

ВПЛИВ БІОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛІ 08X18H10T

Досліджено залежності часу до зародження тріщини і швидкості росту в сталі 08X18H10T під дією біологічного розчину РІСЛТ. Виявлено схильність сталі до корозійно-циклічного розтріскування у досліджуваному розчині, що зумовлює зростання швидкості росту тріщини більше ніж на порядок порівняно з випробуваннями на повітрі на середній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування. Запропоновано аналітичний вираз для оптимізації розмірів і оцінки довговічності елементів конструкцій за отриманими експериментальними даними за часом зародження і швидкістю росту тріщини в сталі 08X18H10T у розчині РІСЛТ. Отримані результати дають можливість оптимізувати розміри і прогнозувати довговічність ортопедичних імплантантів.

Функціонування ортопедичних імплантантів в організмі людини слід розглядати як стійкість елементів конструкцій в умовах специфічного корозійного середовища. Під час механічних навантажень зароджується втомна тріщина та росте до критичного розміру, за якого конструкційний елемент спонтанно руйнується. Виходячи з цих позицій, для оптимізації розмірів за розрахунками тривалості експлуатації імплантантів потрібно отримати дані про вплив середовищ біологічних тканин організму людини на час до зародження тріщин у зоні технологічних концентраторів напружень та швидкість її підростання залежно від рівня циклічних навантажень із частотою, яка є характерною для рухів людини. Дані про циклічну витривалість сталі 08X18H10T за частоти 50Гц [1] не відображають реальних умов експлуатації імплантанта в організмі людини, оскільки зі зниженням частоти навантаження вплив середовища на швидкість росту тріщини зростає [2] і, більше того, проявляються ефекти, характерні тільки для низьких ($\leq 0,1$ Гц) частот навантажень, зокрема, ефект корозійно-циклічного розтріскування металів [3]. Цей ефект притаманний системам середовище-метал, що пасивується, яким є сталь 08X18H10T у біологічних розчинах [4]. Оскільки поріг корозійно-циклічного розтріскування (K_{1scfc}) для низькоміцних пластичних сталей значно менший від опору корозійно-статичному розтріскуванню (K_{1scc}) [3, 5], саме K_{1scfc} необхідно використовувати для підвищення точності розрахунків ресурсу елементів конструкцій.

Постановка завдання. Враховуючи неповноту [6] і розбіжність [5, 7] результатів наших попередніх досліджень, цей експеримент спланували так, щоб усі характеристики тріщиностійкості сталі 08X18H10T, необхідні для оптимізації розмірів імплантанта за розрахунками його довговічності, отримати на зразках, виготовлених із одного листа в ідентичних умовах випробувань.

Матеріали і методика досліджень. Згідно з рекомендаціями міжнародних норм ISO 5832, імплантанти виготовляють із хромонікелевих сталей [8]. Проведені нами механоелектрохімічні дослідження сталі 08X18H10T показали її задовільну корозійну стійкість у біологічних розчинах [4, 6, 9]. Найбільш хімічно агресивним із досліджуваних розчинів (Ringera, Tyroda, Hanksa, Cigada, РІСЛТ) до цієї сталі є РІСЛТ (який імітує середовище людських тканин) [в г/л: 0,8 – NaCl ; 0,14 – CaCl₂ ; 0,4 – KCl; 0,35 – NaHCO₃; 1,0 – глюкоза; 0,19 – NaH₂ PO₄; 0,19 – MgCl₂; 0,06 – NaH₂PO₄ – 2H₂O; MgSO₄·7H₂O-0,06], який вибрали за модельне біологічне середовище. Випробовували зразки зі сталі 08X18H10T (мас. %: 0,07 – C; 17,6 – Cr; 10,6 – Ni; 0,9 – Ti; 0,10 – Si; 0,017 – S; 0,027 – P, решта – Fe; хімічний склад визначали методом спектрального емісійного кількісного аналізу на ИСП-30) на установці УРТ 10, яка дозволяє підтримувати постійним значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I у діапазоні відношення довжини тріщини l до ширини зразка: $l/b=0,1\dots 0,5$ [10]. На зразку закріп-

ляли ванночку, через яку пропускали фізіологічний розчин, повністю оновлюючи його протягом 30 хв. Довжину тріщини вимірювали монокулярним мікроскопом з 20-кратним збільшенням. Кількість циклів навантаження до зародження тріщини фіксували в зразках 4x10x80мм від V-подібного концентратора глибиною 1мм, з радіусом заокруглення вершини $r = 0,1$ мм (рис. 1). Вимірювали швидкість росту тріщини, збільшуючи КІН на кожній наступній ділянці не більш ніж на 10%. Щоб уникнути неточностей, пов'язаних із стохастичністю процесу зародження тріщини, кількість циклів до зародження визначали для довжини тріщини $l \approx 1,25(K_{Iy} / \tau_{0,2})^2$ – половини розміру зони пластичності в околі її вершини, де $\tau_{0,2} = 270$ МПа – межа текучості сталі. Швидкість росту тріщини обчислювали під час підростання її не менше ніж на 1 мм за постійного значення КІН. Зразки, в яких тріщину зароджували за низьких значень напружень у вершині концентратора, досліджували при малих значеннях КІН. Зі збільшенням напружень під час зародження тріщини підвищували рівень КІН.

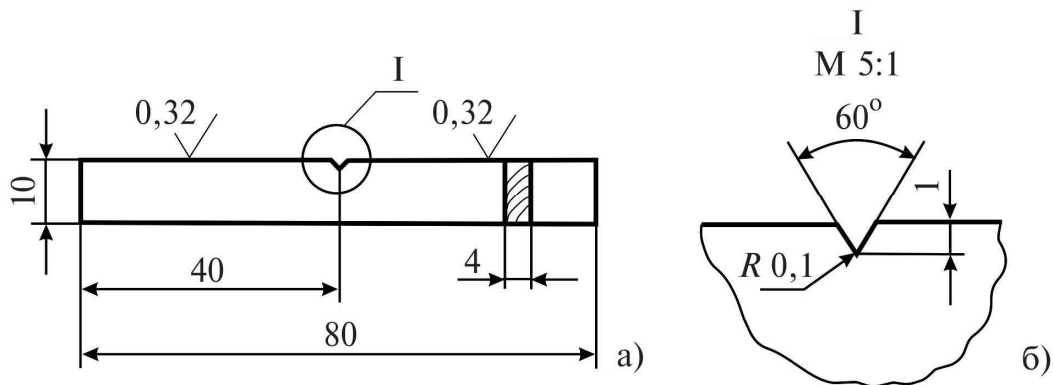


Рис. 1. Зразок для дослідження (а) і форма концентратора (б)

Результати випробовувань та їх обговорення. Залежність кількості циклів до зародження тріщини від умовного значення КІН має вигляд кривої Велера (рис. 2). Відлік кількості циклів за довжиною тріщини у півзоні пластичності дав можливість уникнути великого розкиду даних [11]. КІН вважали умовним, оскільки розраховували його за довжиною тріщини (l), що дорівнювала сумі глибини концентратора (l_K) і половини розміру зони пластичної деформації в її вершині, тобто тріщина не була кондиційною. Окрім K_{Iy} , розраховували рівень максимальних напружень у вершині концентратора з поправкою на розмір зони пластичності [11] (рис. 2. нижня шкала), щоб використовувати отримані дані для інших геометричних розмірів концентраторів напружень. Як бачимо, значення напружень у вершині концентратора добре узгоджуються зі значеннями для границі втоми сталі 08X18H10T у 3%-му розчині NaCl [12].

Швидкість росту тріщини визначали на ділянці зразка, коли її довжина від вершини концентратора перевищувала 1 мм. В середовищі РІСЛТ поріг КІН росту тріщини зменшується і збільшується швидкість росту тріщини відносно значень, отриманих на повітрі (рис. 3, криві 1, 2), особливо на ділянці $K_{I_{max}} = 20 \dots 40 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

Форма огинаючої максимальних значень швидкості росту тріщини (рис. 3, крива 3) вказує на те, що РІСЛТ діє на сталь за двома механізмами – анодного розчинення, оскільки знижує порогові значення КІН, і корозійно-циклічного росту тріщини за $K_{I_{max}} = 25 \dots 30 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ відносно даних, отриманих на повітрі. Виходячи з аналізу результатів літературних джерел [13], можна стверджувати, що це є наслідком наявності у розчині РІСЛТ хлоридів – депасиваторів NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂. Зменшення впливу середовища на швидкість росту тріщини в діапазоні $K_{I_{max}} = 45 \dots 52 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ є наслідком

зміни плоско деформованого стану на плоско напружений стан металу в околі вершини тріщини за недостатньої товщини зразка, оскільки у зразках товщиною 25 мм такого явища не спостерігали [6].

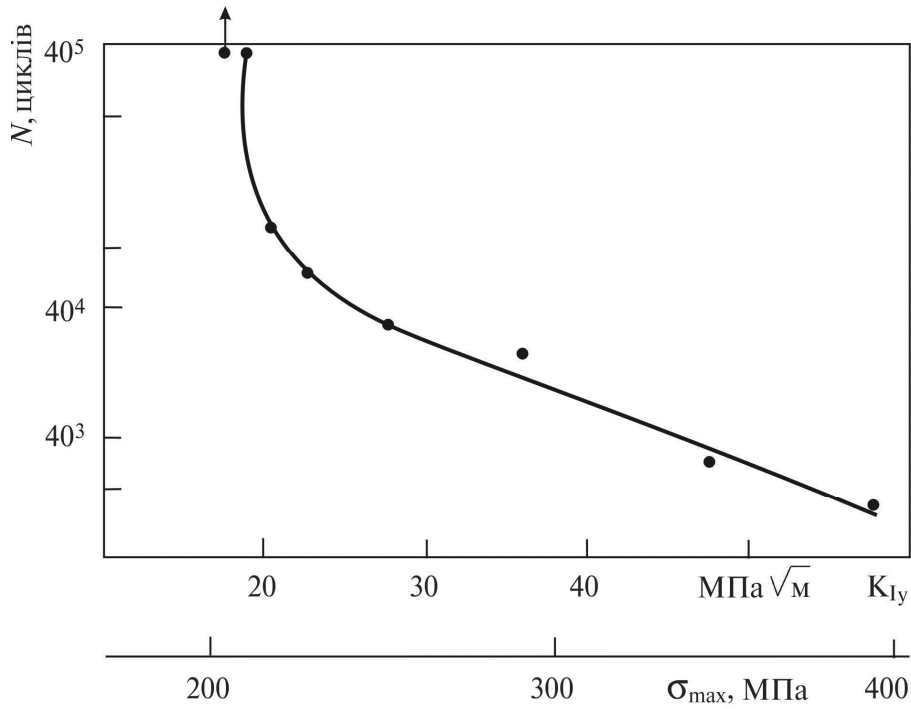


Рис. 2. Залежність кількості циклів навантаження зразка до зародження тріщини від значення КІН (K_{Iy}) та максимального напруження (σ_{max}) у вершині концентратора

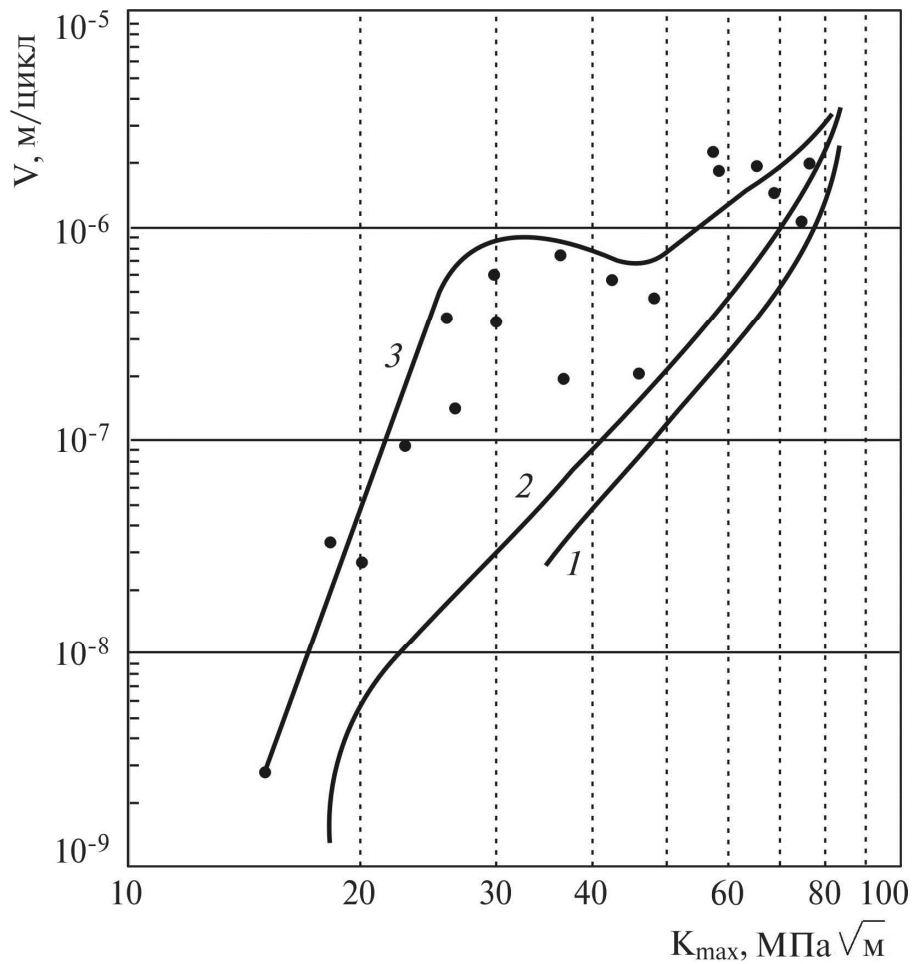


Рис. 3. Кінетичні діаграми втомного руйнування сталі 08X18H10T на повітрі (1 – R=0,7[5]; 2 – R=0, f=20Гц) та в розчині РІСЛТ (3 – R=0, f=0,1Гц)

Для розрахунків довговічності елементів конструкцій із сталі 08X18H10T отримано значення $K_{thc} = 14 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $K_{lsc} = 27 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $K_{lfc} = 96 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [7], за якими можна оптимізувати розміри імплантантів.

Формула для розрахунку довговічності (допустимої кількості циклів) навантаження N_g , згідно з отриманими даними, матиме вигляд [14, 15]

$$N_g = N_3 + \int_{l_0}^{l_{kp}} \frac{dl}{v_f h_{cf} + v_c},$$

де N_3 – кількість циклів до зародження тріщини (рис. 2); l_0 – початкова довжина тріщини, l_{kp} – довжина тріщини, за якої досягаються критичні значення КН; v_f – швидкість росту тріщини на повітрі; h_{cf} – функціональний множник, який враховує зростання швидкості росту тріщини за механізмом корозійно-циклічного розтріскування; v_c – швидкість підростання тріщини за механізмом анодного розчинення металу під час циклічного навантажування.

Висновки

1. Біологічний розчин РІСЛТ призводить до збільшення швидкості росту втомних тріщин у сталі 08X18H10T і прояву ефекту корозійно-циклічного розтріскування, що необхідно врахувати під час визначення довговічності ортопедичних імплантантів.

2. Методичний підхід і схему розрахунку довговічності елементів конструкцій можна використати для досліджень інших конструкційних матеріалів, що використовують в ортопедії та травматології.

The investigations on the dependence of time to crack initiation and propagation rate in 08Cr18Ni10Ti steel under RISLT biological solution effect have been carried out. A tendency to corrosion-fatigue cracking of steel in aqueous solution, leading to crack growth rate increase by more than an order, to compare with testing in air on the middle region of kinetic S-N curve has been found. An analytical expression for size optimisation and estimation of durability of construction elements is proposed. An approach is based on the experimental data, namely time to crack initiation and velocity of crack growth in steel 08Cr18Ni10Ti in the conditions of artificial biological solution, which models the human tissue.

The obtained data are sufficient for optimization of dimensions and prediction of surgical instruments durability.

Література

1. О влиянии циклических напряжений на селективное растворение сплавов / В. И. Похмурский, М. С. Хома, И. Н. Антошак, И. Я. Лапка // Защита металлов. – 1996. – №5. – С. 246-251.
2. Панасюк В. В. Романив О. Н. Механика коррозионно-усталостного разрушения // Коррозионная усталость металлов. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 39-66.
3. Гнип І. П., Похмурський В. І. Про доцільність запровадження в механіку руйнування порогу корозійно-циклічного розтріскування як базової характеристики конструкційних матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1994. – №6 – С. 7-24.
4. Личковський Е. І., Лапка І. Я. До питання вибору корозійно тривких сталей для ортопедичних імплантантів // Фізико-хімічна механіка матеріалів –2000. – Спец. вип. №1. – С. 113-116.
5. Похмурський В. І., Гнип І. П., Личковський Е. І. Металознавчі аспекти надійності обладнання блоків АЕС // Праці НТШ. Матеріалознавство і механіка матеріалів. – Львів, 2001 – Т. VI. – С. 22-42.
6. Хома М. С., Гнип І. П., Личковський Е. І. Корозійне та корозійно-механічне руйнування деяких металевих імплантантів у біологічних середовищах // Матеріали міжнародного наук.-техн. симп. “Сучасні проблеми механіки матеріалів: фізико-хімічні аспекти та діагностика властивостей”. – Львів, 2001. – С. 128-129.
7. Похмурський В. І., Гнип І. П., Личковський Е. І. Новий метод і схеми прогнозування довговічності елементів конструкцій АЕС // Механіка руйнування металів і міцність конструкцій. В 3-х т. / Під.

- заг. ред. В. В. Панасюка . – Львів: Каменяр, 1999. – Т. 3. – С. 174-180.
8. Marciniak J. Biomateriały w chirurgii kostnej. –Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1992. – 385 s.
 9. Lyczkowski E., Choma M., Lapka I. Selective dissolution of deformed steels and alloys in physiological solution // V Polish Conference Corrosions-Theory and Practice, 17-20 September Gdansk. – 1996. 97-101 s.
 10. О постоянстве коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещин при ее распространении в прямоугольной пластине / В. И. Похмурский, Н. М. Кундрат, Л. Н. Билый, и др // Пробл. прочност. – 1984. – №12. – С. 59-62.
 11. Осташ О. П., Панасюк В. В. Уніфікована модель зародження та росту втомних макротріщин. Ч. 3. Стадія росту макротріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – №3. – С. 5-14.
 12. Крохмальний А. М., Хома М. С., Похмурский В. И. Особенности коррозионно-усталостного разрушения и защиты нержавеющей сталей. – Львов; 1992.– 47с. – (Препр. / АН УССР, Физ.-мех. ин-т; № 183).
 13. Eremiaš V., Maričev V. A. Environmental aspects of stress corrosion crack growth in austenitic stainless steel // Werkstoffe und Korros. - 1979. - **30**, N 8. - P. 551-553.
 14. Гнип І. П., Личковський Е. І. Розрахунок довговічності деяких елементів конструкцій блоків АЕС // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. В 3-х т. / Під. заг. ред. В. В. Панасюка – Львів: Каменяр, 1999. – Т. 3. – С. 114-119.
 15. Гнип І. П., Баб'юк І. С. Чернов Б. О. Оптимізація довговічності замкових різьбових з'єднань бурильної колони на основі критеріїв механіки руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1990. – №5. – С. 105-109.

Одержано 17.02.2003 р.