

УДК 539.4

Н.Г. ЧАУСОВ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры механики¹
E-mail: chausov@nubip.edu.ua

П.О. МАРУЩАК, д-р техн. наук, проф.
заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств²
E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com

А.П. ПИЛИПЕНКО, канд. техн. наук, доц.
доцент кафедры механики¹
E-mail: pylypenko@nubip.edu.ua

Л.И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, проф.
ведущий научный сотрудник³
E-mail: vera_59@voliacable.com

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина

²Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, Украина

³Институт электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

Поступила в редакцию 29.06.2017.

ВЛИЯНИЕ УДАРНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\alpha + \beta$ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

На примере испытаний двухфазных листовых высокопрочных титановых сплавов ВТ23 и ВТ23М с различной исходной структурой и фазовым составом установлены основные закономерности изменения механических свойств за счет ударно-колебательного нагружения при комнатной температуре. Показано, что динамические неравновесные процессы (ДНП), которые реализуются в сплавах при данном виде нагружения, могут привести как к существенному улучшению механических свойств при последующем статическом растяжении, так и к их ухудшению. Проанализированы факторы, влияющие на данный процесс.

Ключевые слова: ударно-колебательное нагружение, динамический неравновесный процесс, титановые сплавы, механические свойства

Введение. В работах [1–3] предложены и реализованы основные направления повышения уровня и стабильности механических свойств высокопрочных ($\alpha + \beta$) титановых сплавов за счет комплексного легирования и специальных режимов термической и термо-механической обработки. В результате удается получить двухфазные титановые сплавы с высокими прочностными и пластическими свойствами: σ_b не менее 1100 МПа, δ до 20 %.

С другой стороны, не прекращаются поиски новых технологических методов улучшения механических свойств высокопрочных титановых сплавов. Здесь следует выделить перспективные методы, связанные с влиянием разных энергетических полей — лазерных, электромагнитных, ультразвуковых, силовых и др., на механические свойства, которые реализуют в материалах условия хаотической динамики (динамические неравновесные процессы).

Авторами впервые предложена и апробирована на материалах разных классов простая и эффективная методика реализации ДНП за счет

импульсной силовой подгрузки материала, которая заключается в высокоскоростном растяжении материала с наложением на него колебательного процесса с высокой частотой (1...2 КГц) [4–6]. Данную методику ударно-колебательного нагружения можно реализовать на любой гидравлической испытательной машине.

Экспериментально установлено, что при реализации динамических неравновесных процессов за счет ударно-колебательного нагружения практически все пластичные материалы проявляют склонность к кратковременной пластификации за счет образования объемно-связанной на различных масштабных уровнях диссипативной структуры, плотность которой меньше плотности основного материала [7].

При этом в зависимости от величины силового импульса и степени предварительной статической деформации, при которой материал подвергается воздействию заданного импульса, может возникнуть значительное количество новых упорядоченных структур (состояний мате-

риала), каждая из которых обладает новыми механическими свойствами.

При импульсном вводе силовой энергии в материал можно обеспечить широкий спектр регулирования прочностных и пластических свойств материалов, а также характеристик трещиностойкости: пластифицировать любой материал на стандартной восходящей ветви диаграммы деформаций; добиться изменения протяженности стадий деформирования и изменения механических свойств на заданных стадиях деформирования; реализовать квази-сверхпластичное состояние при комнатной температуре (получить идеально-пластическое поведение материала до десятков процентов остаточной деформации); реализовать резервы механических свойств материалов на стадии разупрочнения, включая и стадию роста макротрещины; повысить усталостную долговечность материалов [8–10]. Очень важно, что все эти эффекты реализуются при комнатной температуре.

Для исследователей большой интерес представляет граничное состояние самоорганизации структуры материалов при динамических неравновесных процессах, при которых механические свойства максимально улучшаются на макроуровне или резко ухудшаются вплоть до полного разрушения материала.

В результате таких исследований выявляются положительные эффекты импульсного ввода энергии в материал, которые можно будет использовать в технологических операциях, например, при ударной штамповке и для продления ресурса ответственных элементов конструкций, а также негативные эффекты, когда за счет ввода критического импульса энергии можно просто разрушить материал или создать в нем повреждения, которые резко ухудшат его механические свойства при дальнейшей эксплуатации.

В частности, исследования, проведенные авторами ранее на высокопрочном двухфазном листовом сплаве ВТ22, показали, что при правильно выбранных режимах предварительного статического растяжения и ударно-колебательного нагружения можно, не уменьшая прочностные характеристики сплава, значительно увеличить его пластическую деформацию с 7...8 % в исходном состоянии до 19 % после реализации ДНП [11, 12]. Для сплава ВТ22 оптимальным выявился такой режим нагружения, при котором суммарное напряжение в образце от действия предварительного статического растяжения и импульсной подгрузки не превышает предела текучести сплава. Физическая интерпретация данного эффекта детально описана в работе [11].

Целью настоящей работы является исследование влияния импульсного ввода энергии за счет ударно-колебательного нагружения на механические свойства высокопрочных листовых матери-

алов ВТ23 и ВТ23М, которые в исходном состоянии обладают более совершенными механическими свойствами по сравнению со сплавом ВТ22.

Методика испытаний. Методика испытаний реализована на базе модифицированной гидравлической установки для статических испытаний ZD-100Pu и детально описана в работах [6–9]. Основная идея предложенной методики заключается в высокоскоростном растяжении материала с наложением на него колебательного процесса с высокой частотой (несколько килогерц), которая соответствует собственной частоте испытательной машины. Конструктивно это достигается тем, что кроме внешнего контура (нагружаемой рамы испытательной машины) в испытательную машину введен внутренний контур. Внутренний контур представляет собой простейшую статически неопределенную конструкцию в виде трех параллельных элементов, которые нагружаются одновременно — центрального образца и двух образцов-спутников (хрупких проб) разного поперечного сечения, изготовленных из закаленных сталей 65Г или У8...У12. При растяжении данной конструкции образцы-спутники разрушаются и осуществляется импульсный ввод энергии в материал исследуемого образца. Образцы-спутники могут включаться в работу на любой стадии предварительного статического растяжения, таким образом можно исследовать влияние импульсного ввода энергии на деградацию механических свойств за счет поврежденности материала в процессе статического растяжения. Изменяя исходный диаметр образцов-спутников, можно регулировать интенсивность импульсного ввода силовой энергии в материал.

Испытания проводили на образцах (рисунок 1) из листовых промышленных титановых сплавов ВТ22 и ВТ23М толщиной 3,0 мм. База измерений деформаций составляла 16,0 мм.

Механические свойства сплавов в исходном состоянии приведены в таблице.

Результаты испытаний. Предварительные эксперименты на образцах из сплавов ВТ23 и ВТ23М показали, что режимы нагружения, при которых суммарное напряжение в образцах от действия предварительного статического растяжения и импульсной подгрузки не превышает предела текучести сплава (оптимальные режимы для сплава ВТ22), не приводят к улучшению механических свойств исследуемых сплавов.

Поэтому методика дальнейших испытаний заключалась в следующем. Серии образцов из сплавов ВТ23 и ВТ23М по 17 штук в каждой последовательно нагружали статическим растяжением до начальной нагрузки 6,0 кН и далее с шагом 2,0 кН, и при этих фиксированных статических нагрузках образцы подвергали заданной силовой импульсной подгрузке $F_{имп.} = 45...50$ кН.

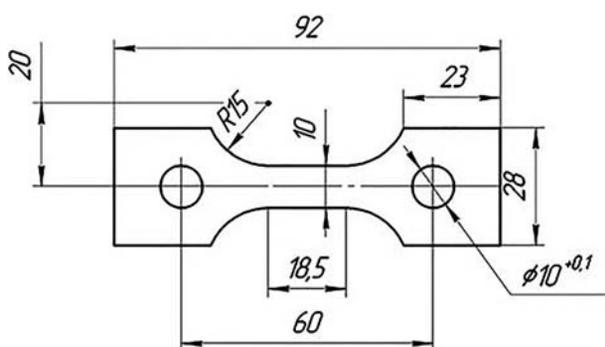


Рисунок 1 — Образец для испытаний

Таблица — Механические свойства титановых сплавов BT23 и BT23M

Марка материала	Механические свойства		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
BT23	1075–1100	1080–1200	15
BT23M	1000–1050	1080–1180	20

В процессе импульсного ввода энергии в сплавы фиксировали проскоки пластичной деформации $\epsilon_{\text{имп}}$, и после реализации ДНП образцы полностью разгружали. Далее повторно статично растягивали все испытанные образцы до разрушения и по параметру $\epsilon_{\text{имп}}$ определяли влияние импульсного ввода энергии на увеличение пластической деформации сплавов по сравнению с исходным состоянием. На рисунке 2 приведена полученная экспериментальная кривая зависимости $\epsilon_{\text{пласт}}$ от $\epsilon_{\text{имп}}$ для сплава BT23, а на рисунке 3 — диаграммы деформаций для некоторых конкретных испытанных образцов (здесь образец № 19 соответствует диаграмме деформаций при статическом растяжении сплава BT23 в исходном состоянии). Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что для сплава BT23 оптимальной величиной является $\epsilon_{\text{имп}} = 3,5...4\%$. Следует также обратить внимание на тот факт, что при импульсном вводе энергии прочностные свойства сплава BT23 практически не уменьшились.

В целом отмечается положительное влияние импульсного ввода энергии на увеличение пластической деформации сплава BT23, однако по сравнению со сплавом BT22 [11] диапазон увеличения пластической деформации сплава BT23 значительно уже.

Интересные результаты получены на сплаве BT23M. Для этого сплава не зафиксировано режимов нагружения, при которых отмечается заметное увеличение пластической деформации после реализации ДНП. Только при $\epsilon_{\text{имп}} = 0,2...1,0\%$ можно выйти на верхнюю границу разброса механических свойств сплава при стандартном статическом растяжении (рисунок 4, здесь кривые 1 и 33 соответствуют статическому растяжению образцов сплава в исходном

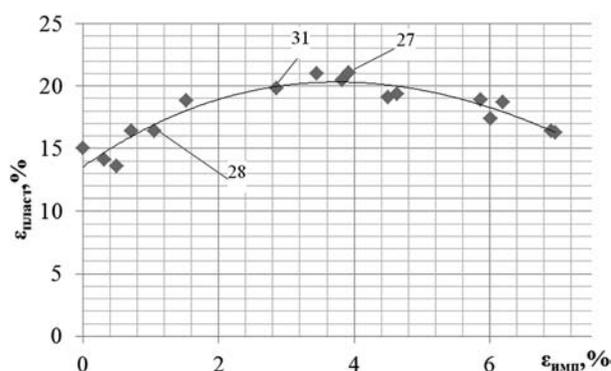


Рисунок 2 — Кривая зависимости пластической деформации образцов из титанового сплава BT23 при повторном статическом растяжении от проскоков деформации в процессе импульсного ввода энергии в сплав

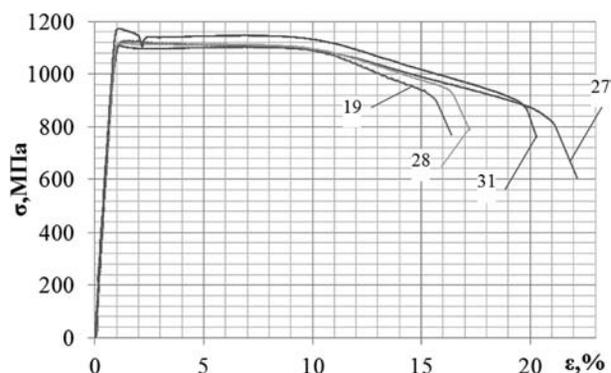


Рисунок 3 — Диаграммы деформаций испытанных образцов из сплава BT23 (пояснения даны в тексте)

состоянии, кривые 2y, 5y, 7y — статическому растяжению образцов после импульсной подгрузки в диапазоне $\epsilon_{\text{имп}} = 0,2...1,0\%$). Причем следует отметить, что кривые 2y, 5y, 7y практически совпадают с кривой 1, которая соответствует верхней границе разброса механических свойств сплава при стандартном статическом растяжении. На рисунке 4 также приведена диаграмма деформаций сплава BT23M непосредственно при импульсной подгрузке. Так как при ударно-колебательном нагружении кроме продольных колебаний возникают и изгибные колебания, то обращаем внимание на относительную симметричность изгиба образца в ту или иную сторону от действия импульсной подгрузки на образце

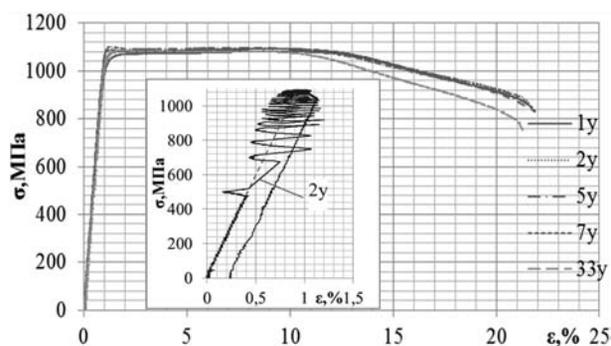


Рисунок 4 — Диаграммы деформаций испытанных образцов из сплава BT23 (пояснения даны в тексте)

в результате практически одновременного разрушения образцов-спутников.

Отсутствие влияния ДНП на заметное увеличение пластической деформации сплава ВТ23 не означает отсутствия влияния ДНП на другие механические характеристики. Установлено существенное влияние ДНП на ударную вязкость сплава. Для сравнительной оценки влияния ДНП на ударную вязкость сплава на образцы после ДНП ($\epsilon_{\text{имп.}} = 0,2...1,0 \%$) и при таких же уровнях пластической деформации при статическом растяжении наносили одинаковые надрезы (рисунок 5) и подвергали испытаниям на ударном копре ПСВ-300.

Соответствующие результаты испытаний приведены на рисунке 6. Сопоставляя результаты испытаний, можно отметить, что ударная вязкость сплава ВТ23 после ДНП увеличилась не менее чем на 20 % (см. рисунок 6).

Специально проведенные эксперименты по влиянию неодновременного разрушения образцов-спутников, т. е. в случае создания асимметричности изгиба образца в ту или иную сторону в процессе импульсного ввода энергии, выявили парадоксальный результат. При повторном статическом растяжении после реализации ДНП пластическая деформация сплава ВТ23М значительно уменьшилась до 8...10 % (рисунок 7), т. е. стала как у сплава ВТ22 в исходном состоянии (7...8 %) (см. кривые диаграмм деформаций образцов № 34, 35 на рисунке 7, здесь кривая 1 соответствует статическому растяжению сплава в исходном состоянии).

Таким образом, тщательно подготовленная в результате сложных предварительных технологических операций структура титановых сплавов может претерпевать существенные изменения при динамических неравновесных процессах. Особенно опасным является асимметричное ударно-колебательное нагружение, после реализации которого при последующем статическом растяжении механические свойства исследуемых сплавов могут существенно ухудшиться.

Аналогичные отрицательные эффекты были зафиксированы при оценке влияния ударно-



Рисунок 5 — Форма надреза образца ВТ23М для испытаний на ударную вязкость

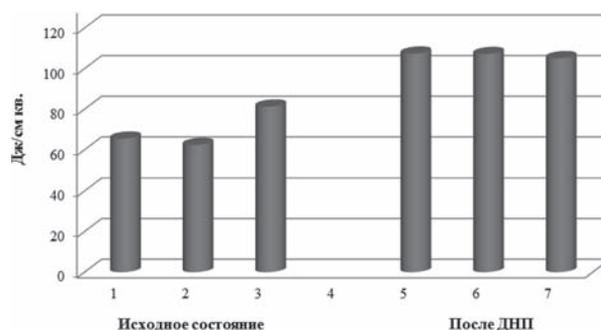


Рисунок 6 — Ударная вязкость сплава ВТ23 в исходном состоянии и после ДНП

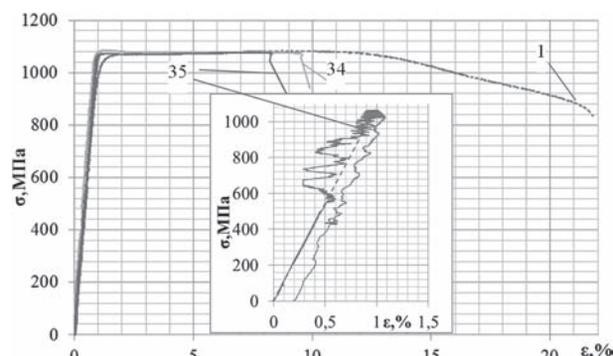


Рисунок 7 — Диаграммы деформаций испытанных образцов из сплава ВТ23 (пояснения даны в тексте)

колебательного нагружения на механические свойства субмикроструктурного титанового сплава ВТ1-0 [13]. На основе полученных результатов был сделан вывод о высокой чувствительности размера и формы исходной структуры высокопрочных титановых сплавов к ДНП. Так, для крупно-зернистых титановых сплавов ударно-колебательное нагружение можно использовать как простой технологический метод улучшения исходных механических свойств. Наоборот, для титановых сплавов с улучшенной структурой, а также с исходной субмикронаноструктурой данный режим нагружения может оказаться очень опасным в процессе эксплуатации. Установление критических размеров исходной структуры двухфазных высокопрочных титановых сплавов, при которых при импульсном вводе энергии механические свойства существенно ухудшаются, требует детальных физических исследований.

Выводы. 1. Установлено, что ударно-колебательное нагружение можно использовать в качестве простого технологического метода улучшения механических свойств двухфазных высокопрочных титановых сплавов на готовом прокате при комнатной температуре. В частности, при импульсном вводе энергии можно увеличить пластическую деформацию сплава ВТ23 на 25...30 % и не менее чем на 20 % — ударную вязкость сплава ВТ23М.

2. Показано, что для двухфазных высокопрочных титановых сплавов с улучшенной струк-

турой ассиметричное ударно-колебательное нагружение является наиболее опасным в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Хорев, А.И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha+\beta$)-титановых и β -титановых сплавов / А.И. Хорев // Технология машиностроения. — 2007. — № 2 (56). — С. 29–34.
2. Khorev, A.I. Alloying and heat treatment of structural ($\alpha+\beta$) titanium alloys of high and superhigh strength / A.I. Khorev // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, Is. 7. — Pp. 682–688.
3. Nochovnaya, N.A. Perspectives of alloying titanium alloys with rare earth elements / N.A. Nochovnaya, A.I. Khorev, A.L. Yakovlev // Metal Science and Heat Treatment. — 2013. — Vol. 55, Is. 7–8. — Pp. 415–418.
4. Setup for testing materials with plotting complete stress-strain diagrams / N.G. Chausov [et al.] // Strength Mater. — 2004. — Vol. 36 (5). — Pp. 532–537.
5. Chausov, N.G. 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. — Pp 13–18.
6. Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading / M.G. Chausov [et al.] // J. Strain Anal. Eng. Des. — 2015. — Vol. 50 (1). — Pp. 61–72.
7. Методы исследования свойств диссипативных структур, образующихся при импульсном вводе энергии в материал / Н. Чаусов [и др.] // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — 2011. — Спец. випуск. Ч. 2. — С. 92–97.
8. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2009. — Т. 6 (75). — С. 52–59.
9. Effect of high-force impulse loads on the modification of mechanical properties of heat-resistant steel after service / M. Chausov [et al.] // Estonian J. Eng. — 2012. — Vol. 18. — Pp. 251–258.
10. Structural transformations in metallic materials during plastic deformation / E. Zasimchuk [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2017. — No. 3. — Pp. 1293–1299.
11. Influence of impact-oscillatory loading upon the mechanical properties of the VT-22 titanium alloy sheet / M.G. Chausov [et al.] // J. of Mater. Eng. And Perfom. — 2016. — Vol. 25, No. 8. — Pp. 3482–3492.
12. Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT 22 under impact-oscillatory loading / M. Chausov [et al.] // Philosophical Magazine. — 2017. — Vol. 97, Is. 6. — Pp. 389–399.
13. Structural self-organization of titanium alloys under impulse force action / M.G. Chausov [et al.] // Materials Testing. — 2017. — Vol. 59, No. 6. — Pp. 567–569.

CHAUSOV N.G., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Mechanics¹

E-mail: chausov@nubip.edu.ua

MARUSCHAK P.O., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Industrial Automation Department²

E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com

PYLYPENKO A.P., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Mechanics¹

E-mail: pylypenko@nubip.edu.ua

MARKASHOVA L.I., D. Sc. in Eng., Prof.

Leading Researcher³

E-mail: vera_59@voliacable.com

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

³E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received 29 June 2017.

EFFECT OF DYNAMIC NON-EQUILIBRIUM PROCESSES ON MECHANICAL PROPERTIES OF $\alpha + \beta$ TITANIUM ALLOYS

Using the example of tests of two-phase sheet high-strength titanium alloys VT23 and VT23M with different initial structure and phase composition, the main regularities in the change of mechanical properties due to additional force impulse loading at room temperature are established. It is shown that dynamic non-equilibrium processes (DNP), which are realized in alloys under a given loading type, can lead both to a significant improvement of mechanical properties during subsequent static stretching, and to their deterioration. The factors influencing this process are analyzed.

Keywords: additional force impulse loading, dynamic non-equilibrium processes, titanium alloys, mechanical properties

References

1. Khorev A.I. Vliyanie kompleksnogo legirovaniya na mekhanicheskie svoystva svarnyh soedinenij i osnovnogo metalla ($\alpha + \beta$)-titanovyh i β -titanovyh splavov [Influence of complex alloying on the mechanical properties of weld seams and the basic metal in ($\alpha + \beta$) titanium and β titanium alloys]. *Tehnologija mashinostroenija* [Technology of Mechanical Engineering], 2007, no. 2, pp. 29–34.
2. Khorev A.I. Alloying and heat treatment of structural ($\alpha + \beta$) titanium alloys of high and superhigh strength. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 7, pp. 682–688.
3. Nochovnaya N.A., Khorev A.I., Yakovlev A.L. Perspectives of alloying titanium alloys with rare earth elements. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 55, no. 7–8, pp. 415–418.
4. Chausov N.G., Voityuk D.G., Pilipenko A.P., Kuz'menko A.M. Setup for testing materials with plotting complete stress-strain diagrams. *Strength Mater.*, 2004, vol. 36(5), pp. 532–537.
5. Chausov N.G., Pilipenko A.P. Influence of dynamic overloading on fracture kinetics of metals at the final stages of deformation. *Mechanika*, 2004, vol. 48, pp. 13–18.
6. Chausov M.G., Berezin V.B., Pylypenko A.P., 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, vol. 50(1), pp. 61–72.
7. Chausov N., Zasyrchuk E., Hutsaylyuk V., Volianska E. Metody issledovaniya svoystv dissipativnyh struktur, obrazujushhhsja pri impulsnom vvode jenerгии v material [Methods for investigating the properties of dissipative structures produced by pulsed energy input into a material]. *Visnik Ternopil'skogo nacionalnogo tehničnogo univesitetetu* [Bulletin of Ternopil National Technical University], 2011, no. 2, pp. 92–97.
8. Chausov N.G., Zasyrchuk E.E., Markashov L.I., Vildeman V.E., Turchak T.V., Pylypenko A.P., Parada V.N. Osobnosti deformirovaniya plastichnyh materialov pri dinamicheskikh neravnovesnyh processah [Features deformation plastic materials at the dynamic non-equilibrium processes]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnosis of materials], 2009, vol. 75, pp. 52–59.
9. Chausov M., Maruschak P., Pylypenko A., Sergejev F. and Student O. Effect of high-force impulse loads on the modification of mechanical properties of heat-resistant steel after service. *Estonian J. Eng.* 2012, vol. 18, pp. 251–258.
10. Zasyrchuk E., Turchak T., Baskova A., Chausov N., Hutsaylyuk V. Structural transformations in metallic materials during plastic deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, no. 3, pp. 1293–1299.
11. Chausov M.G., Pylypenko A.P., Berezin V.B., Markashova L.I., Kushnariova O.S., Hutsaylyuk V.B. Influence of impact-oscillatory loading upon the mechanical properties of the VT-22 titanium alloy sheet. *J. of Mater. Eng. and Perform.* 2016, vol. 25, no 8, pp. 3482–3492.
12. Chausov M., Maruschak P., Pylypenko A. & Markashova L. Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT 22 under impact-oscillatory loading. *Philosophical Magazine*, 2017, vol. 97, no. 6, pp. 389–399.
13. Chausov M.G., Maruschak P.O., Pylypenko A.P., Berezin V.B., Prentkovskis O. Structural self-organization of titanium alloys under impulse force action. *Materials Testing*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 567–569.