П. Ясній, Я. Ковальчук, В. Степаненко

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА МІКРОМЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ СПЛАВУ АМг6

Досліджено вплив попередньої пластичної деформації розтягом і стиском на мікромеханізми втомного руйнування сплаву АМг6. Пластична деформація стиском приводить до появи мікророзтріскувань і субборозенок в припороговій і ділянці. Стисненість пластичної деформації впливає на крок борозенок тільки для недеформованого матеріалу. Виявлено, що крок борозенок є більшим на приповерхневій ділянці в порівнянні із серединною ділянкою.

Пластичне деформування матеріалу під час виготовлення (прокатування, штампування, кування, холодна висадка і ін.) та експлуатації значно впливає на його циклічну тріщинотривкість, яка в багатьох випадках визначає довговічність елементів конструкцій.

Дослідженню впливу попередньої пластичної деформації (ППД) на швидкість росту втомних тріщин (РВТ) присвячені численні праці, наприклад, [1-5]. Проте в них, як правило, відсутній аналіз мікромеханізмів руйнування пластично деформованих матеріалів, без чого неможливо якісно обгрунтувати моделі поширення втомних тріщин і методики прогнозування довговічності елементів конструкцій.

Метою даної роботи є дослідження впливу попередньої пластичної деформації розтягом і стиском на мікромеханізми поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві АМг6. Основна увага зосереджена на механізмові втомних борозенок.

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ І МАТЕРІАЛИ

Вплив попередньої пластичної деформації на швидкість росту втомних тріщин досліджували при одновісному розтягові плоских зразків із бічною тріщиною, робоча частина яких мала поперечний переріз 10х24 мм. Гладкі зразки піддавали різним рівням попередньої пластичної деформації одновісним статичним розтягом (стиском). Рівень залишкової деформації розтягом (стиском) був e=0,08; 0,106 і -0,102. Після цього робили надріз, вирощували первинну втомну тріщину і досліджували швидкість РВТ. Крім того, випробуванням піддавали і зразки з недеформованого матеріалу.

Попередню пластичну деформацію визначали за формулою:

$$e=\ln(1/1-\psi),$$

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

Швидкість росту втомних тріщин в сплаві АМг6 досліджували на сервогідравлічній випробувальній машині типу СТМ-100 при контрольованому розмаху зусилля зчастотою 50 Гц і коефіцієнтом асиметрії циклу навантаження R=0,1 при температурі 293К у відповідності з рекомендаціями [14]. Частота навантаження складала 50 Гц. Злами зразків обстежували на електронному растровому мікроскопі при збільшеннях від х500 до х3000. Схематично злам зразка і схема обстеження показані на рис.1. Злами досліджували вздовж напрямку розвитку тріщини на приповерхневій ділянці (А-А) і в середній ділянці зразка (Б-Б).

Сплав АМг6 у відпаленому стані має близьку до зрівноваженої дрібнозернисту структуру α-твердого розчину, границі зерен якого обрамлені суцільним ланцюжком виділень β-фази. Виділення β-фази спостерігаються також і в середині зерен. Крім того, в структурі сплаву є рядкові виділення значно більших включень інтерметалідних фаз типу Al-Fe-Si-Mn-Cu [7-12].

Сплав АМг6 в стані поставлення мав такі характеристики механічних

властивостей при 293К: $\sigma_{0,2}$=185 МПа, $\sigma_в$=295 МПа, δ=18%, ψ= 34%.

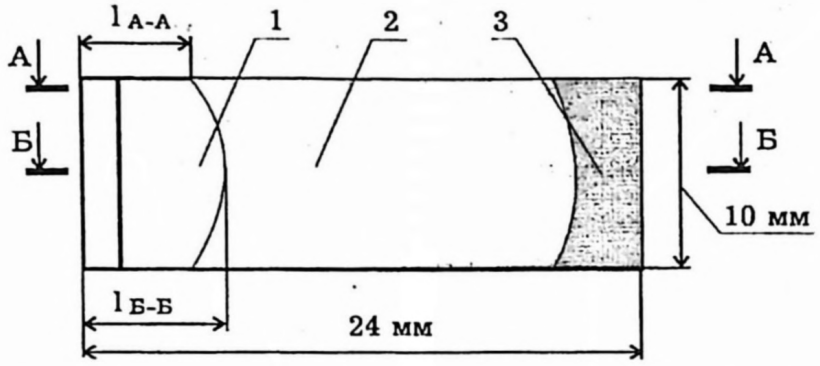

Рис. 1. Схема дослідження мікромеханізмів руйнування сплаву АМг6: 1 - надріз; 2 - ділянка поширення втомної тріщини. А-А і Б-Б - площини, вздовж яких досліджувани мікроструктуру зломів.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.

На рис. 2 подана діаграма втомного руйнування (ДВР) сплаву АМг6 в стані поставлення і після попередньої пластичної деформації, які описують залежність між швидкістю РВТ і розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень.

Попередня пластична деформація стиском (e=-0,102) збільшує швидкість росту втомних тріщин у всьому діапазоні зміни $_{\Delta}K$ за виключенням високоамплітудної ділянки ДВР. Найбільш значне підвищення швидкості РВТ (в 15 разів) спостерігається на припороговій ділянці діаграми. Вплив попередньої пластичної деформації розтягом 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. 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.

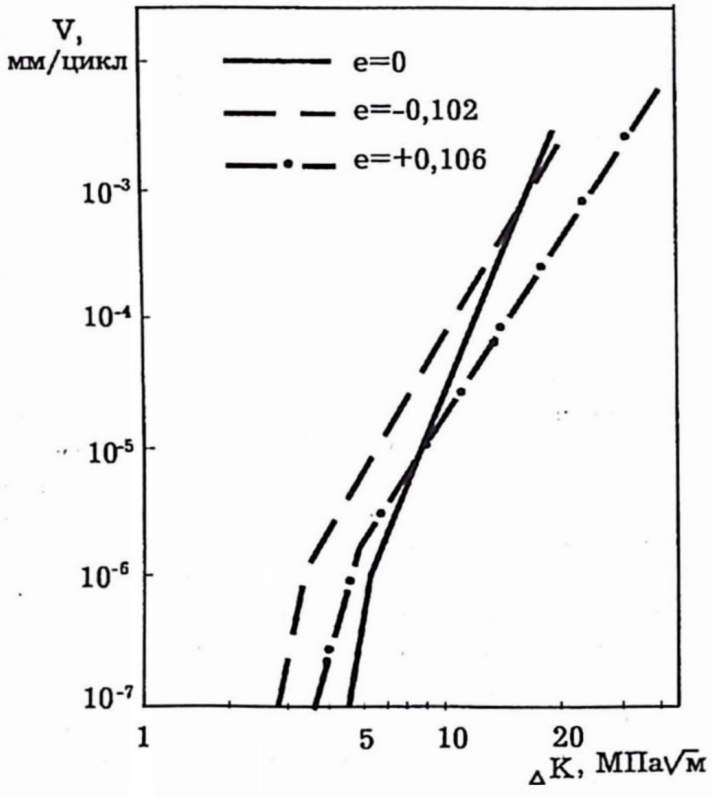

Рис. 2. ДВР сплаву АМг6 до і після ППД

На рис. 3 наведені фотографії зламів зразків, а в таблиці - параметри навантаження, що відповідають різним ділянкам зламів для сплаву АМг6 в стані поставлення (рис. 3,а, б, в) та після ППД розтягом (рис.3,г, д, е) і стиском (рис. 3,є, ж, з).

При аналізі мікрофрактографічної картини зламів недеформованих зразків можна відмітити, що на припороговій ділянці ДВР тріщина росте за механізмом мікрозсуву (рис.3,а). На поверхні спостерігається лише стрічковий рельєф. Крок між стрічками становить S=0,32...0,54 мкм. При збільшенні розмаху КІН (рис.3,б) на поверхні руйнування спостерігаються включення з

відгалуженими мікротріщинами. Рельєф поверхні руйнування стає псевдоборозенчастим Для високоамплітудної ділянки ДВР недеформованого зразка (рис.3,в) на поверхні руйнування має місце борозенчастий рельєф з помітними гребінками. Руйнування при цих параметрах навантаження здійснюється за зсувним борозенчасто-гребінчастим механізмом.

Таблиця 1

Характеристика зламів зразків, наведених на рис. 3

№ рис.	e	V, мм/цикл	$_{\Delta}$K,МПа$\sqrt{м}$	S,мкм	Місце обстеження
а	0	$1,67x10^{-7}$	4,69	0,32...0,54	Б-Б(11,80мм)
б	0	$7,75x10^{-6}$	7,21	0,58...0,86	Б-Б(10,10мм)
в	0	$3,0x10^{-4}$	13,1	0,75...0,86	А-А(6,10мм)
г	+0,106	$6,98x10^{-6}$	5,19	0,55...0,78	А-А(8,32мм)
д	+0,106	$7,14x10^{-5}$	11,30	0,83...1,75	Б-Б(12,54мм)
е	+0,106	$1,13x10^{-3}$	44,63	0,94...1,40	Б-Б(14,00мм)
є	-0,102	$1,46x10^{-6}$	2,94	0,25...0,29	А-А(8,11мм)
ж	-0,102	$4,24x10^{-4}$	15,59	0,72...1,02	Б-Б(9,00мм)
з	-0,102	$1,35x10^{-3}$	20,50	0,79...1,14	А-А(9,66мм)

Для зламів зразків, підданих ППД розтягом (e=+0,106), для малого розмаху КІН (рис.3,г) поряд з включеннями на фоні стрічкового рельєфу помітні ямки. Характер руйнування відповідає зсувному механізму.

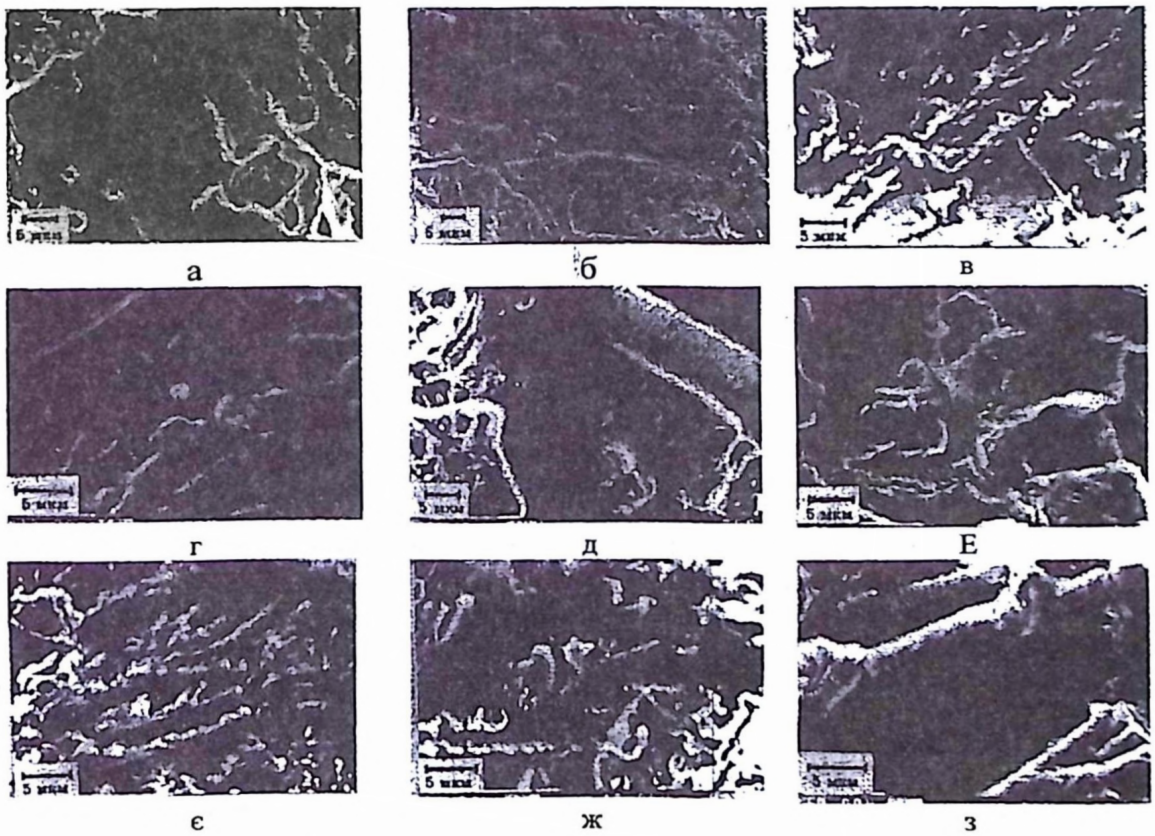

Рис.3 Мікрофрактограми сплаву АМг6 (Позначення див. в таблиці)

При наростанні розмаху КІН (рис.3,д) на мікрофрактографічній картині поверхні руйнування виділяються тріщини у впадинах і на границях блоків. Для цих режимів характерними є також наявність включень і ямок на фоні класичних борозенок. Руйнування реалізується шляхом мікровідриву.

Для зразків, які піддавались ППД стиском (e=-0,102), вже на припороговій ділянці ДВР (рис. 3,є) спостерігається мікророзтріскування і поява субборозенок в середині основних борозенок. Рельєф поверхні руйнування, як і у недеформованому і розтягнутому зразках, стрічковий з наявними псевдоборозенками. Для середньої ділянки ДВР характерне інтенсивне мікророзтріскування (рис. 3,ж), наявність включень і ямок на фоні борозенчастого рельєфу. При подальшому наростанні розмаху КІН (права ділянка ДВР) (рис.3,з) на поверхні зламу помітні включення, подвійні борозенки (класичні і субборозенки) і розтріскування вздовж борозенок.

На рис. 4 наведені результати кількісного фрактографічного аналізу у вигляді залежностей кроку втомних борозенок S від розмаху КІН біля поверхні зразка і на середній його ділянці.

При порівнянні цих залежностей можна зробити висновок, що для малих значень розмаху КІН ($_{\Delta}K<9..10$МПа$\sqrt{м}$) ППД як розтягом, так і стиском приводить до збільшення кроку втомних борозенок у порівнянні з недеформованим матеріалом. При підвищенні розмаху КІН крок борозенок менший після ППД, ніж для матеріалу в стані поставлення (рис.4).

Характерною особливістю, виявленою в процесі аналізу, є те, що розтяг і стиск однаково впливають на величину кроку втомних борозенок біля поверхні зразка, тобто крок S залежить лише від абсолютної величини ППД і не залежить від її напрямку.

Домінуючим механізмом руйнування сплаву АМг6 є механізм втомних борозенок. Згідно сучасних уявлень про будову і природу борозенок за Форсайтом, в розглядуваному випадку має місце пластичний тип борозенок [9].

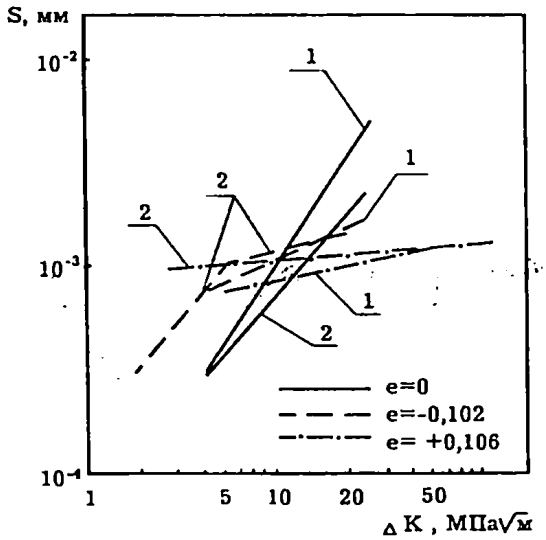

Рис. 4. Залежність кроку втомних борозенок в сплаві АМг6 біля поверхні (1) і на серединній ділянці (2) зразка від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень

При проведенні експертизи поломок елементів конструкцій одним з методів визначення параметрів циклічного навантаження, якому піддавався елемент на стадії експлуатації, є аналіз зламів. Кількісну оцінку можна отримати на основі співставлення кроку втомних борозенок S із макрошвидкістю росту втомних тріщин V.

Для сплаву АМг6 в стані поставлення (e=0) характерним є відсутність співпадання швидкості РВТ і кроку борозенок (рис.5,а).

При низьких амплітудах навантаження крок борозенок значно перевищує макрошвидкість (майже на три порядки). Це свідчить про те, що формування однієї втомної борозенки на I і II ділянці ДВР здійснюється за багато циклів навантаження (порядку 10^3). При збільшенні розмаху КІН крок борозенок в приповерхневій ділянці зразка зростає швидше у порівнянні з серединною областю.

Кількісна мікрофрактографічна картина для попередньо пластичнодеформованих зразків дещо інша (рис. 5,б,в). Тут також при заданому розмахові КІН крок боріздок суттєво перевищує макрошвидкість РВТ, проте відзначається також характерне співпадання кроку борозенок S і макрошвидкості. Причому, незалежно від рівня і напрямку ППД, в усіх цих випадках співпадання спостерігається при макрошвидкості приблизно рівній 1 мкм/цикл.

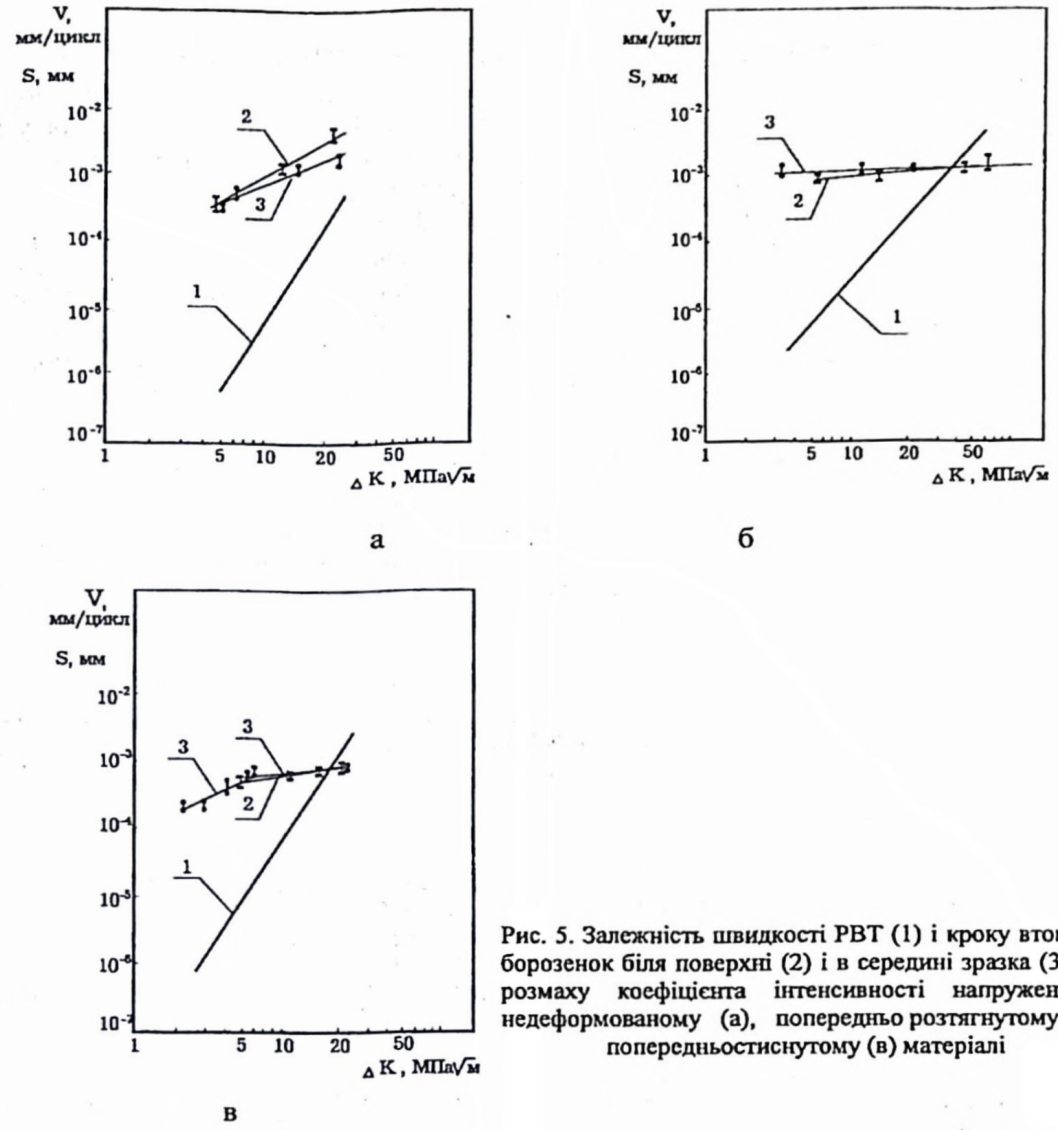

Рис. 5. Залежність швидкості РВТ (1) і кроку втомних борозенок біля поверхні (2) і в середині зразка (3) від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень у недеформованому (а), попередньо розтягнутому (б) і попередньостиснутому (в) матеріалі

На думку авторів, це є результатом реалізації різних моделей утворення втомних борозенок в матеріалі у вихідному стані і після ППД. Так для вихідного стану формування борозенок здійснюється у відповідності з відомою моделлю Лерда-Сміта [11].

За цією моделлю пластична деформація поблизу вершини ініціює поширення тріщини в напрямку максимальних зсувних напружень. Із збільшенням розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень збільшується ширина пластичної зони в околі вершини тріщини і відповідно росте крок втомних борозенок.

Формування борозенок у деформованому стані базується на моделі Форсайта і Рідера [11]. Її суть полягає в зародженні в області розтягу попереду фронту тріщини мікропустот. у процесі їх утворення проходить притуплення вершини тріщини, виникає мостик, який при рості тріщини руйнується.

При розгляді мікрофрактографічної картини зламів попередньо стиснутого матеріалу виявлене подвійне борозенкування. На фоні основних борозенок накладені так звані субборозенки. Вони розміщені строго паралельно до фронту основних борозенок. Очевидно, це є наслідком подвійності механізму борозенкування: основні утворюються за моделлю Лерда-Сміта, субборозенки - за моделлю Форсайта і Рідера.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що незалежно від величини і знаку ППД в сплаві АМг6 реалізуються однакові мікромеханізми поширення втомної тріщини. На першій (припороговій) ділянці ДВР спостерігається стрічковий рельєф, який із збільшенням розмаху КІН на другій ділянці заміняється псевдоборозенчастим і борозенчастим рельєфом. При подальшому наростанні розмаху КІН (третя ділянка ДВР) спостерігається борозенчасто-гребінчастий і ямковий мікрорельєфи по поверхні руйнування.

2. Пластична деформація стиском обумовлює появу мікророзтріскування в припороговій ділянці ДВР і субборозенок у середині основних борозенок. Стисненість пластичної деформації практично не впливає на крок втомних борозенок для зразків після ППД розтягом і стиском. Для недеформованого сплаву АМг6 крок борозенок є більшим на приповерхневій ділянці зразка порівняно із серединною ділянкою.

3. ППД розтягом і стиском зменшує кут нахилу залежностей кроку борозенок від розмаху КІН порівняно з недеформованим матеріалом.

4. Співпадання макрошвидкостей РВТ і кроку борозенок для деформованих зразків спостерігається лише у вузькому діапазоні зміни розмаху КІН: $_{\Delta}K$=30...40 МПа$\sqrt{м}$ для розтягнутого зразка і $_{\Delta}K$=16...20 МПа$\sqrt{м}$ для стиснутого зразка. Для недеформованого стану у всьому діапазоні зміни $_{\Delta}K$ крок борозенок більший за макрошвидкість РВТ.

Summary: The influence of the preliminary plastic stress strain deformation on the micromechanisms of the fatique crack fracture of the alloy AMg6 was investigated. Plastic stress deformation leads to the appearance of the microcracking and subnotches in the preshold area. The stress of the plastic deformation influences the notch pitch onle for the non-deformed material. It was discovered that the notch pitch is larger at the preshold surface as compared with the middle of the area.

Література

1. Void nucleation and growth during tensile deformation in steel/ Barnby J.T.,Flavell C.I., Nadkarni A.S. at al//Proc. of The 6th Int. Conf. Fract.-New Dehli,1986.-2.-P.1287-1294.
2. 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.
3. 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. Metallkunde.-1981.-72,N5.-P.322-328.
4. Near-threshold fatigue crack growth behavior in copper/P.K.Liaw, T.R.Leax, R.C. Williams at al//Met. Trans.-1982.-A13,N9.-P.1607-1618.
5. Трощенко В.Т., Ясний П.В., Покровский В.В. Влияние однократной пластической деформации на трещиностойкость. Сообщение 2. Подход к прогнозированию скорости роста усталостной трещины.//Пробл. прочности-1989.-№12.-С.14-18.
6. 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.
7. Effect of Monotonic and Cyclic Prestrain on Fatigue Threshold in Medium Corbon Steels./Li Nian, Du Bai-Ping. Res. Inst. for Strength of Metals Xi' an Jiaotong Uniwersity.-1996.- №2, 1996, (Xi' an, China).
8. Степаненко В.А., Штукатурова А.С., Ясний П.В.. Стереофрактографическое исследование зоны статического страгивания и динамического скачка усталостной трещины в корпусной стали // Пробл. прочности.- 1983.- №6.- С.71-78.
9. Гринберг Н.М., Сердюк В.А.. Влияние структурного состояния на механизм зарождения и кинетику роста усталостных трещин в алюминиевых и магниевых сплавах // Фізико-хімічна механіка матеріалів.- 1992.- №1.- С. 26-33.
10. Ясний П.В., Покровский В.В., Штукатурова А.С.. Исследование влияния предварительной пластической деформации на механические свойства и микроструктуру конструкционной стали // Пробл. прочности.- 1988.- №9.- С. 41-45.
11. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. 4т. Под общей редакцией Панасюка В.В. -Киев: Наук. думка, 1990.- 680с.
12. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металургия, 1988.- 400 с.