легких сплавов.-1974.-N5.-С.53-61.
5. Кинетика и механизм роста усталостной трещины в железе. /О.Н.Романив, Е.А.Щур, А.И.Ткач и др.//Физ.-хим. механика материалов.-1981.-17,№2.-С.57-66.
6. 6.Wassen J., Hamberg K., Karlsson B. The influence of prestrain and agening on fatigue crack growth in dual-phase steel//Scr. Metal.-1984.-N6.-P.621-624.
7. Ясний П.В. Трещиностойкость предварительно пластически деформи-рованных конструкционных сплавов: Автореф. дисерт. докт. техн. наук.- Киев, 1990.
8. Кинетика разрушения/П.Г.Микляев, Г.С.Нешпор, В.Г.Кудряшов.-М.:Металлургия, 1979.-279с.
9. Effect of cold deformation on the fatigue threshold/J. Blacktop, C.E. Nicholson, R. Brook, R. Towers//Fatigue Threshold Fundamentals and Engineering Applications.-Stockholm,1981.-P.629-638.
10. Влияние однократной предварительной пластической деформации на трещиностойкость. Сообщение 1. Скорость роста усталостных трещин в теплоустойчивой стали /В.Т.Трощенко, П.В.Ясний, В.В.Покровский, и др. //Пробл. прочности.-1988.-№12.- с. 9-14.
11. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. РД 50-345-82. М, Изд. стандартов, 1983.-96с.
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: 4т./Под общей редакцией Панасюка В.В.-Киев: Наук. думка,1988-1990.-680с.
13. Романив О.М. Структурная концепция порогов усталости конструкционных сплавов//Физ.-хим. механика материалов. -1986. №1.-С.106-116.
14. Fuhring H., Suger T. Dugdale crack closure analysis of fatigue cracks under constant amplitude loading//Eng. Fract. Mech.- 1979.-11, N1.- P.99-122.
15. Романив О.Н.,Никифорчин Г.Н., Андрусив Б.Н. Влияние закрытия и геометрии усталостных трещин на структурную чувствительность припороговой усталости сталей// Физ.-хим. механика материалов. - 1984. №1.-с.71-77.
16. Romaniv O.N., Tkach A.N., Nikiforchyn G.N. The influence of microstructure and environment on the near-threshold crack propagation in iron-based alloy//Proc. 6th Int. Symp. High purity materials in sciehce and tehnology, Dresden, May 6-10 1985.- Dresden: Zentralinstitut fur Festkorperphysik und Werkstofforschung AdW der DDR, 1985.-Vol. 3.-S. 179-195.

17. Трощенко В.Т., Ясний П.В., Покровский В.В. Влияние однократной предварительной пластической деформации на трещиностойкость. Сообщ. 2. Подход к прогнозированию скорости роста усталостных трещин // Пробл. прочности.-1988.-№12.- С. 14-18.
18. Трощенко В.Т., Ясний П.В.,Покровский В.В. Развитие трещины усталости. Сообщ. 2. Модель развития трещины.//Проблемы прочности.-1988.№10.-С. 15-20.
19. Токарев П.В. Влияние предварительного циклического пластического деформирования на трещиностойкость теплоустойчивых сталей. Автореферат кад. техн. наук. Киев, 1992