

ПОЛІПШЕННЯ ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ ДВОФАЗНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЗА РАХУНОК УДАРНО-КОЛИВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

М.Г. Чаусов¹, П.О. Марущак², А.П. Пилипенко¹

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

It is established experimentally that dynamic non-equilibrium processes (DNP) with self-organizing structure occur under impact-oscillatory loading in high-strength two-phase titanium alloys VT22 and VT23. Under the repeated static tension of alloys, DNPs cause significant changes in the initial plasticity of the alloys. For investigated alloys, the optimal modes of impact-oscillatory loading are substantiated, which ensure a maximum increase in their plastic deformation after the implementation of DNP.

Ключові слова: ударно-коливальне навантаження, динамічний нерівноважний процес, високоміцні двофазні титанові сплави, зміна пластичних властивостей.

Вступ. Згідно досліджень брюссельської наукової школи на чолі із І. Пригожиним показано, що за умов нелінійної динаміки (хаотичної динаміки) в будь-яких фізико-хімічних системах структура самоорганізується з появою нових властивостей речовини, за значних відхилень від рівноваги.

На кафедрі механіки НУБіП України вперше розроблено і апробовано просту та ефективну методику механічних досліджень для створення динамічних нерівноважних процесів в об'ємі матеріалу ударно-коливальним навантаженням за кімнатної температури [1, 2].

Аналіз отриманих авторами результатів з випробування матеріалів різних класів в умовах ударно-коливального навантаження свідчить, що за перехідних режимів навантаження, при коротких імпульсах силового підвантаження, коли є перенесення маси, а дисипація енергії в класичному сенсі (перетворення механічної енергії в тепло) ще не почалась, дійсно можливі процеси самоорганізації матеріалів з утворенням нових дисипативних структур, фізичні і механічні властивості яких суттєво відрізняються від властивостей вихідних [3-11]. Експериментально підтверджено, що за навантаження матеріалів коротким силовим імпульсом за кімнатних температур, енергія введена в полікристалічне середовище не встигає розсіятись, оскільки дифузійні механізми є уповільненими. Тому, вона переходить з макроскопічного рівня на певний проміжний мезоскопічний рівень і витрачається на утворення нових дисипативних структур. На нашу думку, цей процес відбудеться, якщо тривалість навантаження і час утворення дисипативних структур (внутрішній час) будуть однаковими або близькими за значенням.

Титанові високоміцні двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави VT22, VT23 широко поширені в перспективних конструкціях авіаційної, ракетної, космічної й спеціальної техніки. Порівняно з високоміцними закордонними β -сплавами, в титанових ($\alpha+\beta$)-сплавах VT22 і VT23 є менша кількість дорогих і дефіцитних легуючих елементів. Вони мають вищі механічні і експлуатаційні властивості основного матеріалу та особливо зварених з'єднань, а також підвищені характеристики тріщиностійкості.

Титанові сплави також застосовуються у виробках спеціальної техніки, зокрема для захисних пластин сучасних бронезилетів, які виготовляють зі сплаву VT23. Проте, їх «типовим» недоліком є відносно невисока вихідна пластична деформація. На практиці для зміни вихідних механічних властивостей двофазних титанових сплавів використовують різні методи, котрі можна об'єднати у дві основні групи.

Методи першої групи пов'язані з термоциклічним обробленням за різних температур і відповідних часових витримок. Методи другої групи містять термосилові навантаження титанових сплавів, як за простих схем монотонного навантаження: розтяг, усадка, кручення,

розтяг з одновісним крученням, так і за складних режимів термосилового впливу, так званих методів інтенсивного пластичного деформування (ІПД): рівноканальне кутове (РКК) пресування, кручення під тиском, всебічне кручення та ін. Їх наслідком є зміни вихідної структури і, відповідно, підвищення пластичності і в'язкості титанових сплавів. Однак, застосування цих методів потребує використання дороговартісного технологічного обладнання і складних технологічних процедур термосилового навантаження.

Розробка ефективного технологічного методу збільшення вихідної пластичності титанових сплавів за ударно-коливального навантаження, при кімнатній температурі, який можна реалізувати на будь-якій гідравлічній випробувальній машині, в десятки разів здешевлює процедуру випробувань. Причому, є важливим те, що суттєвого зростання вихідної пластичності двофазних високоміцних титанових сплавів досягається без помітного зниження міцнісних властивостей сплавів.

Метою даного дослідження є обґрунтування оптимальних режимів ударно-коливального навантаження, високоміцних двофазних титанових сплавів ВТ22 і ВТ23 для забезпечення максимального зростання їх пластичності.

Методики досліджень. З використанням розробленої і апробованої методики реалізації ДНП за ударно-коливального навантаження [1-11] випробовували зразки з листових двофазних високоміцних сплавів ВТ22 і ВТ23, товщиною 3 мм (рис.1) при кімнатній температурі. Механічні властивості сплавів ВТ22 і ВТ23 подані в таблиці 1.

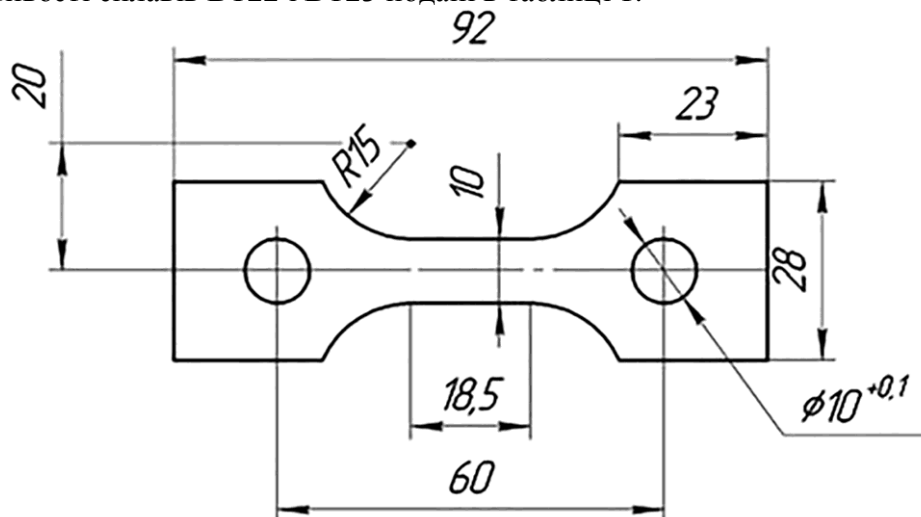


Рис.1. Зразок для випробувань

Таблиця 1 - Механічні властивості досліджуваних титанових сплавів

Марка матеріалу	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_g , МПа	δ , %
ВТ22	980-1180	1080-1280	6-8
ВТ23	950 -1100	1100-1200	10-13

При ударно-коливальному навантаженні самовільна самоорганізація структури відбувається таким чином, щоб забезпечила інтенсивніший механізм передачі енергії через матеріал. Очевидно, формування дисипативних структур не лише «зливає» енергію в наявні та свіжо сформовані пошкодження матеріалу, але й внаслідок їх накопичення модифікує його на межах цих пошкоджень.

Тому один і той самий імпульсний вплив на матеріал, залежно від ступеня його попереднього деформування статичним розтягом (і, відповідно, пошкодження його вихідної структури), буде спричиняти різні наслідки. Аналогічно суттєвим буде вплив на зміну механічних властивостей і самої інтенсивності силового імпульсу.

Таким чином, для обґрунтування оптимальних режимів ударно-коливального навантаження титанових сплавів, за яких виникає максимальне зростання їх пластичності,

слід, як мінімум, змінювати два параметра: ступінь попереднього деформування сплавів статичним розтягом і інтенсивність силового імпульсу.

Необхідно звернути увагу на ще один дуже важливий момент. Результати дифрактометричного дослідження показали, що в титановому сплаві VT22 β -фаза займає 30,3% ваги, α -фаза – 69,7%; в титановому сплаві VT23 β -фаза займає 43% ваги, α -фаза -57%. Тобто первісно в титановому сплаві VT23 більше пластичнішої β -фази. Крім того, розкид вихідних розмірів зерен β -фаз в сплаві VT22 (35...125 мкм) є значно більшим порівняно зі сплавом VT23.

В даній роботі реалізовано два режими випробувань. За першим режимом серії зразків із сплавів VT22 та VT23 спочатку статично розтягували до початкового навантаження 2...4 кН і далі послідовно піддавали впливу зростаючим силовим імпульсом $F_{imp.} = 45...156$ кН. При імпульсному введенні енергії в сплави фіксували проскоки деформацій $\varepsilon_{imp.}$. Після реалізації ДНП зразки повністю розвантажували та повторно навантажували статичним розтягом до руйнування. За величиною параметру $\varepsilon_{imp.}$ визначали вплив імпульсного введення енергії на збільшення пластичної деформації сплавів порівнянні з вихідним станом.

За другим режимом навантажування, серії зразків із сплавів VT22 і VT23 спочатку навантажували статичним розтягом до початкового навантаження 8 кН і вище з кроком 2 кН. При цих фіксованих значеннях статичних навантажень зразки піддавали впливу заданим імпульсним підвантаженням $F_{imp.} = 45...50$ кН. Подальша процедура випробувань була аналогічною першого режиму.

Результати досліджень. На рис. 2 подано криві деформування сплаву VT22 після реалізації ДНП. При цьому, загальні напруження від дії попереднього статичного розтягу та імпульсного введення енергії не перевищували межі текучості сплаву.

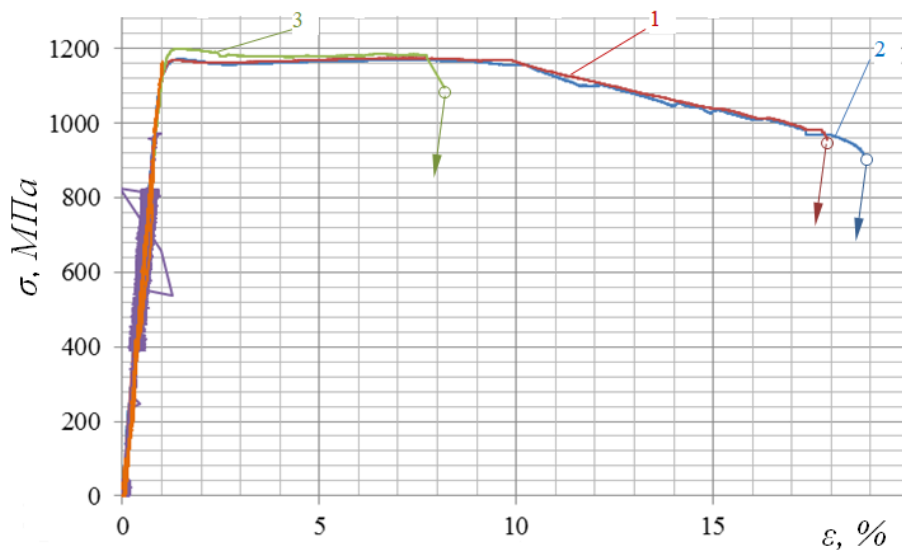


Рис. 2. Діаграми деформування титанового сплаву VT22: 1 – ДНП1; 2 – ДНП2; 3 – статичний розтяг

Слід відзначити, що подані на рис. 2 дві криві деформування за ДНП (ДНП1 і ДНП2) відображають однакове зниження межі міцності сплаву (від 1200 МПа до 1160 МПа) та значне зростання довжини ділянки рівномірного пластичного деформування (від 7,6% до 10%). Однак особливо вагомий вплив спостерігали на спадній ділянці діаграми деформування - зростання пластичної деформації до 18,0 % (ДНП1) та 19,0 % (ДНП2).

На нашу думку, режими складного навантажування ДНП1 і ДНП2 активують певні дислокаційні джерела, які були заблоковані протягом статичного деформування. Це поєднується з фрагментацією структури сплаву, зумовленою суперпозицією імпульсного підвантаження та високочастотного високоамплітудного циклічного навантажування. Цей процес особливо активується на рівні умовної межі текучості, коли кристалічна ґратка металів втрачає механічну стійкість.

Значне покращення пластичної деформації сплаву VT22 після реалізації ДНП опосередковано свідчить про наявність значних позитивних структурних змін в сплаві як на мікро- так і на макрорівнях. Отже, їх вплив слід враховувати при побудові моделей поведінки матеріалів за таких складних режимів навантаження та оцінюванні коефіцієнтів запасу міцності.

Аналіз отриманих експериментальних результатів на зразках зі сплаву VT23 виявив, що максимальний ефект від введення імпульсної енергії в сплав проявляється тоді, коли в процесі імпульсного введення енергії в сплав проскоки пластичної деформації сягають значень $\epsilon_{imp} = 3,0 \dots 3,5 \%$. При цьому, пластична деформація сплаву при повторному статичному розтягу зростає на $30 \dots 35 \%$. На рис. 3 подано експериментально отриману криву залежності ϵ_{plast} від ϵ_{imp} для сплаву VT23.

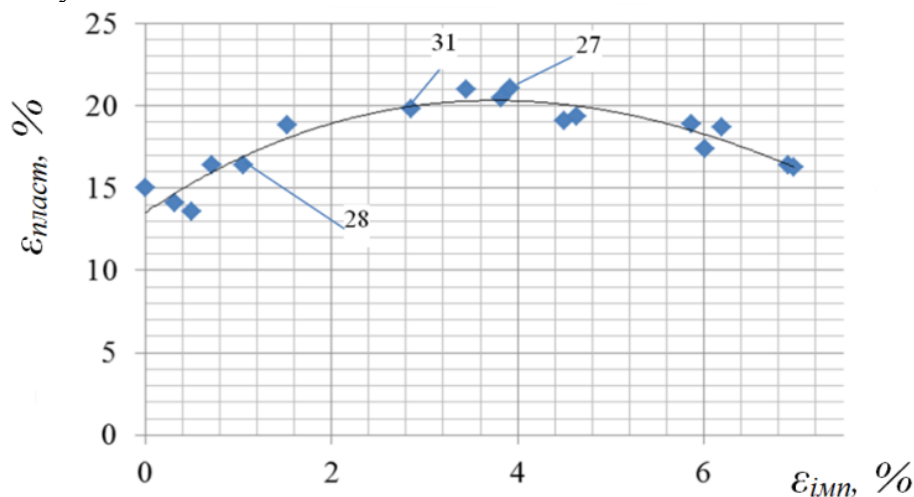


Рис. 3. Крива залежності пластичної деформації зразків із титанового сплаву VT23 при повторному статичному розтягу від проскоків деформації за імпульсного введення енергії

На рис. 4 подано деякі результати подібних експериментальних досліджень, де цифрами позначені номери випробуваних зразків (тут зразок №19 відповідає діаграмі деформування за статичного розтягу, а зразки №27, 28, 31 після реалізації ДНП).

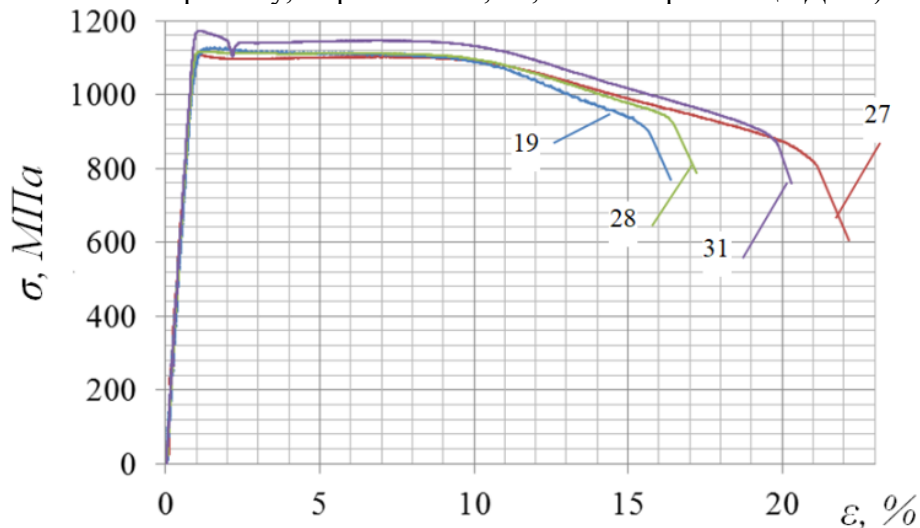


Рис. 4. Діаграми деформацій досліджених зразків із сплаву VT23 (пояснення подано в тексті)

З рис. 4 помітно, що імпульсне введення енергії в сплав VT23 також значно збільшує пластичну деформацію сплаву. Причому, слід підкреслити, що в деяких випадках міцнісні властивості сплаву теж покращуються (див. криву 31 на рис.4).

Висновки

Вперше досліджено вплив ударно-коливального навантаження із частотою навантажування 1...2 кГц на зміну пластичних властивостей високоміцних двофазних титанових сплавів VT22 і VT23.

Обґрунтовано оптимальний режим складного навантаження (попередній статичний розтяг – ударно-коливальне навантаження) для максимального підвищення вихідної пластичності листового двофазного високоміцного титанового сплаву VT22. Показано, що коли за імпульсного введення енергії в сплав сумарні напруження від дії попереднього статичного розтягу і імпульсного введення енергії не перевищують межі текучості сплаву, то пластична деформація сплаву при повторному статичному розтягу збільшується в 2.5 рази.

Виявлено оптимальний режим складного навантаження (попередній статичний розтяг – ударно-коливальне навантаження) для максимального підвищення вихідної пластичності листового двофазного високоміцного титанового сплаву VT23. Показано, що коли за імпульсного введення енергії в сплав проскоки пластичної деформації сягають $\varepsilon_{lim} = 3,0\% \dots 3,5\%$, то пластична деформація сплаву при повторному статичному розтязі зростає на 30,0...35,0 %. На основі отриманих експериментальних результатів можна зробити попередній висновок, що за імпульсного введення енергії можна значно поліпшити пластичні властивості тих титанових сплавах, які мають значну дисперсію розмірів зерен β -фази. Процентний вміст β -фази в сплаві, в дослідженому випадку мав менший вплив.

Література

1. Setup for testing materials with plotting complete stress–strain diagrams / N.G. Chausov, D.G. Voityuk, A.P. Pilipenko, A.M. Kuz'menko // *Strength Mater.* – 2004. – Vol. 36(5). – P. 532-537.
2. Chausov N.G., Pilipenko A.P. Influence of dynamic overloading on fracture kinetics of metals at the final stages of deformation / N.G. Chausov, A.P. Pilipenko // *Mechanika.* – 2004. – Vol. 48. – P. 13-18.
3. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов, Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2009. – Т.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 and V.B. Hutsaylyuk // *J. Strain. Anal.* - 2014. - 50 – P.61-62.
5. Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT 22 under impact-oscillatory loading / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko, and L. Markashova // *Philosophical Magazine.* – 2017. – 97. – P. 389-399.
6. 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, and V. Berezin // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – **22**(11). – P. 3421-3429.
7. Influence of dissipative structures formed by impulse loads on the processes of deformation and fracture / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, et al. // *Key Engineering Materials.* – 2014. – 577-578. – P. 273-276.
8. Effect of high-force impulse loads on the modification of mechanical properties of heat-resistant steel after service / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko et al. // *Estonian J. Eng.* – 2012. – Vol. 18. – P. 251-258.
9. Structural transformations in metallic materials during plastic deformation / E. Zasimchuk, T. Turchak, A. Baskova, et al. // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2017(26). – P. 1293-1299.
10. Influence of impact-oscillatory loading upon the mechanical properties of the vt-22 titanium alloy sheet / M.G. Chausov, A.P. Pylypenko, V.B. Berezin, et al // *J. of Mater. Eng. and Perfom.* – 2016. – Vol. 25. – P. 3482-3492.
11. Structural self-organization of titanium alloys under impulse force action / M.G. Chausov, P.O. Maruschak, A.P. Pylypenko, et al. // *Materials Testing.* – 2017. – Vol. 59. – P. 567-569.