ПОШУК ТОЧОК БІФУРКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ ПРОЦЕСІВ В МАТЕРІАЛАХ ЗА УДАРНО-КОЛИВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

М.Г. Чаусов[1], П.О. Марущак[2]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України
[2]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Abstract. The results of experimental studies to detect bifurcation points of dynamic non-balanced processes in materials of different classes under impact-oscillatory loading are generalized. The points of bifurcation were considered to be deformations obtained from the previous impact-oscillatory loading, under which the mechanical properties of materials were maximally improved upon reloading. It is shown that by controlling the impact-oscillatory loading, one can optimally change the structure of materials, leading to an increased plasticity under subsequent static stretching, and an increased number of cycles under variable loading.

Ключові слова: ударно-коливальне навантаження, динамічний незрівноважений процес, точки біфуркації, механічні властивості.

Вступ. Відомо, що просторові дисипативні структури за динамічних незрівноважених процесів утворюються внаслідок концентрації дефектів в об'ємі матеріалів [1]. За імпульсного деформування різної інтенсивності з початкової структури матеріалів виникають такі форми дисипативних структур, які є ефективними для подальшого пластифікування матеріалів і значного покращеннях їх механічних властивостей. Отже, основними «керуючими» параметрами ДНП для зміни початкових механічних властивостей матеріалів є ступінь попереднього деформування, за статичного розтягу та інтенсивність імпульсного введення силової енергії.

В якості основного параметру для пошуку точок біфуркації динамічних незрівноважених процесів (ДНП) в матеріалах за ударно-коливального навантаження вибрано раптові прирости динамічної деформації за імпульсного введення силової енергії - $\varepsilon_{імп}$. Вибір $\varepsilon_{імп}$ як інформативного «керуючого» параметра пов’язаний з тим, що він однозначно описує перебіг ДНП в матеріалі, а його використання значно спрощує випробування. Такі режими ударно-коливального навантаження можна створювати на гідравлічних випробувальних машинах різної жорсткості, зникає необхідність у складних обчисленнях передачі визначеного силового впливу безпосередньо на зразок залежно від сумарного імпульсу на механічну систему. Одержавши криву залежності певного механічного параметра від $\varepsilon_{імп}$, за повторного навантаження зразків матеріалу можна однозначно виявити точки біфуркації, які максимально поліпшують властивості матеріалів.

Подано експериментальні результати з пошуку точок біфуркації ДНП, у яких за подальшого статичного розтягу високоміцних титанових сплавів зростає пластична деформація до руйнування, а за циклічного навантаження алюмінієвого сплаву - втомна довговічність.

Методики механічних досліджень. Досліджували зразки з листових двофазних високоміцних титанових сплавів ВТ23, ВТ23М та алюмінієвого сплаву 2024-Т3 товщиною 3 мм (рис. 1) за температури 20 ^{o}C.

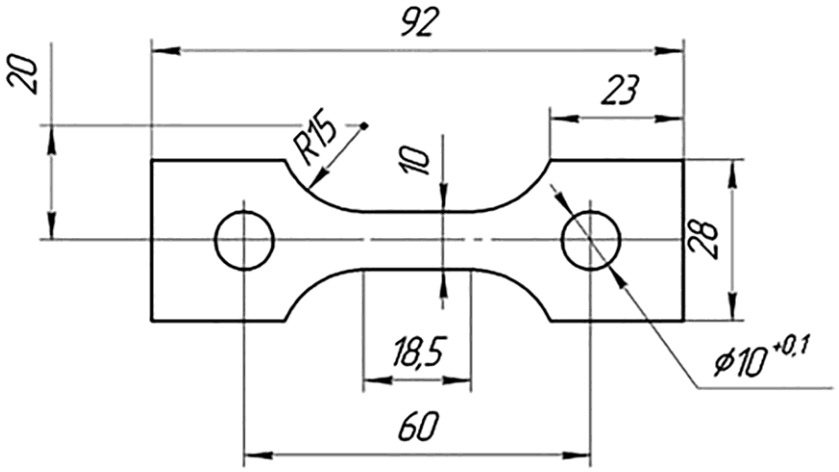
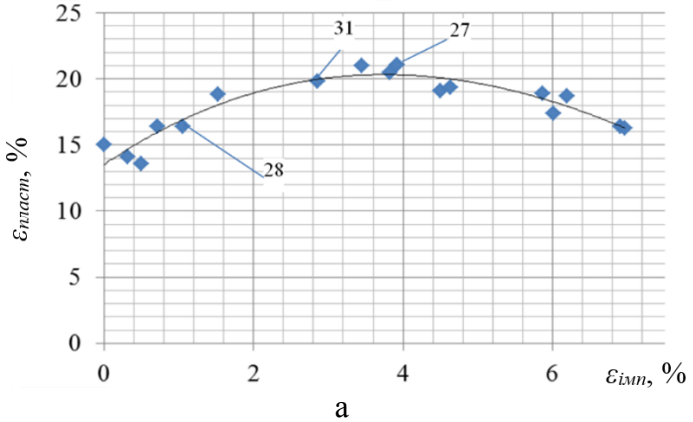


Рис. 1. Зразок для механічних випробувань

Всі дослідження імпульсного деформування сплавів за ударно-коливального навантаження були проведенні на модернізованій випробувальній машині ZD 100Pu. Основні методичні аспекти даної методики описано в працях [2-5]. Величину $\varepsilon_{імп}$ для імпульсного введення енергії контролювали оптичним методом. Деформацію вимірювали за статичному розтягу стандартним екстензометром на базі 16 мм. Втомну довговічність алюмінієвого сплаву Д16 досліджували на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN. Режими випробувань зразків із сплаву 2024-Т3 після імпульсного введення силової енергії з оцінювання їх втомної довговічності були аналогічні випробуванням зразків у вихідному стані: режим навантаження м'який; коефіцієнт асиметрії циклу R = 0,1; орієнтовна частота навантаження 110Гц, максимальні динамічні навантаження F, відповідно, 13,2 кН; 12 кН; 11,1 кН; 10,2 кН.

Результати досліджень та їх обговорення. На зразках з високоміцних титанових сплавів ВТ23 і ВТ23М виявлено точки біфуркації для максимального збільшення пластичності сплавів за повторного статичному розтягом, а на зразках з алюмінієвого сплаву 2024-Т3 –точки біфуркації для максимального зростання довговічності сплаву за подальшого циклічного навантаження.

Досліджено серії зразків зі сплавів ВТ23 ВТ23М і 2024-Т3, які послідовно навантажували статичним розтяганням до початкового навантаження 2 кН і далі, із кроком 2 кН. За цих фіксованих статичних навантажень зразки піддавали попередньо заданому імпульсному підвантаженю $F_{імп.}$ = 45…50 кН. За імпульсного введення енергії в сплави одержалио прирости пластичної деформації $\varepsilon_{імп}$. Після ДНП зразки повністю розвантажували. Далі, зразки із сплавів ВТ23 та ВТ23М статично деформували до руйнування. За параметром $\varepsilon_{імп}$ виявлено точки біфуркації, у яких, за подальшого статичного розтягу, фіксували максимальне збільшення пластичної деформації порівняно з вихідним станом. Для сплаву 2024-Т3 встановлено точки біфуркації, за яких при змінному навантаженні зросла кількість циклів до руйнування. На рис. 2 подано отриману експериментальну залежність $\varepsilon_{пласт.}$ від $\varepsilon_{імп.}$ для сплаву ВТ23.



а

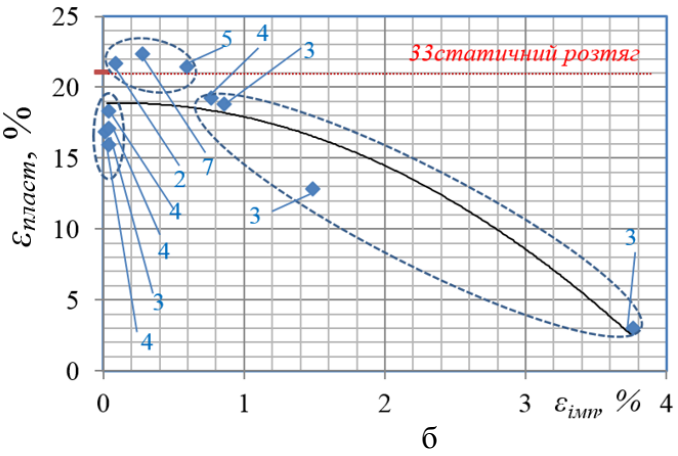


Рис. 3. Залежність пластичної деформації зразків із титанового сплаву ВТ23 (а) ВТ23М (б) за повторного статичного розтягу від приростів деформації за імпульсного деформування

На основі аналізу залежності $\varepsilon_{пласт.}$ від $\varepsilon_{імп.}$ (див. рис. 2а) обґрунтовано точки біфуркації імпульсного деформування за ДНП. Це дозволило максимально підвищити пластичність сплаву ВТ23 за подальшого статичного деформування. Зокрема, за $\varepsilon_{імп}$ = 3,5…4,0 % пластична деформація титанового сплаву ВТ23 зросла на 30,0 – 35,0 % за попереднього ДНП. Отриманні результати з імпульсного деформування сплаву ВТ23М свідчать, що удосконалення технології виготовлення двофазних високоміцних титанових сплавів зменшує можливості пластифікації сплаву за ДНП, що зумовлено накопиченням дислокацій у малокутових межах зерен. Лише у вузькому діапазоні приростів пластичної деформації $\varepsilon_{імп.}$ = 0,2…1,0 % виявлено незначне зростання пластичної деформації (рис. 2б, тут номера відповідають випробуваним зразкам). Проте, це не є свідченням того, що за імпульсного деформування не покращуються інші механічні властивості сплаву ВТ23М. Зокрема, встановлено істотний вплив динамічних незрівноважених процесів на ударну в'язкість і тріщиностійкість сплаву ВТ23М у виявлених точках біфуркації $\varepsilon_{імп.}$ = 0,2…1,0 % [6].

Для алюмінієвого сплаву 2024-Т3 виявлено, що після ДНП зростає циклічна довговічність матеріалу, рис. 3. Сплав піддавали імпульсному деформуванню за $\varepsilon_{імп}$ = 2,36 - 10,0 %. За результатами механічних випробувань виявлено, що після ДНП ($\varepsilon_{імп}$ = 2,36 % - 4,08 %) втомна довговічність сплаву 2024-Т3 зросла, порівняно з вихідним станом.

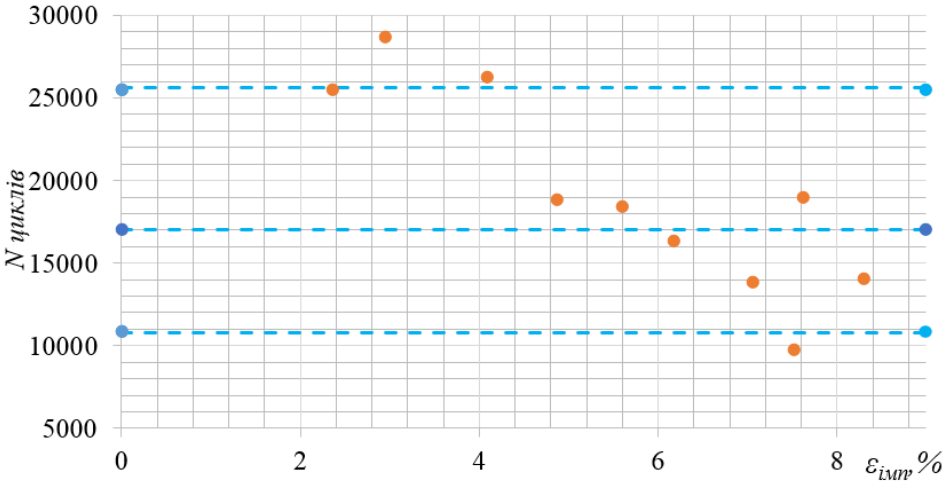


Рис. 3. Кількість циклів до руйнування сплаву 2024-Т351 залежно від значення імпульсного деформування $\varepsilon_{імп}$ (максимальне динамічне навантаження F = 12 кН).

Виявлено основні закономірності зміни втомної довговічності сплаву 2024-Т3 після ДНП за параметром $\varepsilon_{імп}$ при попередньо заданих режимах змінного навантаження. Тут при $\varepsilon_{імп} = 0$ подано результати випробувань на втому трьох зразків сплаву 2024-Т3 у вихідному стані.

За ДНП із максимальним динамічним навантаженням 12,0 кН (деформації $\varepsilon_{імп}$ = 2,36 %...4,08 %), циклічна довговічність сплаву 2024-Т351 зросла, в середньому на 33,6%, рис. 3. Дуже цікавим є питання структурних змін випробуваних сплавів у виявлених точкам біфуркації. Ці дослідження з аналізом тонких структур проводяться і будуть представленні у подальшому.

Висновки. Вперше виявлено та систематизовано точки оптимізації властивостей титанових сплавів ВТ23 та ВТ23М за ударно-коливального навантаження. Запропоновано і експериментально апробовано ефективну методику пошуку точок біфуркації за приростом імпульсної деформації ($\varepsilon_{імп}$) під час ДНП.

Аналіз отриманих результатів механічних випробувань показав, що для сплавів ВТ23 і ВТ23М після ДНП точки біфуркації знаходяться в діапазонах - $\varepsilon_{імп}$ = 3,5 – 4,0 % і - $\varepsilon_{імп}$ = 0,2 - 1,0 % відповідно. Після попереднього ударно-коливального навантаження в цьому діапазоні, за повторного статичного розтягу виявлено максимальне зростання пластичної деформації сплавів ВТ23 і ВТ23М, порівняно з вихідним станом. Так, наприклад, пластична деформація сплаву ВТ23 зросла на 30,0 % - 35,0 %. Наявні точки біфуркації сплаву 2024-Т3 знаходяться в діапазоні $\varepsilon_{імп}$ = 2,36 % - 4,08 %. Після попереднього ударно-коливального навантаження в цьому діапазоні $\varepsilon_{імп}$ виявлено значні позитивні зміни, що полягали у підвищенні його втомної довговічності, зокрема кількість циклів до руйнування сплаву 2024-Т351 зросла на 33,6%.

Одержані результати можуть бути враховані під час технологічних операцій з покращення вихідних механічних властивостей матеріалів попереднім ударно-коливальним деформуванням.

Література

1. Nicolis G. and Prigogine I. Self-Organization in Systems, Wiley, New York, 1977. - 491 p.
2. Особливості деформування і руйнування пластичних матеріалів при ударноколивальному навантаженні / М.Г. Чаусов, П.О. Марущак, А.П. Пилипенко, В.Б. Березін. - Тернопіль: ТзОВ «Терно-граф», 2018. - 288 с.
3. Чаусов М.Г. Методика поліпшення пластичних властивостей листових двофазних високоміцних титанових сплавів за рахунок ударно-коливального навантаження: науковометодичні рекомендації для підприємств України з проектування та виробництва сільськогосподарської техніки / М.Г. Чаусов, А.П. Пилипенко, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2017. - 48 с.
4. 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. – 36(5). – P. 532-537.
5. Chausov M.G., Berezin V.B., Pylypenko A.P., and Hutsaylyuk V.B. Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading // J. Strain Anal. Eng. Des. – 2015. – 50(1). – P. 61-72.
6. Chausov M., Brezinova J., Pylypenko A., Maruschak P., Titova L., Guzanova A. Modification on mechanical properties of high-strength titanium alloys VT23 and VT23M due to impact-oscillatory loading // Metals. – 2019. – 9(1), 80, doi:10.3390/met9010080.