

УДК 539.3620.194:621.795

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.74.671

## ВПЛИВ ЗМІЦНЕНОГО ЕЛЕМЕНТАМИ ПРОНИКНЕННЯ (О, С) ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ ТИТАНУ ЗА ВТОМНОГО ТА УДАРНОГО НАВАНТАЖЕНЬ

ТРУШ В. С.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
 ФЕДІРКО В. М.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф., гол. н. с.,  
 ЛУК'ЯНЕНКО О. Г.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.

<sup>1\*</sup> Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>2</sup> Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

<sup>3</sup> Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: [AGNSLUkryanenko@i.ua](mailto:AGNSLUkryanenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

**Анотація.** *Мета дослідження* – встановити вплив зміцненого приповерхневого шару елементами проникнення (киснем, вуглецем) на втомну довговічність титану за чистого згину та підвищених температур (до 350 °С) та ударну в'язкість за кімнатної температури. *Методика.* Досліджували зразки промислових титанових сплавів  $\alpha$ - (BT5-1 і ПТ-7М), псевдо- $\alpha$ - (OT4-1), ( $\alpha+\beta$ )- (BT14 і BT19) класів. Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі за режимом:  $T = 800$  °С,  $\tau = 5$  год.,  $P = 0,05$  мПа. Тонколистові зразки (~ 1 мм) насичували з кисне- та вуглецевмісного середовищ для формування градієнтного зміцненого приповерхневого шару без фазової плівки. *Результати.* Виявлено, що втомна довговічність в діапазоні температур  $T = 20...150$  °С титану BT1-0 не чутлива до температури випробувань при формуванні «оптимального» рівня зміцнення поверхні ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) після обробки у кисневмісному середовищі. За температур  $T = 150...400$  °С залежність довговічності титану має однаковий спадаючий характер для всіх досліджуваних рівнів ( $K = 70$  % та  $K = 140$  %) поверхневого зміцнення. Виявлено, що зміцнення ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) поверхневого шару, сформованого у кисне- та вуглецевмісному газових середовищах, підвищує ударну в'язкість на 4...6 % відносно необробленого ( $K = 0$  %) стану. *Наукова новизна.* Встановлено параметри зміцненого шару ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм), які сприяють підвищенню втомної довговічності на 15...25 % за чистого згину та підвищених температур  $T = 150$  °С, а також показано, що такий шар не викликає зниження ударної в'язкості титану BT1-0. *Практична значимість.* Формування зміцненого приповерхневого шару ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) може бути використане на тонколистових виробках із титанового сплаву BT1-0 для підвищення довговічності за циклічного навантаження та чистого згину до  $T = 150$  °С або для опірності за ударного навантаження.

**Ключові слова:** титановий сплав; газове середовище; приповерхневий шар; кисень; вуглець; втомна довговічність; ударна в'язкість

## ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕННОГО ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ (О, С) ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ТИТАНА ПРИ УСТАЛОСТНОЙ И УДАРНОЙ НАГРУЗКАХ

ТРУШ В. С.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,  
 ФЕДІРКО В. М.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф., гол. н. с.,  
 ЛУК'ЯНЕНКО О. Г.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.

<sup>1\*</sup> Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>2</sup> Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

<sup>3</sup> Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: [agnslukryanenko@i.ua](mailto:agnslukryanenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

**Аннотация.** *Цель исследования* – установить влияние упрочненного приповерхностного слоя элементами проникновения (кислородом, углеродом) на усталостную долговечность титана при чистом изгибе и повышенных температурах (до 350 °С) и ударную вязкость при комнатной температуре. **Методика.** Исследовали образцы промышленных титановых сплавов  $\alpha$ - (BT5-1 и ПТ-7М), псевдо- $\alpha$ - (OT4-1),  $(\alpha+\beta)$ - (BT14 и BT19) классов. После изготовления образцы отжигали в вакууме при режиме:  $T = 800$  °С,  $\tau = 5$  ч,  $P = 0,05$  МПа. Тонколистовые образцы ( $\sim 1$  мм) насыщали из кислород- и углеродсодержащих сред для формирования градиентного упрочненного приповерхностного слоя без фазовой пленки. **Результаты.** Выявлено, что усталостная долговечность в диапазоне температур  $T = 20\text{...}150$  °С титана BT1-0 не чувствительна к температуре испытаний при формировании «оптимального» уровня упрочнения поверхности ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) после обработки в кислородсодержащей среде. При температурах  $T = 150\text{...}400$  °С зависимость долговечности титана имеет одинаковый убывающий характер для всех исследуемых уровней ( $K = 70$  % и  $K = 140$  %) поверхностного упрочнения. Выявлено, что упрочнение ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) поверхностного слоя, сформированного в кислород- и углеродсодержащих газовых средах, повышает ударную вязкость на 4...6 % относительно необработанного ( $K = 0$  %) состояния. **Научная новизна.** Установлены параметры упрочненного слоя ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм), которые способствуют повышению усталостной долговечности на 15...25 % при чистом изгибе и повышенных температурах  $T = 150$  °С, а также показано, что такой слой не приводит к снижению ударной вязкости титана BT1-0. **Практическая значимость.** Формирование упрочненного приповерхностного слоя ( $K = 70$  %,  $l = 30$  мкм) может быть использовано на тонколистовых изделиях из титанового сплава BT1-0 для повышения долговечности при циклической нагрузке и чистом изгибе до  $T = 150$  °С или для сопротивляемости при ударной нагрузке.

**Ключевые слова:** титановый сплав; газовая среда; приповерхностный слой; кислород; углерод; усталостная долговечность; ударная вязкость

## INFLUENCE OF THE STRENGTHENED SURFACE LAYER BY ELEMENTS INTERSTITIAL OF (O, C) ON THE FRACTURE RESISTANCE OF TITANIUM DURING FATIGUE AND IMPACT LOADS

TRUSH V.S.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*,  
FEDIRKO V.M.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof., Chief Researcher*,  
LUKYANENKO A.G.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>2</sup> Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

<sup>3</sup> Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: [AGNSLUkyanenko@i.ua](mailto:AGNSLUkyanenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

**Abstract.** *The purpose* of the study to establish the effect of the strengthened near-surface layer by penetration elements (O, C) on the fatigue life of a clean bend at elevated temperatures (up to 350 °С) and impact strength at room temperature of titanium. **The Methodology.** We studied samples of industrial titanium alloys of  $\alpha$ - (VT5-1 and PT-7M), pseudo- $\alpha$ -(OT4-1),  $(\alpha + \beta)$ -(VT14 and VT19) classes. After fabrication, the samples were annealed in vacuum according to the mode:  $T = 800$  °С,  $\tau = 5$  h,  $P = 0,05$  МПа. Thin-sheet samples ( $\sim 1$  mm) were saturated with oxygen and carbon-containing media to form a gradient hardened near-surface layer without a phase film. **Results.** It was revealed that the fatigue life in the temperature range  $T = 20\text{...}150$  °С of VT1-0 titanium is not sensitive to the test temperature during the formation of the «optimal» level of surface hardening ( $K = 70$  %,  $l = 30$   $\mu\text{m}$ ) after treatment in oxygen-containing media. At temperatures  $T = 150\text{...}400$  °С, the dependence of the durability of titanium has the same decreasing character for all studied levels ( $K = 70$  % and  $K = 140$  %) of surface hardening. It is revealed that hardening ( $K = 70$  %,  $l = 30$   $\mu\text{m}$ ) of the surface layer formed in oxygen- and carbon-containing gas media increases the impact toughness by 4..6 % relative to the untreated ( $K = 0$  %) state. **Originality.** The parameters of the hardened layer ( $K = 70$  %,  $l = 30$   $\mu\text{m}$ ), which contribute to an increase in fatigue life by 15...25 % at pure bending at elevated temperatures  $T = 150$  °С, have been established, and it has also been shown that such a layer does not lead to a decrease in the impact titanium viscosity VT1-0. **Practical value.** The formation of a strengthened near-surface layer ( $K = 70$  %,  $l = 30$   $\mu\text{m}$ ) can be used in non-thin-sheet products made of VT1-0 titanium alloy to increase the durability under a cyclic load up  $T = 150$  °С or resistance to shock loading.

**Keywords:** titanium alloy; gaseous medium; surface layer; oxygen; carbon; fatigue life; impact strength

**Вступ.** Титан належить до легких металів, які через низьку питому густину та низький модуль пружності мають значні переваги під час використання в автомобільній та авіаційній промисловостях [1–4]. Корозійна інертність у багатьох середовищах зумовлює його широке використання у хімічній промисловості [5–8]. Цей комплекс властивостей робить титан та його сплави незамінними матеріалами для сучасних потреб промисловості.

Проте часто до титанових сплавів, використаних у відповідальних деталях і вузлах, які перебувають у складних умовах експлуатації, висуваються додаткові вимоги. Тому забезпечення тривалої експлуатації титанових виробів в особливо складних умовах без додаткової обробки поверхні неможливе.

Хіміко-термічна обробка – один з ефективних методів керування структурою та характеристиками приповерхневих шарів металів, що поліпшує низьку фізико-механічних властивостей матеріалу [9; 10]. Формування модифікованих зміцнених приповерхневих шарів на титані з використанням елементів проникнення має низьку перевагу. Зокрема, захисний модифікований шар формується з використанням матричного металу й тому міцно зчеплений з ним.

**Мета дослідження** – встановити вплив зміцненого приповерхневого шару елементами проникнення (киснем, вуглецем) на втомну довговічність титанових сплавів за симетричного чистого згину за підвищених температур (до 350 °C) та ударну в'язкість за кімнатної температури.

**Матеріали та методика досліджень.** Досліджували тонколисткові зразки (~ 1 мм) промислових титанових сплавів  $\alpha$ - (BT1-0, BT5-1, ПТ-7М),  $(\alpha+\beta)$ - (BT14, BT19) класів.

Після виготовлення зразки для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури) відпалювали у

вакуумі за режимом:  $T = 800$  °C,  $\tau = 5$  год,  $P = 0,05$  мПа.

Термодифузійне насичення з кисневмісної газової суміші здійснювали на лабораторній установці, яка спроектована та розроблена у ФМІ. Поверхневий газонасичений шар із різним рівнем зміцнення формували термодифузійним насиченням у динамічному розрідженому газовому кисневмісному середовищі. Режимми обробки вибирали за встановленими кореляціями між температурно-часовими й газодинамічними параметрами насичувального середовища й характеристиками зміцнених шарів.

Змінюючи парціальний тиск кисню, тривалість насичення і швидкість натікання кисню в реакційну камеру, одержували зміцнені шари з різним співвідношенням відносного приросту твердості  $K$  ( $K = ((H^{пов}_{0,49} - H^{серп}_{0,49})/H^{серп}_{0,49}) \cdot 100$  %, де  $H^{пов}_{0,49}$  – твердість поверхні металу;  $H^{серп}_{0,49}$  – твердість матриці металу).

Швидкість нагрівання становила  $\approx 200$  °C/год, а швидкість охолодження не регламентувалася (з піччю). Під час охолодження суцільних зразків за температури 270 °C в камеру печі напускали повітря для утворення тонкої оксидної плівки, яка запобігає наводнюванню металу за нормальних атмосферних умов. Зразки перед відпалом ретельно промивали в ацетоні та спирті, а потім висушували.

Для науглецювання титанових сплавів використовували установку для відпалу у вакуумі та контрольованих газових середовищах, що розроблена у ФМІ НАН України. Насичувальним середовищем слугувала газова суміш аргону з пропаном. Об'ємний вміст пропану складав 16,7 %.

Постійну концентрацію насичувальної складової ( $C_3H_8$ ) забезпечували неперервним напусканням вуглецевмісної газової суміші. Після закінчення насичувальної витримки камеру вакуумували і зразки охолоджували разом із піччю. Після охолодження реакційну камеру розгерметизовували та виймали зразки для подальших досліджень.

Випробування зразків досліджуваних сплавів на втому за умов симетричного чистого згину показано на рисунку 1.

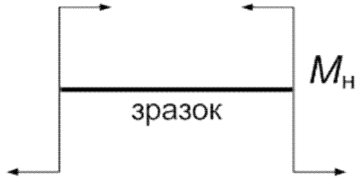


Рис. 1. Схема навантаження зразків під час випробування на втому чистим згином

Дослідження на втому проводили на машині УМДУ-01, розробленій та виготовленій у ФМІ НАН України, принципова схема якої наведена на рисунку 2.

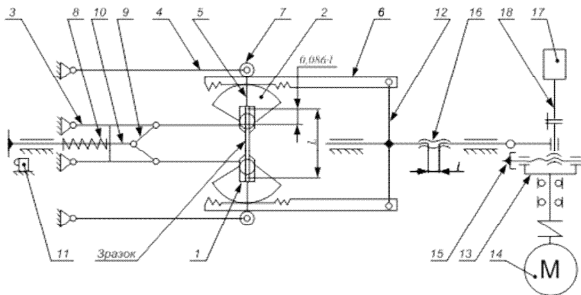


Рис. 2. Принципова схема машини (УМДУ-01) для випробувань матеріалів чистим згином:

- 1 – захват; 2 – зубчастий сектор; 3, 4 – вилка;
- 5 – ланка; 6 – рейка зубчата;
- 7 – ролик; 8 – пружина; 9, 10 – ланка; 11 – кінцевий вимикач; 12 – перекладина; 13 – регулювальний кривошип; 14 – двигун; 15 – мікрометричний механізм зміщення кривошипа; 16 – муфта для створення асиметричного циклу навантаження; 17 – лічильник; 18 – гнучкий вал

Результати випробувань малоцикловим чистим згином наводили в координатах «максимальна амплітуда деформації  $\epsilon_a$  – логарифм кількості циклів до руйнування».

Машина дозволяє проводити випробування чистим згином у режимі жорсткого навантаження із заданою амплітудою деформації  $\pm \epsilon_a$  за частоти навантаження  $\nu = 0,5$  Гц на повітрі та в газових середовищах за температури  $T = 20 \dots 800$  °C (рис. 2).

Експериментально визначено ударну в'язкість тонколистових зразків (~1 мм). Дослідження проведено на стандартній установці типу маятниковий копер моделі

КМ-0,5, яка призначена для стандартних лабораторних досліджень. Розроблено модифікацію цього копра для досліджень на розтяг при ударі (рис. 3).

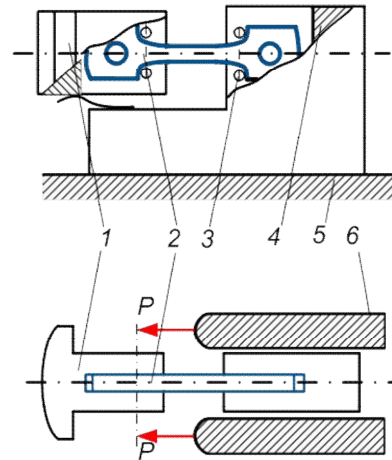


Рис. 3. Принципова схема пристрою для кріплення зразків в установці: 1 – рухомий сухарик, 2 – дослідний зразок, 3 – штифти, 4 – кронштейн, 5 – плита, 6 – головка копра

Модифікація копра полягала у розробленні спеціального пристрою для кріплення зразків. Дослідний зразок 2 кріпиться за допомогою двох штифтів 3 у кронштейні 4, який жорстко з'єднаний з основною плитою копра 5. Друга головка копра закріплена в рухомому сухарі 1. Для установки застосована спеціальна головка П-подібного перерізу. Попадаючи у крайнє нижнє положення, головка копра 6 вдаряється об виступи рухомого сухаря 1, через який передає зусилля ударного розтягу на дослідний зразок (рис. 5).

**Результати та їх обговорення.** Отримано експериментальні результати щодо впливу температури випробувань на довговічність титанового сплаву ВТ1-0 за симетричного чистого згину у широкому температурному діапазоні  $T = 20 \dots 400$  °C з різним рівнем відносного приросту твердості  $K$  (глибина зміцненої зони  $l = 30$  мкм) сформованого з кисневмісного газового середовища.

Установлено, що за рівня поверхневого зміцнення  $K = 70$  % в діапазоні температур  $T = 20 \dots 150$  °C втомна довговічність титану ВТ1-0 не чутлива до температури випробувань. За температур  $T = 150 \dots 400$  °C

залежність довговічності титану має однаковий спадний характер для всіх досліджуваних рівнів поверхневого зміцнення (рис. 4).

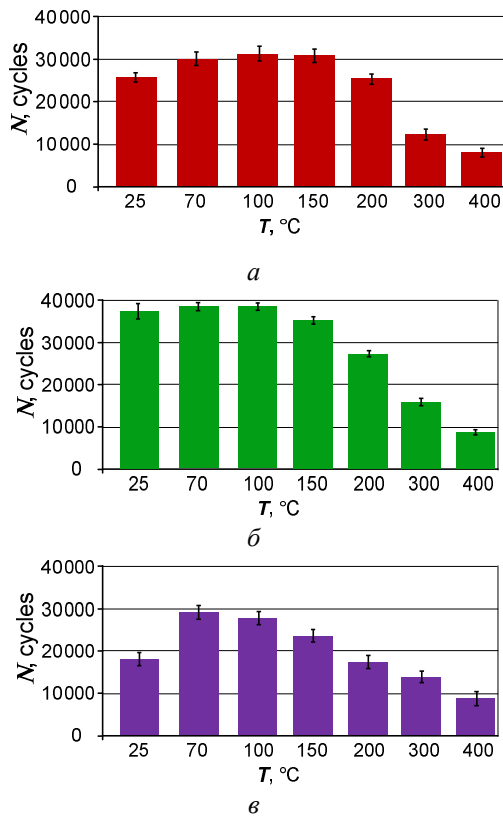
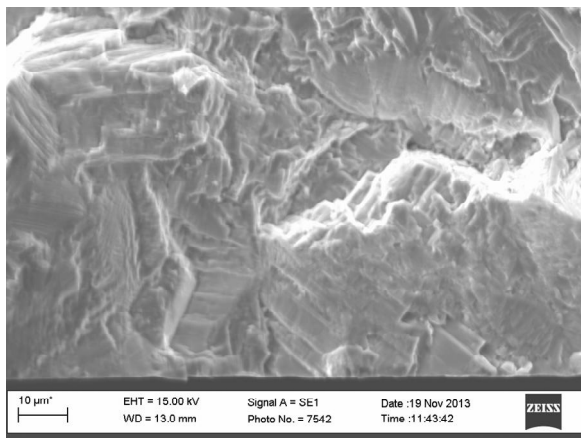
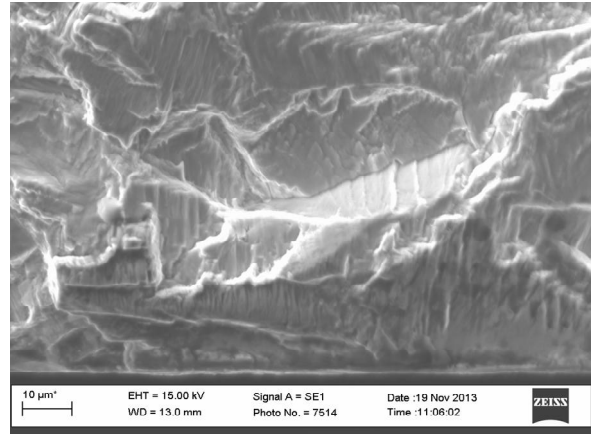


Рис. 4. Довговічність титанового сплаву VT1-0 за чистого згину залежно від температури випробувань з різним рівнем зміцнення  $K$ : а –  $K = 0\%$  (без обробки), б –  $K = 70\%$ , в –  $K = 140\%$

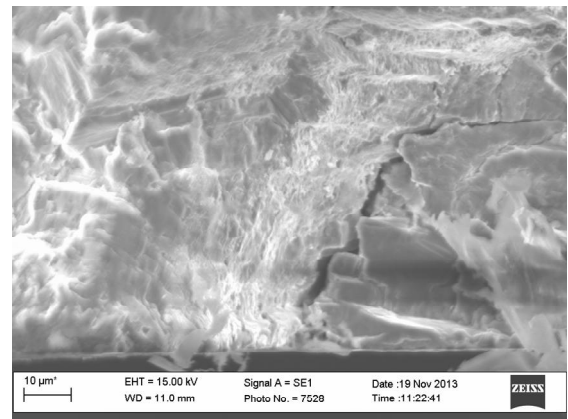
Згідно з результатами фактографічних досліджень, на поверхні зламу за  $K = 140\%$  зафіксовано вторинні тріщини, чого не спостерігається за  $K = 0\%$  та за  $K = 70\%$  (рис. 5).



а



б



в

Рис. 5. Злами приповерхневого шару зразків титанового сплаву VT1-0 після випробувань за чистого згину за кімнатної температури залежно від випробувань з різним рівнем зміцнення  $K$ : а –  $K = 0\%$  (без обробки), б –  $K = 70\%$ , в –  $K = 140\%$

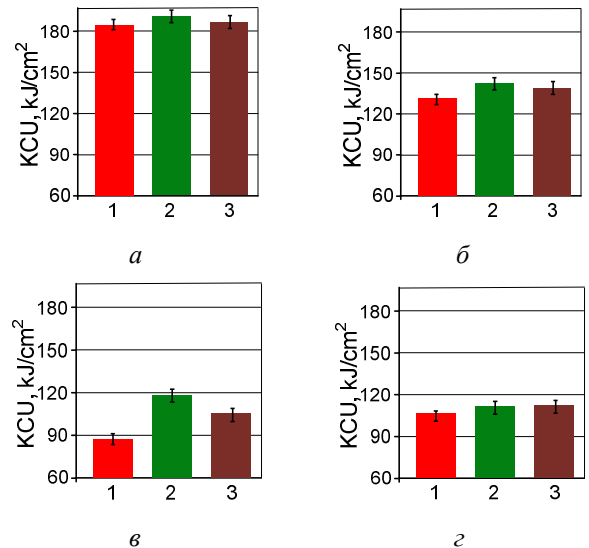


Рис. 6. Ударна в'язкість за умов розтягу титанових сплавів до обробки (1) та після обробки у кисневмісному (2) та вуглецевмісному середовищах (3): а – VT1-0, б – VT5-1, в – VT14, г – VT19

На рисунку 6 відображено результати впливу обробки у кисневмісному та вуглецевмісному середовищах на ударну в'язкість досліджуваних титанових сплавів.

Відповідно до отриманих результатів експериментальних досліджень обробка тонколистового (~ 1 мм) титанового сплаву VT1-0 у кисневмісному та вуглецевмісному газових середовищах на рівень поверхневого зміцнення  $K = 70 \%$ ,  $K = 90 \%$ , відповідно не викликає пониження ударної в'язкості за кімнатної температури. Навіть спостерігається незначне підвищення ударної в'язкості на 4...7 % відносно необробленого (перед хіміко-термічною обробкою). Такі підвищення ударної в'язкості можна пояснити позитивним впливом зміцненого поверхневого шару. Адже у приповерхневому шарі формується певний градієнт стискальних напружень, які, власне, і впливають позитивно на ударну в'язкість.

**Наукова новизна та практична значимість.** У цій статті вперше наведено результати досліджень, які свідчать, що втомна довговічність титану VT1-0 не чутлива до температури випробувань за наявності поверхневого зміцнення  $K = 70 \%$

в діапазоні температур  $T = 20...150 \text{ }^\circ\text{C}$ , за  $T = 150...400 \text{ }^\circ\text{C}$  залежність довговічності титану має спадний характер. Практична значимість отриманих результатів досліджень полягає в тому, що формування зміцненого приповерхневого шару з кисневмісного газового середовища на тонколистових виробах із титанового сплаву VT1-0 зумовлює підвищення довговічності за чистого симетричного згину до  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Отож, можна зазначити, що формування зміцненого приповерхневого шару з кисневмісного та вуглецевмісного газових середовищ дозволяє забезпечувати підвищення втомної довговічності за симетричного чистого згину та ударну в'язкість за випробувань розтягом.

**Висновки.** Експериментально виявлено, що втомна довговічність титану VT1-0 в діапазоні температур випробувань  $T = 20...150 \text{ }^\circ\text{C}$  не чутлива за рівня поверхневого зміцнення  $K = 70 \%$ , а за температур  $T = 150...400 \text{ }^\circ\text{C}$  залежність довговічності титану має однаковий спадний характер для всіх досліджуваних рівнів поверхневого зміцнення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London – New York – Singapore: Taylor & Francis Group, 2006. 207 p.
2. Hideki F., Kazuhiro T., Yoshito Ya. Application of titanium and its alloys for automobile parts. *Nippon Steel Technical Report*. 2003. № 88. Pp. 70–75.
3. Sha W., Malinov S. Modelling of Microstructure, Properties and Application Woodhead. Woodhead Publishing, 2009. 588 p.
4. Lutjering G., Williams J. C. Titanium: 2<sup>nd</sup> edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 438 p.
5. Geetha M., Singh A. K., Asokamani R., Gogia A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants : a review. *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54. Pp. 397–425.
6. Yoshiki O. Bioscience and bioengineering of titanium materials. Elsevier, 2007. 437 p.
7. Xuanyong L., Paul K. Chu, Xuanyong Ch. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 47. Pp. 49–121.
8. Shcherbakov A. I., Tomashov N. D., Kazarin V. I., Goncharenko B. A., Mikheev V. S. Corrosion properties of titanium alloys in sulfuric acid. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 26 (5). Pp. 259–262. URL: doi:10.1007/bf01149686.
9. Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., Trush V. S. Solid-Solution Hardening of the Surface Layer of Titanium Alloys. Part 1. Effect on Mechanical Properties. *Metal Science and Heat Treatment*. November 2014. Vol. 56, iss. 7. Pp. 368–373. URL: doi: 10.1007/s11041-014-9764-3).
10. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.H., Trush V.S. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys. *Materials Science*. November 2014. Vol. 50, iss. 3, pp. 415–420. URL: doi: 10.1007/s11003-014-9735-2

**REFERENCES**

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London – New York – Singapore: Taylor & Francis Group, 2006, 207 p.
2. Hideki F., Kazuhiro T. and Yoshito Ya. Application of titanium and its alloys for automobile parts. Nippon Steel Technical Report. 2003, no. 88, pp. 70–75.
3. Sha W. and Malinov S. Modelling of Microstructure, Properties and Application Woodhead. 2009, Woodhead Publishing, 588 p.
4. Lutjering G. and Williams J.C. Titanium: 2<sup>nd</sup> edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 438 p.
5. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R. and Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: a review. Progress in Materials Science. 2009, vol. 54, pp. 397–425.
6. Yoshiki O. Bioscience and bioengineering of titanium materials. Elsevier, 2007, 437 p.
7. Xuanyong L., Paul K. Chu and Xuanyong Ch. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. Materials Science and Engineering. 2004, vol. 47, pp. 49–121.
8. Shcherbakov A.I., Tomashov N.D., Kazarin V.I., Goncharenko B.A. and Mikheev V.S. Corrosion properties of titanium alloys in sulfuric acid. Chemical and Petroleum Engineering. 1990, vol. 26 (5), pp. 259–262. URL: doi:10.1007/bf01149686.
9. Fedirko V.N., Luk'yanenko A.G., and Trush V.S. Solid-Solution Hardening of the Surface Layer of Titanium Alloys. Part 1. Effect on Mechanical Properties. Metal Science and Heat Treatment. November 2014, vol. 56, iss. 7, pp. 368–373. URL: doi: 10.1007/s11041-014-9764-3).
10. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.H. and Trush V.S. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys. Materials Science. November 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 415–420. URL: doi: 10.1007/s11003-014-9735-2

Надійшла до редакції: 02.08.20.