УДК 620.178:621.785.5:669.295

Е.І. Плешаков, С.Г. Швачко, Ю.М. Котик
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра фізики металів та матеріалознавства

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЛАЗЕРНОГО НАВУГЛЕЦЮВАННЯ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СПЛАВУ ВТ14

© Плешаков Е.І., Швачко С.Г., Котик Ю.М., 2006

Лазерне навуглецювання сплаву ВТ14 підвищує твердість поверхневого шару до 6...6,5 ГПа, формуючи в ньому композитну структуру, яка складається з дендритів TiC, розміщених у α′-мартенситній матриці. Цементований шар міцно зв'язаний з підкладкою і не має тріщин та пор. Лазерним обробленням кільцевої виточки зразків зменшено їхню циклічну довговічність під час випробувань на малоциклову втому. Осередки руйнування локалізуються в зонах лазерної дії.

Laser carburising of VT14 alloy produces surface layer with composite microstructure, which contain TiC dendrites uniformly distributed in the α′-martensitic matrix. The carburized layer has microhardness of 6…6,5 GPa, excellent bonding with the substrate and is free of pores and cracks. The laser treatment of the specimen's neck decreases its low-cycle fatigue life. The fracture nuclei are localized in the laser treated zones.

Вступ. Титанові сплави набули широкого застосування в різних галузях промисловості завдяки поєднанню високої питомої міцності та корозійної тривкості. Проте, низька зносотривкість обмежує їхнє застосування в умовах абразивного чи ерозійного зношування, в парах тертя з іншими сплавами вони схильні до схоплювання. Перспективним напрямом підвищення зносотривкості титанових сплавів є лазерне легування [1–4], що формує поверхневі металокерамічні шари, які поєднують міцність і в'язкість металу з високою твердістю кераміки. Однак для лазерно зміцнених деталей пар тертя, які працюють під дією повторно-змінних навантажувань, важливого значення набуває їхня здатність чинити опір втомі. На жаль, дослідники лазерного легування переважно не вивчають впливу цього оброблення на витривалість титанових сплавів. Нечисленні публікації на цю тему стосуються різних сплавів, режимів легування та видів утоми. Так, наприклад, у роботі [5] було встановлено, що лазерне гартування майже вдвічі збільшує опір утомі сталі 40 порівняно з поліпшенням чи індукційним гартуванням. Залишкові термічні напруження стискання, які виникають у поверхневому шарі внаслідок лазерного гартування сплаву Ti–24Al–11Nb, на два порядки зменшують показники інтенсивності росту втомних тріщин [6]. У роботі [7] показано, що підвищення опору фретінг зношуванню і втомі можна досягнути, застосовуючи комплексну поверхневу обробку з нанесенням покриття. Лазерне ударне зміцнення сплаву Ti–6Al–4V, створюючи поверхневі напруження стискання, підвищує його втомну міцність [8]. Такі розрізнені дані літературних джерел, хоч і засвідчують перспективність застосування поверхневої лазерної обробки для поліпшення витривалості конструкційних сплавів, не дають можливості стверджувати про її вплив на втомну міцність титанових сплавів.

Метою роботи є вивчення впливу лазерного навуглецювання на циклічну довговічність титанового сплаву в умовах малоциклової втоми.

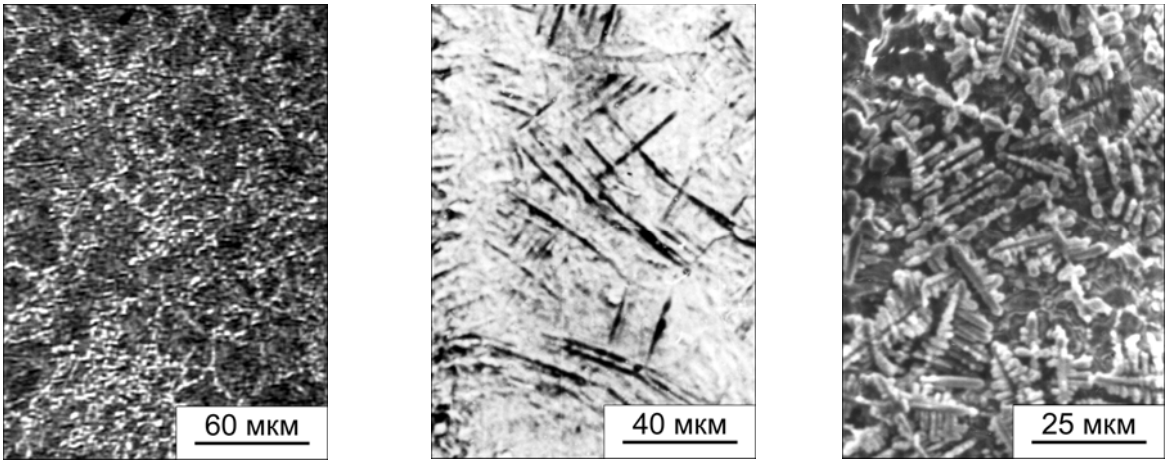
Матеріал і методика досліджень. Для дослідження було обрано титановий α+β–сплав мартенситного класу марки ВТ14. Вихідну мікроструктуру сплаву ВТ14 після гарячого прокатування в α+β–зоні й стабілізувального відпалу за 750 ºС показано на рис. 1, а. Твердість матеріалу зразків у вихідному стані становить 35 HRC.

Циклічну довговічність визначали на установці типу МУИ–6000, пристосованій для випробувань на малоциклову втому, за частоти обертання зразків 22,5 об·хв$^{-1}$. Реалізували м'який режим випробування за симетричним синусоїдальним циклом напруження в умовах чистого згинання з обертанням. Напруження, що діє на зразок під час випробування, визначали за формулою:

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32Ql}{\pi d^3}, \qquad (1)$$

де M – внутрішній згинальний момент, сталий на усій робочій довжині зразка (між шпиндельними бабками), Н·мм; W – осьовий момент опору розрахункового перерізу зразка, мм^3; Q – навантаження, Н; l – відстань від точки прикладання сили до найближчої опори, мм; d – діаметр зразка в місці виточки, мм.



а *б* *в*

Рис. 1. Мікроструктура сплаву ВТ14 після стабілізувального відпалу (а), лазерних гартування (б) і навуглецювання (в)

За показами лічильника випробувальної машини визначали циклічну довговічність N – кількість циклів навантаження, яке витримує зразок в умовах сталого напруження до руйнування.

Використовували зразки з кільцевою виточкою зі сферичним дном [9]. Довжина зразка $L = 50$ мм, діаметр $d = 6$ мм, глибина надрізу $t = 0{,}5$ мм, радіус заокруглення надрізу $\rho = 1$ мм, ширина надрізу $b = 2$ мм.

Лазерні гартування й навуглецювання з аквадагу дна виточки втомних зразків здійснювали на технологічній лазерній установці імпульсної дії “Квант–16” за такими режимами: енергія імпульсу E_i — від 20 Дж до 25 Дж, діаметр плями дії лазерного променя $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м, тривалість імпульсу τ — $5 \cdot 10^{-3}$ с, питома густина потужності $q = (2{,}0–2{,}8) \cdot 10^3$ Вт·мм$^{-2}$. Лазерне гартування кільцевої виточки зразків виконували з оплавленого стану (рис. 2), а лазерне навуглецювання – вплавлюванням графітової обмазки в її поверхню.

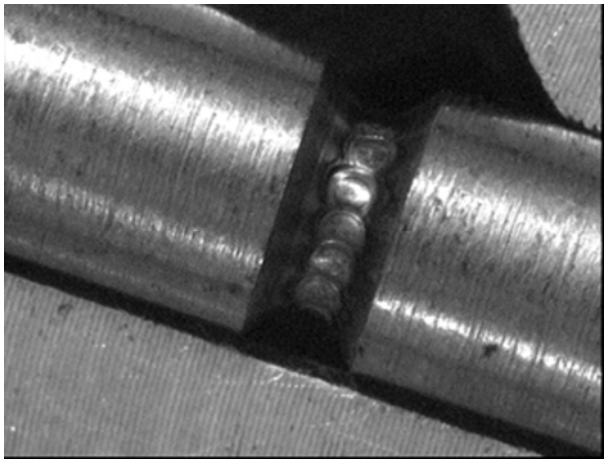


Рис. 2. Зразок для випробувань на малоциклову втому після лазерного гартування дна кільцевої виточки, ×10

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного МЕТАМ Р–1 та електронного растрового Novascan 30 мікроскопів. Документування мікроструктури здійснювали відеокамерою CCD 600 НВ з мікронасадкою МФН–12. Макроструктурний аналіз зламів проводили шляхом огляду поверхні руйнування неозброєним оком та за збільшень від двох до 20 разів за допомогою відеокамери CCD 600 НВ, вмонтованої у макронасадку ПЗФ.

Результати досліджень. Лазерне гартування ВТ14 з оплавленого стану забезпечує утворення поверхневого шару завглибшки приблизно 0,15 мм з однорідною структурою пластинчастого α′–мартенситу (рис. 1, б). Мікротвердість загартованого шару близько 3,8 ГПа. У зоні термічного впливу вона плавно зменшується до значення мікротвердості вихідної структури 3,3 ГПа.

Лазерне навуглецювання формує на глибину до 0,1 мм композитну дендритно-матричну структуру (рис. 1, в) мікротвердістю 6...6,5 Гпа, основу якої становлять тверді первинні дендрити, розташовані в м'якій матриці. За [10] ці дендрити утворює карбід TiC, а матрицю – α′-мартенсит.

Циклічну довговічність зразків з лазерно обробленими після стабілізувального відпалу кільцевими виточками порівнювали з циклічною довговічністю зразків без лазерного оброблення виточки. Результати випробувань за різних значень максимального напруження циклу наведено в таблиці та у вигляді гістограм на рис. 3.

Вплив виду обробки концентратора й максимального напруження в циклі на циклічну довговічність сплаву ВТ14

Вид обробки	Напруження σ, МПа	Циклічна довговічність N, циклів
1. Відпал стабілізувальний	340	42097
2. Гартування лазерне	340	1327
3. Навуглецювання лазерне	340	1215
4. Відпал стабілізувальний	300	49042
5. Гартування лазерне	300	1800
6. Навуглецювання лазерне	300	1620
7. Навуглецювання лазерне	180	3442

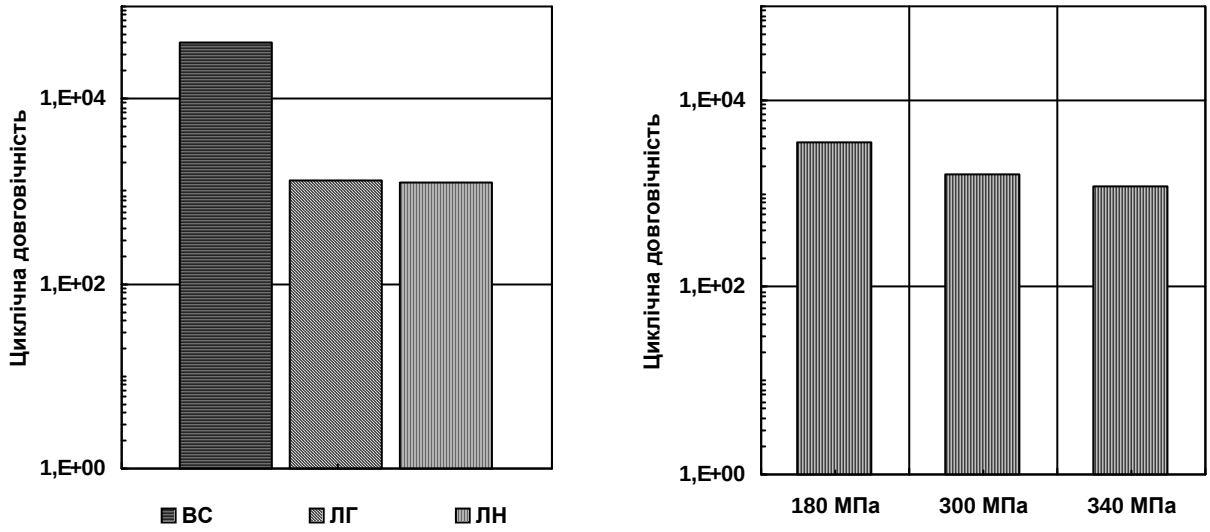
Лазерне гартування й навуглецювання виточок зразків ВТ14 істотно зменшує циклічну довговічність за всіх режимів навантаження порівняно з вихідним станом зразків. Разом з тим різниця між циклічною довговічністю зразків після лазерного гартування й навуглецювання незначна – близько 100 циклів. Збільшення напруження циклу закономірно зменшує циклічну довговічність, як показано на рис. 3, б на прикладі зразків після лазерного навуглецювання.

Циклічна довговічність зразків без лазерного оброблення виточки найвища і сягає граничних значень між малоцикловою і багатоцикловою втомою – $5 \cdot 10^4$ циклів (таблиця). Тому злам цих зразків має виразну втомну будову, характерну для багатоциклового чистого згинання з обертанням (рис. 4, а). Натомість злами зразків з лазерним обробленням виточки, які руйнуються в умовах малоциклової втоми (N = 1,2...1,8·10^3 циклів), набувають інших характерних ознак [11], найпершою з яких є багатоосередковість руйнування. Тріщини зароджуються по периметру лазерно обробленої виточки в кожній із зон лазерної дії. Від цих тріщин, як з фокуса, поширюється осередок зруйнування (рис. 4, б–е). Трапляються і кілька фокусів у межах однієї зони, на що вказують вторинні радіальні тріщини в осередках (рис. 4, б). Унаслідок багатоосередковості зона доламування розташовується в центральній частині перерізу зразка (рис. 4, в–е).

В осередках зон лазерного гартування (рис. 4, в, г) тріщини поширюються за складними траєкторіями, мають доволі шорсткі поверхні, орієнтовані під певними кутами до нормальної щодо осі зразка головної площини зламу (подібно як лопаті вітряка відносно площини обертання). Перед переходом в зону усталеного поширення магістральної тріщини вони об'єднуються з утворенням радіальних рубців і переорієнтовуються нормально до осі зразка. Такі будова та орієнтація поверхонь зруйнування в осередках вказують на достатню пластичність зон гартування, перехід від плосконапруженого до плоскодеформованого стану із підростанням тріщини та зменшенням

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

«живого перерізу» зразка. Отже, початкові стадії руйнування зразків з лазерно загартованими виточками проходять за участю істотної пластичної деформації.



а *б*

Рис. 3. Вплив лазерного оброблення й напруження циклу на циклічну довговічність сплаву ВТ14: а – напруження циклу σ = 340 МПа; б – лазерне навуглецювання; «ВС» – відпал стабілізувальний; «ЛГ» – гартування лазерне; «ЛН» – навуглецювання лазерне

Натомість осередки руйнування в зонах навуглецювання (рис. 4, б, д, е) мають набагато гладкіші поверхні, що вказує на їхню вищу крихкість. Ці поверхні зберігають однакову орієнтацію відносно центральної поверхні руйнування. Отже, зразки з навуглецьованими карбами руйнуються на початковій стадії з меншою пластичною деформацією. Незважаючи на це, їх циклічна довговічність мало відрізняється від циклічної довговічності зразків із загартованими карбами (таблиця).

На відміну від гладкої зони усталеного поширення магістральної тріщини зона доламування має ямкову будову, що свідчить радше про в’язкий характер завершальної стадії руйнування (рис. 4, в–е). Вона переважно овальна і локалізується з певним зміщенням від центра зразка. Відомо, що розташування зони доламування в зламах циліндричних зразків, випробуваних за схемою згину з обертанням, залежить від величини напруження циклу та гостроти концентратора [12]. За високих напружень та гострого кільцевого концентратора вона локалізується в центральній частині зламу. Зміщене до периферії зламу розташування зони доламування, багатоосередковість руйнування виникають за відносно високих напружень циклу та м’якшого кільцевого концентратора.

Зі зменшенням напруження циклу, отже, із збільшенням циклічної довговічності зразків, в окремих ділянках зламів спостерігаються втомні лінії, характерні для зламів багатоциклової втоми (рис.4, е).

Існує щонайменше кілька можливих причин, які могли б призвести до зниження циклічної довговічності титанового сплаву після поверхневого лазерного оброблення кільцевого концентратора:

– погіршення гладкості поверхні концентратора та неоднорідна шорсткість за його периметром;

– мікротріщини, проте мікроструктурні дослідження не виявили їх в загартованому й навуглецьованому шарах;

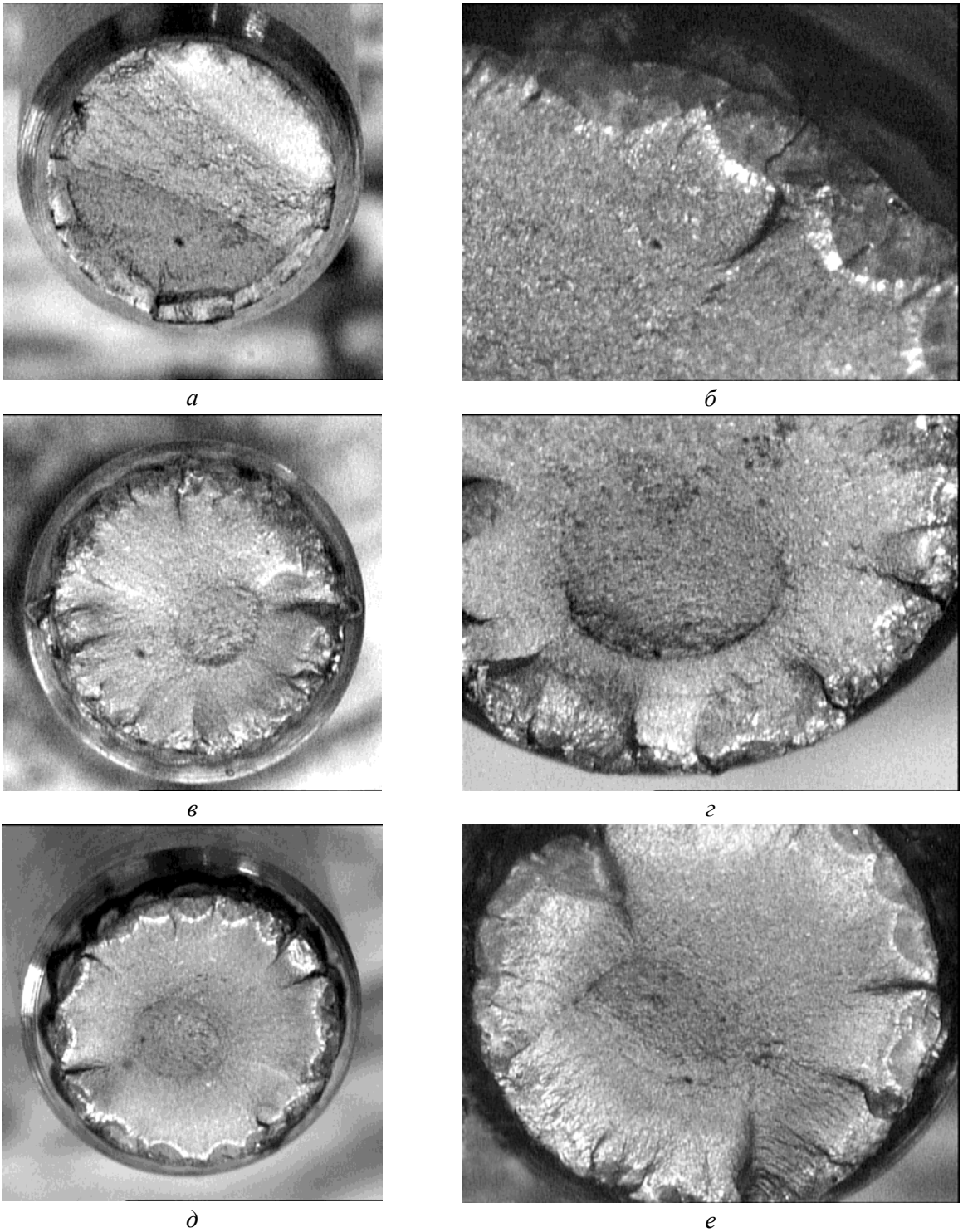
– неоднорідність фазового складу поверхневого шару (тверді дендрити у м’якій матриці) після лазерного навуглецювання; але цей чинник відсутній у загартованому шарі з однорідною мартенситною структурою;

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

– залишкові напруження розтягування у поверхневому шарі;

– фазовий наклеп у зонах лазерної дії.

Оскільки титанові сплави дуже чутливі до надрізів та чистоти поверхні, то можна вважати, що із перелічених чинників найвірогідніше зменшує циклічну довговічність зростання нерівностей та шорсткості поверхні дна карбу від імпульсного лазерного оброблення.



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 4. Втомні злами зразків сплаву ВТ14 після стабілізувального відпалу і лазерного оброблення виточки за напружень циклу 340 МПа (а, б, г, д) і 300 МПа (в, е): а – без лазерного оброблення, б, д, е – після лазерного навуглецювання, в, г – після лазерного гартування; а, в, д – × 12, б – × 34, г – × 28, е – × 19

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Висновки

1. Унаслідок лазерного гартування в поверхневому шарі сплаву ВТ14 утворюється однорідна структура пластинчастого α′-мартенситу з мікротвердістю 3,8 ГПа. Лазерне навуглецювання формує в поверхневому шарі сплаву ВТ14 на глибину до 0,1 мм композитну структуру, яка складається з дендритів карбіду титану, розміщених у α′-мартенситній матриці. Мікротвердість цього шару майже вдвічі вища за мікротвердість вихідної структури і змінюється в інтервалі від 6 до 6,5 ГПа.

2. Зони лазерного гартування й навуглецювання не містять жодних порушень суцільності у вигляді мікроскопічних тріщин чи порожнин, а їхня структура плавно переходить в мартенситну структуру зон термічного впливу.

3. Як лазерне легування, так і лазерне навуглецювання кільцевих концентраторів напруження знижує витривалість зразків, випробуваних в умовах малоциклової втоми. Оскільки циклічна довговічність зразків з навуглецьованими концентраторами мало відрізняється від циклічної довговічності зразків із загартованими, то можна припустити, що зміна фазового складу істотно менше впливає на циклічну довговічність, ніж пошкодження геометрії концентратора внаслідок імпульсного лазерного оброблення.

4. Малоциклові злами після лазерного оброблення карбів характеризуються багатоосередковістю руйнування. Осередки руйнування розвиваються із зон лазерної дії в радіальних напрямках. Їхні поверхні в зонах гартування шорсткі й різноорієнтовані, тоді як в зонах навуглецювання вони гладкі й однаково орієнтовані відносно магістральної поверхні руйнування. Зони доламування мають переважно в'язку будову.

1. Grenier M., Dube D., Adnot A., Fiset M. Microstructure and wear resistance of CP titanium laser alloyed with a mixture of reactive gases // Wear. – 1997. – Vol. 210. – P. 127–135. 2. Yongqing Fu, Batchelor A.W. Laser nitriding of pure titanium with Ni, Cr for improved wear performance // Wear. – 1998. – Vol. 214. – P. 83–90. 3. Jiang P., He X.L., Li X.X., Yu L.G., Wang H.M. Wear resistance of a laser surface alloyed Ti-6Al-4V alloy // Surface and Coatings Technology. – 2000. – 130. – P. 24–28. 4. Плешаков Е., Сенявський Я., Філіп Р. Лазерне поверхневе модифікування сплаву Ti-6Al-4V карбідом силіцію //Фізико–хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 5. – С. 37–42. 5. Napadek W., Przetakiewicz W., Bogdanowicz Z. Rozvój pęknięc zmęczniowych w stali 40 H hartowanej laserowo // Inzyneria materiałowa. –2002. – № 5. – S. 557–562. 6. Malakondaiah G., Nicholas T. The Influens of Laser Glasing on Fatigue Crack Growth in Ti–24Al–11Nb. //Metalurgical and Materials Transactions A. – 1994. – Vol. 25A. – P. 183–190. 7. Yongqing Fu, Nee Lam Loh, et al. Improvement in fretting wear and fatigue resistance of Ti–6Al–4V by application several surface treatments and coatings // Surface and coatings technology. – 1998. – Vol 106. – P.193–197. 8. Ruschau J.J., Reji J., Thompson S.R., Nicholas T. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium// International Jornal of Fatigue. – 1999. – Vol. 21. – P. 199–209. 9. ГОСТ 23026–78. Металлы. "Метод испытания на многоцикловую и малоцикловую усталость". – М.: Изд. Стандартов, 1978. – 40 с. 10. J. Sieniawski, R. Filip, E. Pleshakow, G. Mrówka. Modification of Ti–6Al–4V titanium alloy microstructure as a result of laser carbonizing // Inzynieria Materialowa. – 2001. № 5 (124). – P. 819–822. 11. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с. 12. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / Под общей ред. Панасюка В.В. В 4 т. Т.4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua