

УДК539.3:4

**Н.Г. Чаусов, А.П. Пилипенко, В.Б. Березин,
Е.М. Волянская, В.А. Клочков**

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВВОДА ЭНЕРГИИ И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЛАСТИФИКАЦИЮ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

Ранее авторами показано, что при динамических неравновесных процессах, которые реализуются за счет импульсных подгрузок, в материалах образуется тонко-полосовая, менее плотная диссипативная структура, связанная в объеме материала на различных масштабных уровнях. Причем при импульсном вводе энергии в материал разных классов (реакторные стали, теплостойкая сталь, углеродистые стали низкой и средней прочности, титановый сплав, мартенситно-старяющаяся сталь, армо – железо, монокристалльный сплав, техническая медь, алюминиевые сплавы, наноструктурный высокопрочный титан) можно обеспечить широкий спектр регулирования прочностных и пластических свойств материалов, а именно: пластифицировать материал на стандартной восходящей ветви диаграммы деформаций; добиться изменения протяженности стадий деформирования и изменения прочностных свойств на заданных стадиях деформирования; реализовать квазисверхпластическое состояние при комнатной температуре (получить идеально пластическое поведение материала до десятков процентов остаточной деформации) за счет многократных импульсных подгрузок; реализовать резервы механических свойств материалов на стадии разупрочнения, включая и стадию роста макротрещины.

В настоящей работе выявлен эффект влияния высокой температуры (773 К) на более существенную пластификацию алюминиевого сплава Д16 с вновь образованной при динамических неравновесных процессах диссипативной структурой по сравнению со структурой сплава, деформированной при статическом растяжении.

Ключевые слова: динамический неравновесный процесс, алюминиевый сплав, сверхпластичность, высокая температура, увеличение пластичности.

**N.G. Chausov, A.P. Pylypenko, V.B. Berezin,
E.M. Volyanska, V.A. Klochkov**

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

THE INFLUENCE OF PULSING ENERGY INPUT AND HIGH TEMPERATURE ON PLASTICIZATION OF ALUMINIUM ALLOY D16

Earlier by authors at dynamic nonequilibrium processes which are realised at the expense of pulsing load, in materials it is formed it is thin – the band, less dense dissipative the structure connected in volume of a material at various scale levels it is shown. And at pulsing input of energy in

a material of different class-rooms (reactor steels, heatproof steel, carbonaceous steels of low and average strength, titanic alloy, maraging steel, armco iron, monocrystal alloy, technical copper, aluminium alloys, nanostructured high-strength titanium) it is possible to provide a wide spectrum of regulating strength and plastic properties of materials, namely: plasticize a material on standard ascending branch of the deformations diagramme; to achieve change of extent of stages of a straining and change strength properties at the set stages of deformation; to realise quasi – superplastic state at room temperature (to gain ideally – plastic behaviour of a material to tens percent of a residual deformation) at the expense of repeated pulsing loads; to realise reserves of mechanical properties of materials at a softening stage, include and a stage of growth of a macrocrack.

In the present work the effect of agency of high temperature (773 K) on more essential plasticization of aluminium alloy D16 with again formed is revealed at dynamic nonequilibrium processes dissipative structure in comparison with the structure of an alloy strained at static extension.

Keywords: dynamic nonequilibrium process, an aluminium alloy, superplasticity, high temperature, plasticity increase.

Введение

В настоящее время уже надежно установлено, что эффект структурной сверхпластичности материалов (СПМ), то есть аномально высокой пластичности при определенных температурно-скоростных условиях нагружения, проявляет очень широкий класс материалов [1, 2].

Целью многих исследований было установление условий проявления эффекта структурной сверхпластичности материалов и выявление влияния исходного структурного состояния материалов и воздействия внешних факторов на особенности процесса деформации и разрушения сверхпластичных материалов [3, 4].

Один из интересных выводов, сделанных на основании проведенных экспериментальных исследований, заключается в том, что, например, при высокоскоростной сверхпластичности (скорость деформации до 10^2 с^{-1}) обнаружено наличие жидкой фазы на границах зерен, что способствует аккомодации зернограницного скольжения [5]. Таким образом, в условиях высокоскоростной сверхпластичности материалов некоторые зерна изменяют свою форму не только за счет проскальзывания и развития диффузионной ползучести, а также и за счет вязкого течения тонких прослоек оплавленного материала, который является своеобразной вязкой «мантейей» у этих зерен. Так как уже предсказана возможность высокоскоростной сверхпластичности материалов при скоростях деформации $10^4 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$, то очевидно, что в случае высокоскоростной сверхпластичности существует еще ряд дополнительных факторов, повышающих вероятность присутствия жидкой фазы на границах зерен. Также установлено, что для алюминиевых сплавов средней прочности условия проявления эффекта сверхпластичной деформации оптимальны при температуре $T = 773 \text{ K}$ [6].

В наших предыдущих исследованиях, вероятно, впервые было экспериментально установлено, что эффект, подобный структурной сверхпластичности, в виде проявления площадок текучести различной протяженности, можно реализовать в листовых алюминиевых сплавах при комнатной температуре за счет одноразового введения в материал силовых импульсов энергии [7]. Данный эффект авторы объясняют образованием при динамических неравновесных процессах тонкополосовой, менее плотной диссипативной структуры, связанной в объеме материала на различных масштабных уровнях [8, 9]. В данном случае вновь образованная диссипативная структура выполняет роль своеобразной внутрискруктурной смазки, но так как она охватывает блоки материалов, размеры которых на порядки больше размеров зерен, то и протяженность проявляющихся площадок текучести значительно меньше общей деформации материалов при обычной микроструктурной сверхпластичности.

Целью настоящей работы является исследование влияния высокой температуры (773 К) на механические свойства цилиндрических образцов из алюминиевого сплава Д16, претерпевших при различных уровнях предварительной статической деформации воздействие одноразовых силовых импульсных подгрузок различной интенсивности при комнатной температуре.

1. Методика эксперимента

Для реализации динамических неравновесных процессов на кафедре механики и сопротивления материалов Национального университета биоресурсов и природопользования Украины разработан новый вид механических испытаний [10–11].

Процессы деформирования и разрушения материалов при импульсных подгрузках по данной методике исследуются в составе механической системы, которая представляет собой простейшую статически неопределенную конструкцию, в виде одновременно нагружаемых трех параллельных элементов – центрального образца и двух симметричных образцов-спутников из закаленной стали 65 Г или У8А. При нагружении данной конструкции образцы-спутники разрушаются (при заданной нагрузке на образце или заданной деформации) и осуществляется импульсный ввод энергии в материал исследуемого образца.

В качестве материала для исследований выбран прутковый алюминиевый сплав Д16, из которого изготавливали цилиндрические образцы диаметром 8 мм.

Методика исследований заключалась в следующем. Сначала на испытательной установке ZDM-100 (рис. 1), снабженной специальным приспособлением для осуществления импульсных подгрузок и оборудованной высокоточной измерительной системой с частотой регистрации до 2400 изм/с, образцы последовательно статически растягивали до заданных степеней деформаций, а затем подвергали воздействию силовых импульсных подгрузок различной интенсивности.

Сразу же после реализации динамических неравновесных процессов в материале, которые связаны с резкой пластификацией сплава, образцы полностью разгружали и помещали в высокотемпературную печь установки «RelVi – 5» (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид установки для реализации динамических неравновесных процессов



Рис. 2. Высокотемпературная печь установки «RelVi – 5»

Контроль температурных условий осуществлялся при помощи хромель-алюмелевой термопары, жестко закрепленной в средней части образца. Данные измерений температуры регистрировались при помощи 2-канального микропроцессорного модуля регистрации напряжений «Triton 2402U». При достижении температуры на образце 773 К образцы статически растягивали до разрушения.

Учитывая поисковый характер работы, были выбраны только четыре уровня предварительной статической деформации – два на упругом участке диаграммы деформаций и, соответственно, два при различном уровне пластической деформации – 1 и 2 %. Диапазон импульсных подгрузок материала в настоящей работе задавался в пределах 111–136 кН.

Для оценки изменения пластических свойств сплава после импульсных подгрузок проводились испытания аналогичных образцов в следующем режиме: статическое растяжение при комнатной температуре до уровней деформаций, соответствующих уровням деформаций при сложных режимах нагружения «статическое растяжение – динамический неравновесный процесс», и последующее статическое растяжение образцов при той же самой повышенной температуре 773К до разрушения.

2. Результаты экспериментов

На рис. 3 представлены некоторые результаты экспериментов по влиянию импульсных подгрузок на процессы деформирования алюминиевого сплава Д16.

Эти данные еще раз подтверждают ранее установленный факт [10], что основными факторами, которые непосредственно влияют на изменение механических свойств материалов в процессе реализации динамических неравновесных процессов за счет импульсных погрузок и при последующем статическом растяжении являются: уровень начальной статической деформации, при которой осуществляются импульсные подгрузки, и сама интенсивность импульсных подгрузок. Кроме того, очевидно, что разработанная методика позволяет воспроизводить результаты экспериментов при соблюдении вышеуказанных факторов, что является чрезвычайно важным для построения физически адекватной модели деформирования и разрушения материалов при динамических неравновесных процессах.

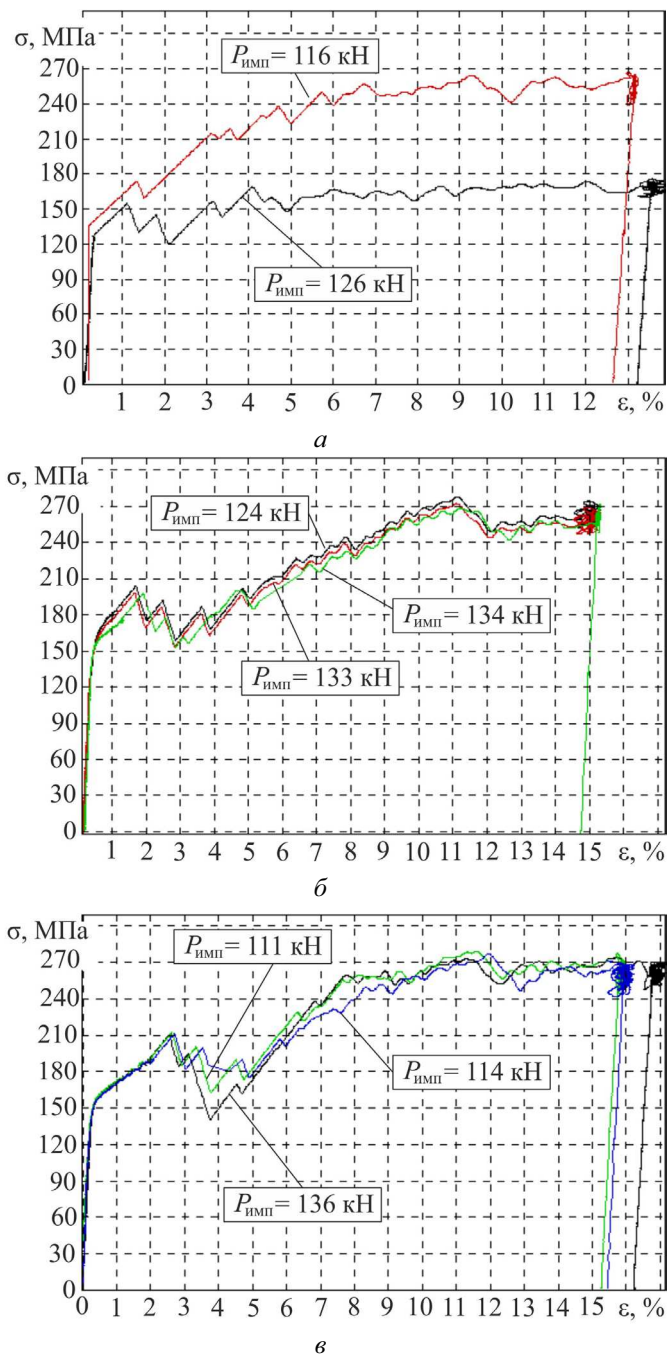


Рис. 3. Кривые деформаций при сложном режиме нагружения «статическое растяжение – динамический неравновесный процесс»: а – импульсные подгрузки осуществлялись на упругом участке диаграммы деформаций; б, в – соответственно, при уровне пластической деформации 1 и 2 %

На рис. 4 представлены некоторые результаты экспериментов по сопоставлению кривых деформаций при одинаковых уровнях деформаций при различных режимах нагружения, соответственно, «статическое растяжение» и «статическое растяжение – динамический неравновесный процесс».

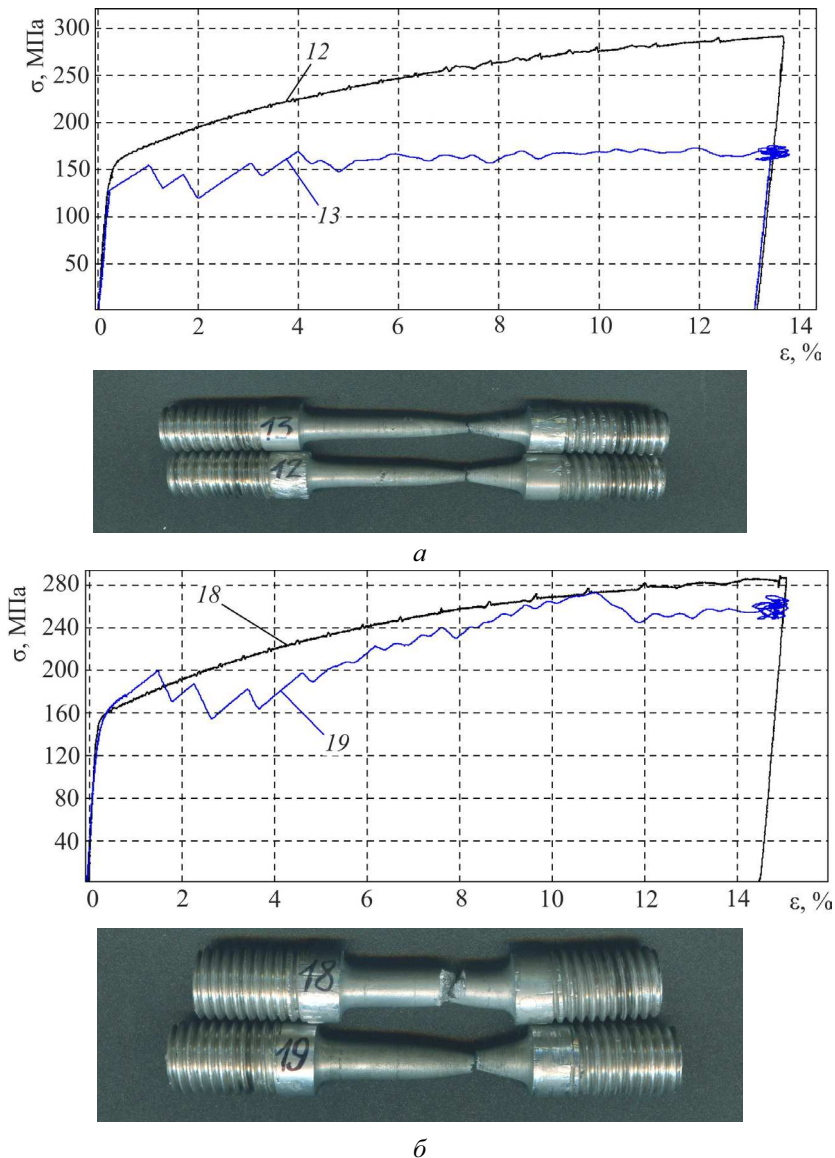
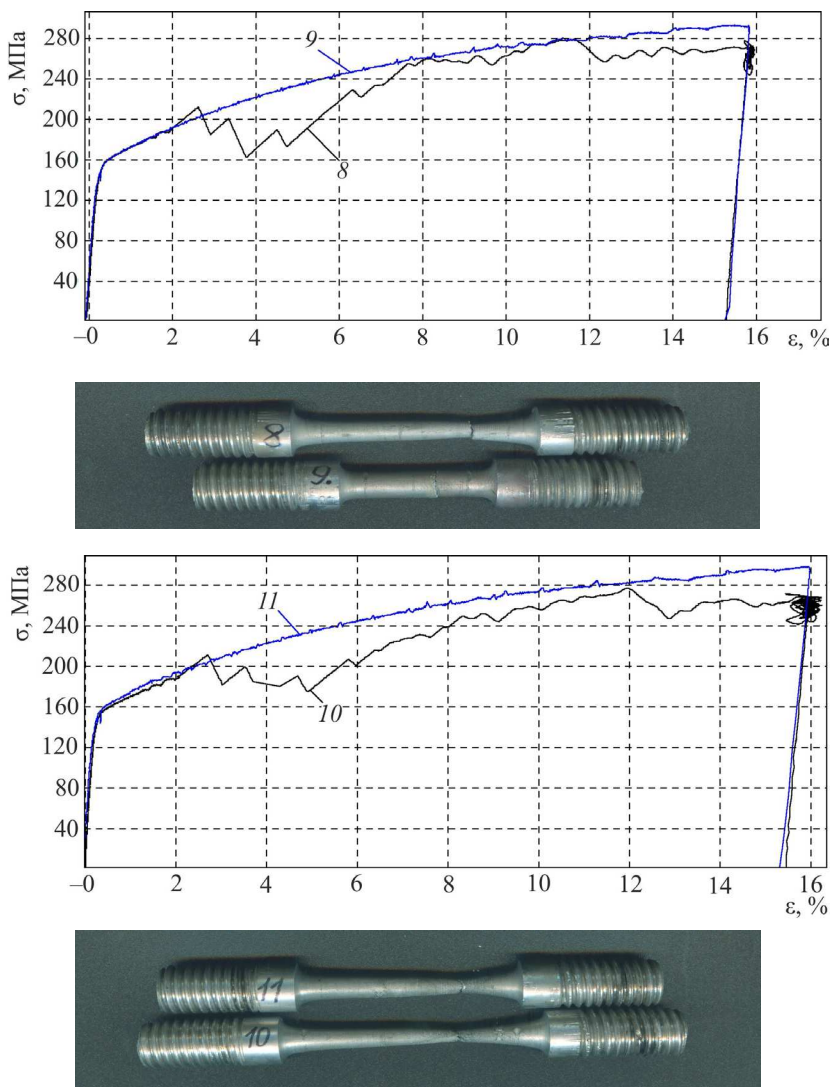


Рис. 4.



б

Рис. 4. Кривые деформаций при различных режимах нагружения: а – импульсные подгрузки осуществлялись на упругом участке диаграммы деформаций; б, в – соответственно при уровне пластической деформации 1 и 2 %

Здесь же сопоставлены фотографии разрушенных образцов, которые на втором этапе исследований деформировали статическим растяжением при практически одинаковой температуре 773 К. Об этом свидетельствуют типичные кривые роста температуры на образцах, предварительно деформированных при различных режимах нагружения, представленные на рис. 5.

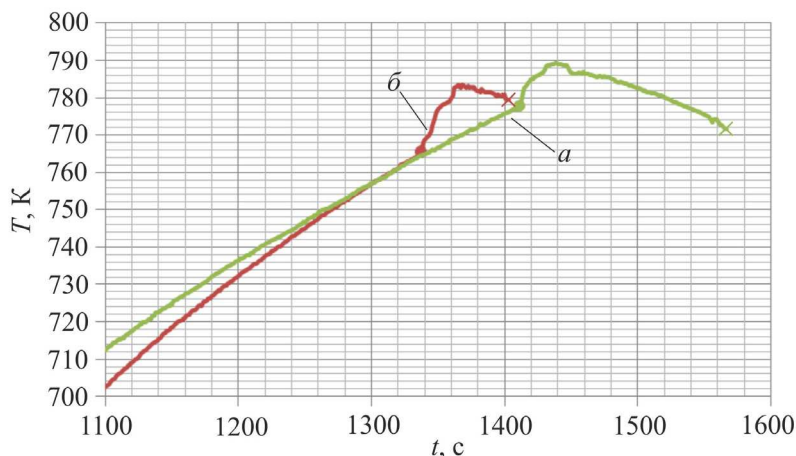


Рис. 5. Кривые роста температуры на образцах, предварительно деформированных при различных режимах нагружения: *a* – «статическое растяжение»; *б* – сложный режим нагружения «статическое растяжение – динамический неравновесный процесс»

Здесь кружочками показаны моменты достижения заданной температуры на образцах, при которой начиналось повторное статическое растяжение образцов до разрушения, а крестиками – температура на образцах в момент их разрушения. Отметим незначительное изменение температуры на образцах в процессе деформирования (повышение температуры приблизительно на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), что свидетельствует об удовлетворительной идентичности условий испытаний по температуре.

Анализ проведенных исследований показал, что во всех случаях диссипативная структура, образующаяся в алюминиевом сплаве Д16 при динамических неравновесных процессах, проявляет большую склонность к пластификации при повышенной температуре по сравнению с структурой сплава, деформированной при статическом растяжении (см. рис. 4). Здесь немаловажную роль играет степень предварительной статической деформации, при которой производятся импульсные подгрузки и, соответственно, интенсивность силового импульса, так как эти два фактора непосредственно влияют на объем и однородность распределения вновь образованной диссипативной структуры в материале. Максимальный эффект по увеличению общей пластичности сплава на величину 35% при двух сравниваемых режимах нагружения зафиксирован при уровне пластической деформации 2% и силовом импульсе 114 кН . Интересно отметить, что именно в этом диапазоне предварительной статической деформации, $1,3\text{--}4\%$, при дополнитель-

ном нагружении листовых алюминиевых сплавов Д16 и 2024 – Т3 одноразовыми импульсными подгрузками выявлены эффекты проявления площадок текучести различной протяженности [6]. Вероятно, именно в этом диапазоне предварительной статической пластической деформации в сплаве накапливаются оптимальные по форме и количеству повреждения, которые при последующем импульсном вводе энергии в материал способствуют формированию относительно однородной, менее плотной диссипативной структуры в объеме материала. Таким образом, подтверждается высказанное ранее предположение, что образующаяся при динамических неравновесных процессах тонко-полосовая (аморфно-подобная) структура, связанная в объеме материала на различных масштабных уровнях, может выполнять роль своеобразной внутрискруктурной смазки, способствующей пластификации сплава, что помимо комнатной температуры проявляется и при повышенных температурах [6].

Выводы:

1. Впервые экспериментально установлен эффект влияния высокой температуры на существенное увеличение пластичности алюминиевого сплава Д16 с вновь образованной при динамических неравновесных процессах диссипативной структурой по сравнению со структурой сплава, деформированной при статическом растяжении.

2. Выявлено, что основными факторами, способствующими повышению пластичности сплава при двух сравниваемых режимах нагружения, являются степень предварительной деформации, при которой осуществляются импульсные подгрузки, и сама интенсивность импульсных подгрузок.

Библиографический список

1. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М. Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии / предисл. Г.Г. Малинецкого. – Изд. 2-е. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 320 с.

2. Neih N.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in metals and ceramics. – Cambridge University Press, 2005. – 274 p.

3. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 284 с.

4. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности. – Уфа: Гилем, 1998 – 279 с.

5. Smirnov O.M. Superplasticity of metals // Phenomenology Based on Reological Properties and Structural Dynamics: materials Science Forum. – 1997. – Vol. 2. – P. 443–452.

6. Пойда В.П. Вплив структурного стану і зовнішніх факторів на структурну надпластичність і руйнування алюмінієвих сплавів, що деформуються: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харків, 2003. – 33 с.

7. Чаусов М.Г., Засимчук О.Е., Волянська К.М. Дослідження процесу прояви площадок текучості при імпульсних підвантаженнях алюмінієвих сплавів // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2011. – № 63. – С. 244–248.

8. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов, Е.И. Засимчук, Л.И. Маркашова [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 6. – С. 52–59.

9. Самоорганизация структур листовых материалов при динамических неравновесных процессах // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, № 3. – С. 892–894.

10. Установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н.Г. Чаусов, Д.Г. Войтюк, А.П. Пилипенко, А.М. Кузьменко // Проблемы прочности. – 2004. – № 5. – С. 117–123.

11. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова, Н.Г. Чаусов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 2. – С.77–82.

References

1. Chumachenko E.N., Smirnov O.M., Cepin M.A. Sverhplastichnost': materialy, teorija, tehnologii [Superplasticity: materials, theory, technology]. Moscow: LIBROKOM, 2009, 320 p.

2. Neih N.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in metals and ceramics. Cambridge University Press, 2005. 274 p.

3. Kajbyshev O.A. Sverhplastichnost' promyshlennyh splavov [Superplasticity of industrial alloys]. Moscow: Metallurgija. 1984, 284 p.

4. Vasin R.A., Enikeev F.U. Vvedenie v mehaniku sverhplastichnosti [The introduction into superplasticity mechanics]. Ufa: Gilem. 1998, 279 p.

5. Smirnov O.M. Superplasticity of metals. *Phenomenology Based on Rheological Properties and Structural Dynamics. Materials Science Forum*, 1997, vol. 2, pp. 443–452.

6. Pojda V.P. Vpliv strukturnogo stanu i zovnishnih faktoriv na strukturnu nadplastichnist' i rujnuvannja aljuminievih splaviv, wo deformujut'sja. Avtoreferat disertacii na zdbuttja naukovogo stupenja doktora tehnicnih nauk [The influence of structural state and external factors on structural superplasticity and fracture of deformable aluminum alloys. Thesis of doctor's degree dissertation]. Kharkov, 2003, 33 p.

7. Chausov M.G., Zasimchuk O.E., Voljans'ka K.M. Doslidzhennja procesu projavi plowadok tekuchosti pri impul'snih pidvantazhennjah aljuminievih splaviv [The research of process of occurrence of the yield plateau during impulse loading of aluminum alloys]. *Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu Ukraïni «Kïvs'kij politehnicnij institut»*, 2011, no. 63, pp. 244–248.

8. Chausov N.G., Zasimchuk Y.E., Markashova L.E., Vildenman V.E., Turchak V.E., Pylypenko A.P. Osobennosti deformirovaniya plastichnyh materialov pri dinamicheskikh neravnovesnyh processah [Specialty deformation of plastic materials under dynamic non-equilibrium processes]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 2009, no. 75, pp. 52–59.

9. Chausov N.G., Zasimchuk E.E., Pylypenko A.P., Volyanskaya E.M. Samoorganizacija struktur listovyh materialov pri dinamicheskikh neravnovesnyh processah [Self-organization of structures of sheet alloys during dynamical non-equilibrium processes]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija. Estestvennye i tehnicneskie nauki*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 892–894.

10. Chausov N.G., Voityuk D.G., Pilipenko A.P., Kuz'menko A.M. Ustanovka dlya ispytaniy materialov s postroeniem polnikh diagramm deformirovaniya [Setup for Testing Materials with Plotting Complete Stress-Strain Diagrams]. *Strength of Materials*, 2004, no. 36, pp. 117–123.

11. Zasimchuk E.E., Turchak T.V., Markashova L.I., Chausov N.G., Pylypenko A.P., Paratsa V.N. Osobennosti transformatsii struktury plastichnykh materialov v protsesse rezkikh smen v rezhime nagruzheniya [Peculiarities of structural transformation in plastic materials under abrupt changes in loading conditions]. *Physical Mesomechanics*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 77–82.

Об авторах

Чаусов Николай Георгиевич (Киев, Украина) – доктор технических наук, заведующий кафедрой механики и сопротивления материалов, профессор Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (Украина, 03041, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15, e-mail: mich@nubip.edu.ua).

Пилипенко Андрей Петрович (Киев, Украина) – доцент кафедры механики и сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (Украина, 03041, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15, e-mail: strem_chair@twin.nauu.kiev.ua).

Березин Валентин Борисович (Киев, Украина) – аспирант кафедры механики и сопротивления материалов Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (Украина, 03041, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15, e-mail: valikb@yandex.ru).

Волянская Екатерина Михайловна (Киев, Украина) – аспирантка кафедры механики и сопротивления материалов Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15, e-mail: vo-kate@yandex.ru).

Клочков Вячеслав Александрович (Киев, Украина) – магистрант кафедры механики и сопротивления материалов Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (Украина, 03041, г. Киев ул. Героев Оборона, 15).

About the authors

Chausov Nickolay Geogievich (Kyiv, Ukraine) – Head of the Mechanics and Strength of Material Department, Doctor in Technical Sci., Professor of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine, 03041, Kyiv, Geroev Oborony Str., 15, e-mail: mich@nubip.edu.ua).

Pylypenko Andrey Petrovich (Kyiv, Ukraine) – Mechanics and Strength of Material Department, PhD in Technical Sci., Associate Professor of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine, 03041, Kyiv, Geroev Oborony Str., 15, e-mail: strem_chair@twin.nauu.kiev.ua).

Berezin Valentin Borisovich (Kyiv, Ukraine) – Mechanics and Strength of Material Department, Graduate Student of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine, 03041, Kyiv, Geroev Oborony Str., 15, e-mail: valikb@yandex.ru).

Volyanskaya Ekaterina Mikhaylovna (Kyiv, Ukraine) – Mechanics and Strength of Material Department, Graduate Student of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine, 03041, Kyiv, Geroev Oborony Str., 15, e-mail: vo-kate@yandex.ru).

Klochkov Vyacheslav Alexandrovich (Kyiv, Ukraine) – Mechanics and Strength of Material Department, Master Student of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine, 03041, Kyiv, Geroev Oborony Str., 15).

Получено 20.11.2012