

ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ ПРОЦЕСІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА КОРОЗІЙНУ ТРИВКІСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ

М. Г. ЧАУСОВ¹, П. О. МАРУЩАК², А. П. ПИЛИПЕНКО¹,
Я. М. ХАБУРСЬКИЙ³

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ;

² Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Порівняно механічні властивості та корозійну тривкість зразків із листового двофазного високоміцного титанового сплаву ВТ22 у вихідному стані, після статичного розтягу та реалізації динамічних незрівноважених процесів і подальшого статичного розтягу. Показано, що одиничні динамічні незрівноважені процеси під час ударно-коливального навантаження суттєво підвищують вихідну пластичну деформацію сплаву і практично не впливають на його корозійну тривкість.

Ключові слова: ударно-коливальне навантаження, динамічний незрівноважений процес, високоміцний титановий сплав, механічні властивості, корозійна тривкість.

Відомо, що ударні навантаження можуть спричиняти когерентну поведінку окремих елементів системи (самоорганізацію), яка супроводжується суттєвою зміною механічних властивостей матеріалу. Застосування таких методів обробки забезпечило створення матеріалів із поліпшеними фізико-механічними властивостями [1, 2], наприклад, за лазерного ударно-хвильового навантажування. Цей підхід є актуальним й для механіки матеріалів. Однак до сьогодні відсутні методики механічних випробувань конструкційних матеріалів за динамічних незрівноважених процесів (ДНП), які б забезпечували повторюваність і достовірність відтворення таких результатів. Саме тому механічну поведінку матеріалів за ДНП вивчено недостатньо [3].

Вперше розроблено [4, 5] ефективну методику відтворення ДНП за високошвидкісного розтягу матеріалу з накладанням коливального процесу з високою частотою (кілька кілогерц). Такий режим навантаження забезпечували модифікацією випробувальної установки, яка містила два контури – зовнішній (навантажувальну раму випробувальної машини) і внутрішній. Внутрішній контур – це найпростіша статично невизначена конструкція з трьох паралельних елементів, які навантажували одночасно центральний зразок та два симетричних зразки-супутники (крихкі проби) різного поперечного перерізу, виготовлені із загартованих сталей 65Г чи У8-У12. Під час навантаження цієї конструкції зразки-супутники руйнувались (за попередньо заданих навантажень чи деформацій) і відбувалось задане імпульсне введення енергії в зовнішній контур випробувальної установки і матеріал досліджуваного зразка з реалізацією вказаного ударно-коливального навантаження з частотою коливань, яка дорівнювала власній частоті коливань випробувальної машини. Аналіз отриманих результатів на матеріалах різних класів показав, що в перехідних режимах навантаження за коротких імпульсів силового підвантаження, коли дисипація енергії в класичному сенсі (перетворен-

ня механічної енергії в тепло) ще не почалась, можлива самоорганізація нових дисипативних структур у конструкційних матеріалах, фізичні і механічні характеристики яких суттєво відрізняються від властивостей вихідних структур [3–7].

Зміну механізму деформації матеріалів за ДНП пов'язують з істотною швидкістю підведення енергії до зразка матеріалу за ударно-коливального навантаження. При цьому за дуже короткий час $((15...45) \cdot 10^{-3} \text{ s})$ зразок матеріалу піддавали малоцикловому високочастотному навантаженню зі значною амплітудою напружень (десятки МПа) [8]. Реалізація ДНП забезпечила регулювання міцнісних і пластичних характеристик матеріалів. Раніше за такого режиму навантаження виявлено пластифікацію сталей та алюмінієвих сплавів на висхідній гілці діаграми деформацій, зміну довжини ділянок діаграми деформування і міцнісних характеристик. Одержано квазінадпластичний стан за кімнатної температури (до кількох десятків відсотків залишкової деформації) внаслідок одно- і багаторазових імпульсних підвантажень, реалізовано резерви механічних властивостей матеріалів на стадіях знеміцнення і росту макротріщини [3–7, 9]. Під час експериментів також встановлено, що за реалізації ДНП щільність новостворених дисипативних структур є меншою, ніж основного матеріалу і тому під час випробувань матеріалів ці структури екструдують на поверхні зразків [10].

Мета роботи – дослідити вплив режимів ДНП на механічні властивості та корозійну тривкість листового двофазного високоміцного титанового сплаву ВТ22.

Методики випробувань. Особливості методики механічних випробувань з утворенням ДНП детально описані раніше [4–6]. Загалом ДНП виконували за таким алгоритмом: статично розтягували досліджувані зразки до заданого рівня навантаження/деформації за регламентом експерименту; закручували в тензометричні штанги крихкі зразки-супутники (крихкі проби) (рис. 1); навантажували внутрішній контур (зразок + крихкі проби) до руйнування крихких проб, що спричиняло коливання у випробувальній установці з одночасним переміщенням гідравлічного циліндра в напрямі розтягу досліджуваного зразка, і цим забезпечувало ДНП; зупиняли систему оператором чи продовжували статично деформувати зразок до руйнування.

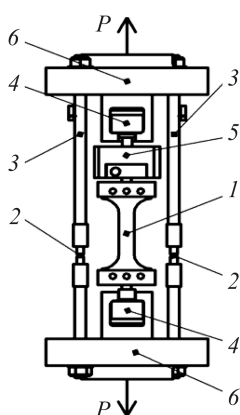


Рис. 1. Схема внутрішнього контуру випробувальної установки: 1 – досліджуваний зразок; 2 – крихкі проби; 3 – тензометричні штанги; 4 – сферичні опори; 5 – динамометр (власна частота 12 kHz); 6 – фланці.

Fig. 1. Scheme of the inner loop of test installation: 1 – sample; 2 – fragile samples; 3 – gage bar; 4 – spherical bearings; 5 – dynamometer (natural frequency of 12 kHz); 6 – flanges.

Отже, фізико-механічний зміст ДНП полягав у високошвидкісному розтязі матеріалу з накладанням на нього високочастотного високоамплітудного навантаження. Такий режим навантаження забезпечували вільними коливаннями механічної системи (рис. 1) та надлишком тиску в гідравлічній системі. При цьому контролювали зміну співвідношення жорсткість/маса зовнішнього контуру системи та проскок гідроциліндра, що залежали від руйнівного зусилля крихких проб. Під час експерименту зусилля на зразку та крихких пробах оцінювали за

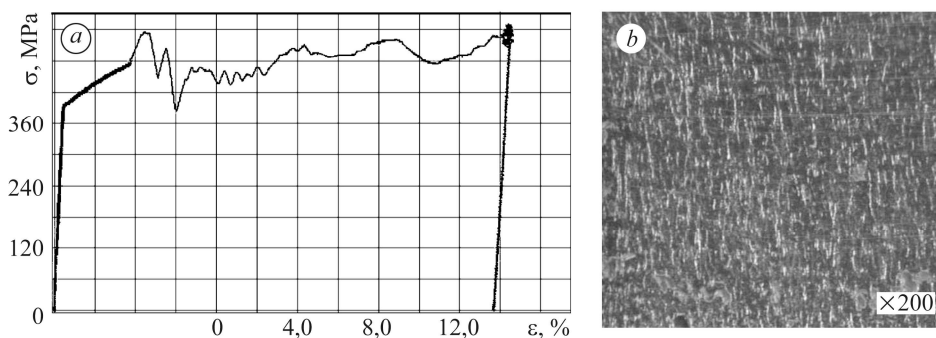


Рис. 3. Діаграма деформування сплаву Д16 з урахуванням імпульсного підвантаження ($P_{imp} = 82,9 \text{ kN}$) (a) та рельєф сенсора після нього (b).

Fig. 3. Deformation of the alloy Д16 with account of pulse uploading ($P_{imp} = 82.9 \text{ kN}$) (a) and relief pulse sensor after it (b).

Вплив ДНП на криві деформування. Форма типової діаграми деформування сплаву ВТ22 за статичного розтягу свідчить про те, що сплав не схильний до зміцнення і має невисоку вихідну пластичну деформацію (рис. 4, крива 1). Момент початку “шийкоутворення” оцінювали класичним методом – визначали перегин на діаграмі деформацій. Візуально його можна прийняти як точку, за якої деформація становить 7,6%.

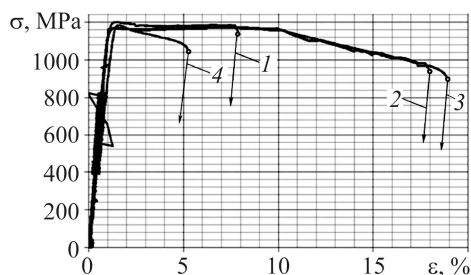


Рис. 4. Діаграми деформування титанового сплаву ВТ22: 1 – статичний розтяг; 2 – ДНП1; 3 – ДНП2; 4 – ДНП4.

Fig. 4. Diagrams of deformation of titanium alloy ВТ22: 1 – static tension; 2 – DNP1; 3 – DNP2; 4 – DNP4.

Далі на чотирьох партіях зразків відтворено чотири складні режими навантаження за такими схемами:

ДНП1 – стандартне статичне розтягування (СР) зразка до напружень $0,03\sigma_{0,2}$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня напружень на зразку ($\sigma_{\Sigma} = \sigma_{st} + \sigma_{imp} = (0,7 \dots 0,8)\sigma_{0,2}$) – подальше СР до руйнування зразка.

ДНП2 – СР зразка до напружень $0,08\sigma_{0,2}$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня напружень на зразку $\sim \sigma_{0,2}$ ($\sigma_{\Sigma} = \sigma_{st} + \sigma_{imp} \approx \sigma_{0,2}$) – подальше СР до руйнування зразка.

ДНП3 – СР зразка до напружень $0,08\sigma_{0,2}$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня напружень на зразку $\sim \sigma_{0,2}$ ($\sigma_{\Sigma} = \sigma_{st} + \sigma_{imp} \approx \sigma_{0,2}$) – повне розвантаження зразка.

ДНП4 – процедуру режиму ДНП3 повторили три рази. Далі зразок статично розтягували до руйнування.

У всіх експериментах руйнування зразків-супутників відбувалося в межах вузького діапазону навантаження $50,7 \pm 7 \text{ kN}$. Отримані діаграми деформування сплаву ВТ22 за складних режимів навантаження ДНП1, ДНП2 порівнювали з результатами статичних випробувань.

Одноразові ДНП. На рис. 4 подані характерні криві деформацій сплаву ВТ22 за складних режимах навантаження ДНП1, ДНП2 та ДНП4. ДНП1 і ДНП2 однаково дещо зменшили границю міцності сплаву (від 1200 до 1160 МПа) та

суттєво збільшили ділянку його рівномірної пластичної деформації (від 7,6 до 10%). Однак особливо суттєвий їх вплив спостерігали на спадній ділянці діаграми деформування – зростання пластичної деформації до 18,0% (ДНП1) та 19,0% (ДНП2).

Незначна, порівняно із конструкційними сталями, ділянка рівномірної пластичної деформації (7,6%) титанового сплаву вказує на його високу схильність до локалізації пластичної деформації і, відповідно, до швидкого утворення шийки та практичної відсутності запасу пластичності після її утворення. Режими складного навантаження ДНП1 і ДНП2 очевидно активують такі дислокаційні джерела, які є заблоковані під час статичного навантаження. На цей процес накладається фрагментація структури сплаву, яка замовлена суперпозицією імпульсного підвантаження та високочастотного високоамплітудного циклічного деформування. Цей процес особливо активується на рівні границі текучості, коли кристалічна ґратка металів втрачає механічну тривкість [12].

Значне поліпшення пластичності сплаву після реалізації ДНП опосередковано свідчить про суттєві “позитивні” структурні зміни в сплаві як на мікро-, так і на макрорівнях, вплив яких необхідно враховувати під час побудови моделей поведінки матеріалів за таких складних режимів навантаження та оцінок коефіцієнтів запасу міцності.

Багаторазові ДНП. Багаторазові імпульсні підвантаження на пружній ділянці діаграми деформування (ДНП4) значно погіршили механічні властивості титанового сплаву VT22 за подальшого статичного розтягу порівняно зі стандартним статичним розтягом (рис. 4, крива 4).

У сплаві під час ДНП4 за багаторазового складного навантаження до границі текучості розвивається об’ємна пошкодженість у вигляді тріщиноподібних дефектів внаслідок дії саме циклічного навантаження з високою асиметрією. Непрямим підтвердженням розвитку об’ємної пошкодженості є помітне зниження модуля пружності сплаву (різний нахил ділянок пружного навантаження) та феномен знеміцнення на ділянці рівномірного пластичного деформування (різний нахил ділянок до утворення шийки).

Отже, за такої схеми навантаження позитивні якості дисипативної структури втрапились, а пошкодженість чи дефекти, отримані в результаті ДНП, не зникли, а навпаки, накопичились [13, 14]. Відносна пластична деформація сплаву VT22 після ДНП знизилась з 7,6 до 5,6%.

Обговорення впливу режимів ДНП. Зазначимо певні особливості механічної поведінки сплаву VT22, які отримано з порівняльного аналізу кривих діаграм деформування. По-перше, виявлений протилежний характер зміни відносної деформації зразків за ДНП1, ДНП2 порівняно з ДНП4: у перших двох пластична деформація зростає, що свідчить про позитивний вплив одноразових імпульсних підвантажень, а для багаторазових (ДНП4), навпаки, знижується.

Таким чином, експериментально встановлено, що одноразове імпульсне підвантаження на пружній ділянці діаграми деформування суттєво підвищує пластичну деформацію титанового сплаву за подальшого статичному розтягу. У разі, якщо напруження у зразку, з урахуванням імпульсних підвантажень, не перевищували границі текучості матеріалу, то міцнісні властивості матеріалу також відрізнялись несуттєво від результатів, одержаних за статичного розтягу.

Найоптимальніший режим складного навантаження відповідає ДНП2, за якого зафіксували зростання пластичної деформації сплаву в 2,5 рази практично без втрати міцнісних характеристик.

Для ДНП4 притаманне інтенсивне розпорошене пошкодження. Це можна пояснити так: дисипативні структури утворюються внаслідок концентрації дефектів у матеріалах [15, 16] і якщо відбувалися три послідовні силові імпульси,

то з високою ймовірністю можна стверджувати, що в сплаві накопичувались значні пошкодження та мікродфекти, а у конкретному локалізованому перерізі виникла підвищена, порівняно з іншим матеріалом, щільність дефектів. На те, що піддатливість зразка сплаву збільшилась через накопичування пошкоджень вказує і помітне зниження його модуля пружності. Саме це й спричинило погіршення механічних властивостей матеріалу після ДНП4.

Вплив режимів ДНП на механічні властивості титанового сплаву VT22 узагальнено у таблиці.

Механічні властивості титанового сплаву VT22 після різних схем ДНП

Параметри	СР	ДНП1	ДНП2	ДНП3	ДНП4
σ_B , МПа	1200	1160	1160	1180	1180
ϵ , %	7,6	18,0	19,0	0	5,6

Корозійні випробування. Після механічних випробувань зразків із сплаву VT22 оцінювали вплив режимів навантаження на його корозійну тривкість. Середні значення R_p ($\times 10^8$, $\Omega \cdot \text{cm}^2$) такі: для вихідного стану – 1,1; після СР – 1,5; ДНП1 – 2,0; ДНП2 – 3,1; ДНП3 – 1,6; ДНП4 – 2,7.

Електрохімічна оцінка корозійної тривкості сплаву VT22 у вихідному стані та після різних режимів навантаження свідчить про те, що поляризаційний опір сплаву R_p як мінімум не погіршується. Водночас відомо, що корозійна тривкість конструкційних низьколегованих сталей у напруженому стані та після попереднього пластичного деформування суттєво (у 2–3 рази) знижується. Відсутність негативного впливу, а для деяких випадків і позитивний вплив ДНП, зумовлено високими захисними властивостями поверхневих пасивних плівок на титанових сплавах, ефективність яких не залежить від структурного стану сплавів.

Таким чином, наново створена дисипативна структура під час реалізації ДНП практично не впливає на корозійну тривкість титанового сплаву. Це має велике практичне значення, оскільки ефекти, які пов'язані з реалізацією ДНП, можна використовувати в технологіях ударної штамповки високоміцних мало-пластичних титанових сплавів для виробів спеціальної техніки.

ВИСНОВКИ

Виявлено закономірності впливу різних схем реалізації ДНП на деформаційну поведінку двофазного високоміцного титанового сплаву VT22. Встановлено, що ДНП за попереднього статичному розтягу сплаву VT22 може збільшувати або зменшувати пластичну деформацію матеріалу. Виявлено оптимальний режим складного навантаження “статичний розтяг зразка до заданого рівня напружень або деформацій – задане імпульсне силове підвантаження”, за якого можна збільшити загальну пластичність сплаву порівняно з вихідним станом в 2,5 рази майже без втрати міцнісних характеристик. Запропоновано фізичну інтерпретацію виявлених закономірностей, що дасть змогу забезпечити їх технологічне застосування. Доведено, що динамічні незрівноважені процеси, які реалізуються внаслідок ударно-коливального навантаження, практично не впливають на корозійну тривкість сплаву VT22.

РЕЗЮМЕ. Проведено сравнение механических свойств и коррозионной стойкости образцов из листового двухфазного высокопрочного титанового сплава VT22 в исходном состоянии, после статического растяжения и реализации динамических неравновесных процессов и последующего статического растяжения. Показано, что единичные динамические неравновесные процессы при ударно-колебательном нагружении значительно повышают исходную пластическую деформацию сплава и практически не влияют на его коррозионную стойкость.

SUMMARY. A comparative evaluation of the mechanical properties and corrosion resistance of samples made of sheet two-phase high-strength BT22 titanium alloy in the initial state, after static stretching and after realization of dynamic nonequilibrium processes and subsequent static stretching is done. It is shown that single dynamic nonequilibrium processes, under shock-vibrational loading, significantly increase the initial plastic deformation of the alloy and practically do not affect the change in its corrosion resistance.

1. Ясній П. В., Марущак П. О. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
2. *Experimental study of the surface of steel 15Kh13MF after the nanosecond laser shock processing* / P. Maruschak, I. Zakiev, V. Mocharsky, Y. Nikiforov // *Solid State Phenomena*. – 2013. – 200. – P. 60–65.
3. *Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах* / Н. Г. Чаусов, Е. Э. Засимчук, Л. И. Маркашова, В. Э. Вильдеман, Т. В. Турчак, А. П. Пилипенко, В. Н. Параца // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2009. – **75**, № 6. – С. 52–59.
4. *Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading* / M. G. Chausov, V. B. Berezin, A. P. Pylypenko, V. B. Hutsaylyuk // *J. Strain. Anal.* – 2014. – **50**. – P. 61–62.
5. *Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes* / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko // *Eng. Failure Analysis*. – 2013. – **35**. – P. 636–644.
6. *Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT22 under impact-oscillatory loading* / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko, and L. Markashova // *Philosophical Magazine*. – 2017. – **97**. – P. 389–399.
7. *Influence of combined loading on microstructure and properties of aluminum alloy 2024-T3* / E. Zasimchuk, L. Markashova, O. Baskova, T. Turchak, N. Chausov, V. Hutsaylyuk, V. Berezin // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – **22** (11). – P. 3421–3429.
8. *Influence of dissipative structures formed by impulse loads on the processes of deformation and fracture* / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko, K. Volyanska // *Key Engng Materials*. – 2014. – **577–578**. – P. 273–276.
9. *Патент України № 91389. Спосіб реалізації надпластичного стану матеріалу у процесі деформування* / М. Г. Чаусов, А. П. Пилипенко, В. М. Параца, В. Б. Березін. – Опубл. 26.07.2010; Бюл. № 14.
10. *Методы исследования свойств диссипативных структур, образующихся при импульсном вводе энергии в материал* / Н. Чаусов, Е. Засимчук, В. Гуцайлук, Е. Волянская // *Вісник Тернопільськ. нац. техн. ун-ту*. – 2011. – Спец. вип. 2. – С. 92–97.
11. *Коррозия: Справ.* / Пер. с англ. под ред. Л. Л. Шрайера. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.
12. *Stern M. A method for determining corrosion rates from linear polarization data* // *Corrosion*. – 1958. – **14**, № 9. – P. 440–444.
13. *Yasnii P. V., Glad' o V. B., and Okipnyi I. B. Relationship between rupture stress and microstructure parameters of plastically deformed heat-resistant steel* // *Strength of Materials*. – 2007. – **39**. – P. 349–357.
14. *Deformation and fracture of surface-hardened materials at meso- and macroscale levels* / R. R. Balokhonov, Yu. P. Stefanov, P. V. Makarov, I. Yu. Smolin // *Theor. Appl. Fracture Mech.* – 2000. – **33**. – P. 9–16.
15. *Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей* / П. О. Марущак, С. В. Панин, А. З. Студент, Б. Б. Овечкин. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. – 236 с.
16. *Чаусов М. Г., Пилипенко А. П., Марущак П. О. Методика поліпшення пластичних властивостей листових двофазних високоміцних титанових сплавів за рахунок ударно-коливального навантаження: науково-методичні рекомендації для підприємств України з проектування виробництва сільськогосподарської техніки*. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2017. – 48 с.

Одержано 09.11.2016