

**Комплекс механічних властивостей інтерметалідів на основі алюмінію та особливості їх деформації та руйнування на нано- і мікрорівнях.**

**Комплекс механических свойств интерметаллидов на основе алюминия и особенности их деформации и разрушения на нано- и микроуровнях.**

**Complex of mechanical properties of aluminium based intermetallic compounds and their deformation and fracture features at the nanometre and micrometre scales.**

1. **Номер державної реєстрації - 0109U001776**

2. **Науковий керівник – д.т.н., проф. Лобода П.І., Лобода П.И., Loboda Petro I.**

3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Вперше в однакових умовах навантаження шляхом нано- та мікроіндентування встановлено відсутні до цього часу в довідковій літературі кількісні дані щодо комплексу механічних властивостей (модуль пружності, мікротвердість  $HV$  та нанотвердість  $H_n$ , характеристики пластичності  $\delta_H \approx \delta_A$ , границя плинності  $\sigma_{0,2}$ , в'язкість руйнування  $K_{1C}$ ) інтерметалідів на основі алюмінію конструкційного призначення та технологічного походження, особливостей їх деформації та руйнування.

За виключенням  $Al_4Ca$  всі інші досліджені інтерметаліди алюмінію  $Al_3Ti$ ,  $Al_3Zr$ ,  $Al_3Fe$ ,  $Al_2CaSi_2$  виявляють високу жорсткість і за модулем Юнга наближаються до керамічних матеріалів. За рівнем міцності ( $HV$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) та схильності до деформаційного зміцнення досліджені інтерметаліди можна розташувати в ряд:  $Al_4Ca$ ,  $Al_2CaSi_2 \rightarrow Al_3Ti$ ,  $Al_3Zr \rightarrow Al_3Fe$ .

Всі досліджені інтерметаліди, включаючи  $Al_3Ti$ ,  $Al_3Zr$ ,  $Al_3Fe$ ,  $Al_4Ca$  та  $Al_2CaSi_2$ , виявляються малопластичними речовинами, для яких характеристика пластичності  $\delta_H$  виявляється меншою за критичну величину  $\delta_H = 0,9$ , що свідчить про їх схильність до крихкого руйнування при навантаженні в стандартних умовах розтягнення та згину. За рівнем пластичності досліджені інтерметаліди алюмінію є порівняними з деякими природними мінералами (наприклад,  $CaCO_3$ ), займаючи за характеристикою пластичності  $\delta_H$  проміжне положення між ОЦК-металами та керамічними сполуками;

Всім дослідженим інтерметалідам алюмінію притаманна дуже низка в'язкість руйнування  $K_{1C}$ , яка за абсолютною величиною виявляється порівняною з неоксидною керамікою (наприклад,  $Cr_7C_3$ ), а для інтерметаліда  $Al_4Ca$  цей параметр виявляється навіть меншим, ніж для ковалентних кристалів (наприклад,  $Si$ ) та скла.

Отримані в роботі результати важливі для розробки новітніх технологій отримання сучасних надлегких сплавів, зокрема, високоміцних сплавів алюмінію та спіненого алюмінію, оптимізації їх складу та структури і прогнозування механічної поведінки в реальних умовах експлуатації під навантаженням шляхом інформаційно-діагностичного забезпечення надійності і довговічності матеріалів. Розвинуто фізичні уявлення в галузі теорії деформації та руйнування при заглибленні жорсткого індентора в малопластичні інтерметалідні сполуки в умовах пружно-пластичного контакту на нано- та мікрорівнях із застосуванням сучасних фізико-математичних моделей твердості, які дозволяють дослідити особливості деформації зазначених матеріалів під навантаженням.

**(рос.)**

Впервые в одинаковых условиях нагружения методом нано- и микроиндентирования установлены отсутствующие в справочной литературе количественные данные относительно комплекса механических свойств (модуль упругости, микротвердость  $HV$  и нанотвердость  $H_n$ , характеристики пластичности  $\delta_H \approx \delta_A$ , граница текучести  $\sigma_{0,2}$ , вязкость разрушения  $K_{1C}$ ) интерметаллидов на основе алюминия конструкционного назначения и технологического происхождения, особенностей их деформации и разрушения.

За исключением  $Al_4Ca$  все другие исследованные интерметаллиды алюминия  $Al_3Ti$ ,  $Al_3Zr$ ,  $Al_3Fe$ ,  $Al_2CaSi_2$  обнаруживают высокую жесткость и по значениям модуля Юнга приближаются к керамическим материалам. По уровню прочности ( $HV$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) и склонности к

деформационному упрочнению исследованные интерметаллиды можно расположить в ряд:  $Al_4Ca, Al_2CaSi_2 \rightarrow Al_3Ti, Al_3Zr \rightarrow Al_3Fe$ .

Все исследованные интерметаллиды, включая  $Al_3Ti, Al_3Zr, Al_3Fe, Al_4Ca$  и  $Al_2CaSi_2$ , оказываются малопластичными веществами, для которых характеристика пластичности  $\delta_H$  оказывается меньше критической величины  $\delta_H = 0,9$ , что свидетельствует об их склонности к хрупкому разрушению при нагрузке в стандартных условиях розтяжения и изгиба. По уровню пластичности исследованные интерметаллиды алюминия являются сравнимыми с некоторыми естественными минералами (например,  $CaCO_3$ ), занимая по характеристике пластичности  $\delta_H$  промежуточное положение между ОЦК-металлами и керамическими соединениями. Всем исследованным интерметаллидам алюминия присуща очень низкая вязкость разрушения  $K_{Ic}$ , которая по абсолютной величине оказывается сравнимой с безкислородной керамикой (например,  $Cr_7C_3$ ), а для интерметаллида  $Al_4Ca$  этот параметр оказывается даже меньше, чем для ковалентных кристаллов (например, Si) и стекла.

Полученные в работе результаты важны для разработки новейших технологий получения современных сверхлегких сплавов, в частности, высокопрочных сплавов алюминия и пены алюминия, оптимизации их состава и структуры, прогнозирования механического поведения в реальных условиях эксплуатации под нагрузкой путем информационно-диагностического обеспечения надежности и долговечности материалов. Развита физическая картина теории деформации и разрушения при внедрении жесткого индентора в малопластичные интерметаллидные соединения в условиях упруго-пластичного контакта на нано- и микроуровнях с применением современных физико-математических моделей твердости, которые позволяют исследовать особенности деформации указанных материалов под нагрузкой.

**(англ.)**

First in the identical loading conditions the mechanical parameters such as Young's modulus  $E$ , microhardness  $HV$  and nanohardness  $H_n$ , plasticity characteristics  $\delta_H \approx \delta_A$ , yield stress  $\sigma_{0,2}$ , temperature range of ductile-brittle transition, fracture toughness  $K_{Ic}$ , of intermetallics on the basis of aluminium, which were absent in reference books till now, and the features of their deformation and destructions on nano- and microlevels are determined.

All of investigated Al-based intermetallics, such as  $Al_3Ti, Al_3Zr, Al_3Fe, Al_2CaSi_2$ , with the exception of  $Al_4Ca$ , revealed high rigidity and on the values of Young's modulus approach the ceramic materials. On the level of strength ( $HV, \sigma_{0,2}$ ) and tendency to the deformation work-hardening it is possible to dispose the investigated intermetallics in a such rank:  $Al_4Ca, Al_2CaSi_2 \rightarrow Al_3Ti, Al_3Zr \rightarrow Al_3Fe$ .

All investigational intermetallics, including  $Al_3Ti, Al_3Zr, Al_3Fe, Al_4Ca$  and  $Al_2CaSi_2$ , are found low-plastic materials for which the plasticity characteristic  $\delta_H$  appears less than critical value  $\delta_H = 0,9$ , that testifies to their tendency to brittle fracture at loading in the standard conditions of tension and bending. On the level of plasticity the intermetallics on the base of aluminium are comparable with some natural minerals (for example,  $CaCO_3$ ), occupying intermediate position between bcc-metals and ceramic compounds. All of investigated intermetallics of aluminium have very low fracture toughness  $K_{Ic}$ , which on an absolute value appears comparable with oxygen-free ceramics (for example,  $Cr_7C_3$ ). For intermetallic  $Al_4Ca$  this parameter appears even less than, that for covalently crystals (for example, Si) and glass.

The results of the present study are important for development the newest technologies of manufacturing of modern lightweight alloys, in particular, high-strength aluminium alloys and foam aluminium, optimization of their composition and structure, prognostications of mechanical behaviour in the real exploitation conditions on-loading. Physical representations are developed in area of theory of deformation and destruction at introduction of rigid pyramidal indenter in low-plastic intermetallic compounds in the conditions of elastic-plastic contact at nano- and microlevels with the use of modern physical and mathematical models of hardness, which allow to research the

features of deformation of the intermetallic materials on-loading. These results are important both for the current basic research and for application in engineering practice.

**4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності (заявка на патент, патент, свідоцтво на авторське право).**

1. Бякова О.В., Сірко О.І., Мильман Ю.В., Гогаєв К.О., Воропаєв В.С., Дудник О.О. Спосіб одержання спієних виробів з порошків алюмінієвих сплавів // Патент України на винахід № 89337 від 11.01.2010. МПК В22F 3/20, 7/04, 3/12. Бюл. № 1. - 2010.
2. Бякова А.В., Мильман Ю.В, Власов А.А., Дудник А. О., Юркова А.И. Спосіб визначення коефіцієнта Пуассона // Патент України на винахід № 93248 від 25.01.2011. Бюл. № 2.
3. Бякова А.В., Мильман Ю.В, Власов А.А., Дудник А. О., Юркова А.И. Способ определения коэффициента Пуассона. // Патент на изобретение РФ № 2410667 от 27.01.2011. Бюл. № 3.

**5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Робота стосується нового напрямку у фізиці деформації та руйнування при локальному навантаженні матеріалів жорсткими інденторами, які не мають аналогів на світовому рівні, що визначає її новизну, своєчасність та актуальність. Для прогнозування поведінки алюмінієвих сплавів та спієного алюмінію в умовах експлуатації під навантаженням дуже важливе значення мають механічні характеристики інтерметалідів алюмінію. Стандартні методи механічних випробувань на розтягнення, стиснення та згин не можуть бути застосовані для дослідження механічних властивостей цих матеріалів, тому що вони є крихкими та малопластичними сполуками і мають дуже обмежену в'язкість при кімнатній температурі під час стандартних методів механічних випробувань. Зазначені обмеження стандартних методів механічних випробувань також не дають можливість порівнювати пластичність цих матеріалів між собою. Ці обмеження можуть бути ліквідовані в разі застосування локального навантаження жорсткими пірамідальними інденторами на нано- та мікрорівнях у поєднанні з розробленими в проекті новітніми методиками, які дозволяють визначити весь комплекс властивостей міцності та пластичності, зокрема, границі плинності та пропорційності, модулю Юнга, характеристики пластичності, інтервалу температур в'язко-крихкого переходу, в'язкості руйнування та ін. Задача визначення комплексу механічних властивостей інтерметалідів на основі алюмінію в умовах індентування раніше не розглядалась, не має аналогів, тому отримані результати повністю відповідають світовому рівню.

**6. Економічна привабливість для просування на ринок (вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники).**

Поповнення експериментальної бази даних щодо комплексу механічних властивостей (модуля пружності, твердості, пластичності, границі плинності, інтервалу температур в'язко-крихкого переходу, в'язкості руйнування) інтерметалідних сполук - матеріалів крихких в умовах розтягнення та згину. До того ж результати роботи є важливими для розробки новітніх технологій отримання надлегких високоміцних сплавів алюмінію і спієного алюмінію з метою оптимізації їх складу та структури, прогнозування механічної поведінки та інформаційно-діагностичного забезпечення надійності і довговічності матеріалів в реальних умовах експлуатації під навантаженням.

**7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).**

Підприємства машинобудівного профілю України.

**8. Стан готовності розробки (лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження).**

Опрацьовані методи визначення та границі їх застосування для отримання комплексу механічних властивостей інтерметалідів алюмінію, а саме:

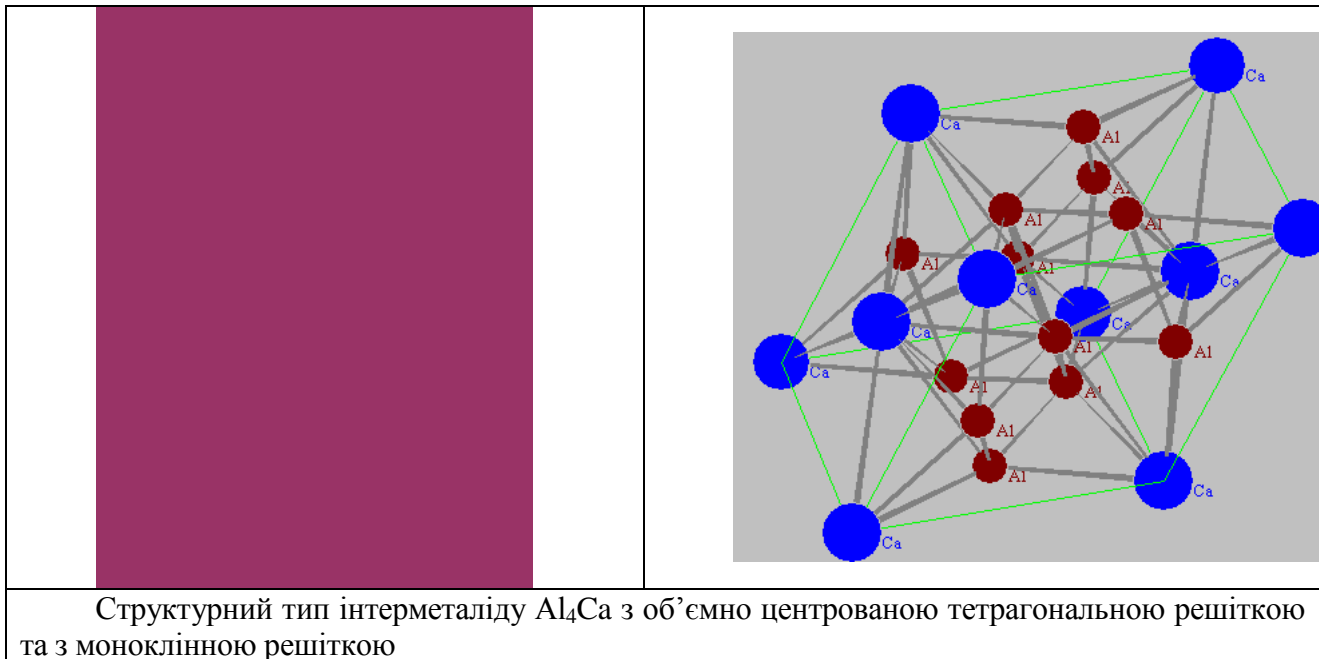
- нанотвердості із застосуванням атомносилової мікроскопії;

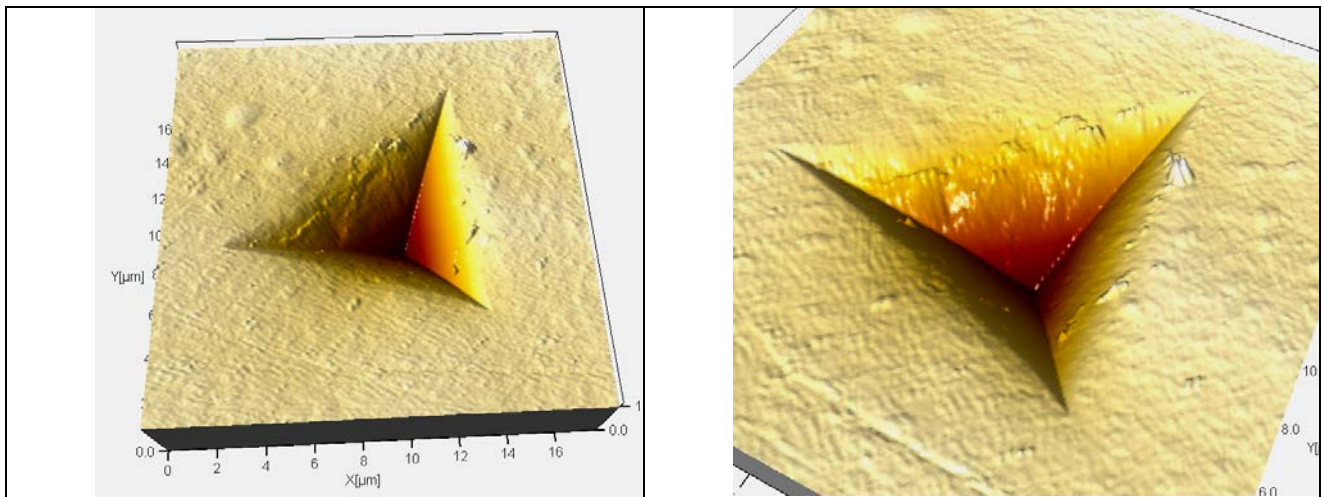
- характеристики пластичності за відновленим відбитком та за результатами безперервного переміщення індентора;
- границі плинності та границі пропорційності із застосуванням методу побудови кривих «напруження-деформація» за відновленим відбитком;
- характеристичної температури деформації  $T^*$  та температурного інтервалу в'язко-крихкого переходу із залученням температурної залежності характеристики пластичності;
- дані щодо кількісної оцінки опору інтерметалідів алюмінію до розповсюдження тріщин.

### 9. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін: «Фізико-механічні основи деформації і руйнування матеріалів в умовах мікро- та наноіндентування». «Порошкові, композиційні матеріали» (новий розділ «Надлегкі композиційні матеріали: спінені та високопористі матеріали з комірковою структурою»); «Матеріалознавство покриття» (новий розділ «Основи структурної теорії міцності покриттів в залежності від його структурного типу»); «Фізичні методи дослідження металів» (нові лабораторні роботи "Визначення твердості покриттів та тонких шарів матеріалів"; "Визначення характеристики пластичності крихких та високомісних матеріалів за результатами вимірювання твердості"). Результати роботи також використані при підготовці магістерських, дипломних та курсових науково-дослідних робіт студентів ІФФ НТУУ «КПІ»

**10. Назва підрозділу:** НТУУ «КПІ», інженерно-фізичний факультет, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, тел. (044) 406-83-79, e-mail: [yurkova@iff.kpi.ua](mailto:yurkova@iff.kpi.ua)





Зображення відбитків наноіндентора на поверхні зразка інтерметаліда  $Al_4Ca$

## 11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:

1. *Навчальний посібник з грифом МОН України*: Бякова О.В., Скороход В.В., Юркова О.І. Спінені та високопористі матеріали з комірковою структурою. - Київ: Гарант-Сервіс, 2011. - 320 с. (ISBN 978-966-97192-1-8, Ум. друк. арк. 19,3, Обл. -вид. арк 11, наклад 500).

### Наукові статті (публікації у фахових реферованих журналах):

1. H. Ruhe, J. Schneibel, M. Heilmaier, H. Saage, M. Goncharenko, P. Loboda., Low cycle fatigue of a  $Fe_3Al$ -based iron aluminide with and without Cr // *Intermetallics*. – 2010. – V. 18. – P. 1369-1374.
2. I. Bogomol, T. Nishimura, O. Vasykiv, Y. Sakka, P. Loboda, High-temperature Strength of Directionally Reinforced  $LaB_6-TiB_2$  Composite // *J. Alloys Compounds*. – 2010. – V. 505, Issues 1. – P. 130-134.
3. А.В. Бякова. Пенистые материалы // *Энциклопедия "Неорганическое материаловедение"*, том 2, кн. 2. Материалы и технологии. – Киев: Наукова думка, 2009. – С. 31-41.
4. С.И. Чугунова. Твердость. // *Энциклопедия "Неорганическое материаловедение"*, т. 2. – Київ: Наукова Думка, 2009. – С. 847-871.
5. I. Bogomol, T. Nishimura, O. Vasykiv, Y. Sakka and P. Loboda, High-Temperature Strength of Directionally Solidified  $B_4C-ZrB_2$  Composite, *World Journal of Engineering*. – 2010. – V. 7, No. 2. – P. 314-320.
6. Yu.V. Milman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova. Plasticity determined by indentation and theoretical plasticity of materials // *Bulliten of the Russian Academy of Science: Physics*. – 2009. – V. 73, No.9. – P.1215-1221.
7. Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В. Пластичность, определяемая методом индентирования, и теоретическая пластичность материалов. // *Известия РАН. Серия физическая*. - 2009. - Т.73, № 9. - С. 1282-1289.
8. Yu.V. Milman. Plasticity characteristic obtained by indentation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 2008. - Vol. 41. - P. 1-9.
9. Vyakova A.V., Sirko A.I., Gnyloskurenko S.V., Nakamura T. Aluminium foam formation from powder compacts with calcium carbonate: In situ experiments // *In Book: Porous Metals and Melt Foaming Technology (MetFoam 2009)*. - 2010 - P. 99 -104.
10. М.М. Кізь, О.В. Бякова, О.І. Сірко, Ю.В. Мільман, М.С. Яковлева. Покриття холодного газодинамічного наплення на основі сплаву  $Al-Fe-Cr$  з нанорозмірними квазікристалічними частками. /*Український фізичний журнал*, 2009, т.54, № 6, с. 594-600.

11. M.M. Kiz, A.V. Byakova, A.I. Sirko, Yu. Milman, M.S. Yakovleva. Cold-spray Coating of Al-Fe-Cr Alloy Reinforced by Nano-sized Quasicrystalline Particles.// Ukr. J. Phys. - 2009. - Т. 54, №6. – С. 594-600.
12. A.O. Dudnyk, A.V. Byakova, A.I. Sirko, S.V. Gnyloskurenko, Yu.V. Milman. Effect of the cell wall constituents induced by blowing agent on mechanical performance of aluminium foams // Porous Metals and Melt Foaming Technology. – 2010. – P. 375 -380.
13. Ю.В. Мильман. Фазовые превращения под давлением при индентировании // Физика и техника высоких давлений // 2011. – Т. 21, № 8. – С. 7-13
14. Yu. Milman. Deformation mechanisms, microstructure and mechanical properties of nanoscale crystalline and noncrystalline materials in different temperature ranges // MRS Proceedings. – 2011. – V. 1297: mrsf10-1297. – P. 05-03-u4-03-t4-03.
15. Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. –Т. 98. – С. 182-187
16. Ю.В. Мильман, А.Н. Слипенюк, В.В. Куприн, Д.В. Козырев. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т. 98. – С. 85-88.
17. Yu.V. Milman, A.A. Golubenko, S.N. Dub. Indentation size effect in nanohardness // Acta Materialia. – 2011.– V. 59. – P. 7480-7487.
18. Бякова О.В., Сірко О.І., Мільман Ю.В., Гогаєв К.О., Воропаєв В.С., Дудник О.О. Спосіб одержання спінених виробів з порошків алюмінієвих сплавів // Патент України на винахід № 89337 від 11.01.2010. МПК В22F 3/20, 7/04, 3/12. Бюл. № 1. - 2010.
19. Бякова А.В., Мильман Ю.В, Власов А.А., Дудник А. О., Юркова А.И. Спосіб визначення коефіцієнта Пуассона // Патент України на винахід № 93248 від 25.01.2011. Бюл. № 2.
20. Бякова А.В., Мильман Ю.В, Власов А.А., Дудник А. О., Юркова А.И. Способ определения коэффициента Пуассона. // Патент на изобретение РФ № 2410667 от 27.01.2011. Бюл. № 3.
21. Byakova A.V., Sirko A.I., Milman Yu.V. and et al. Cold-sprayed Coatings based on High Strength Aluminium Alloys Rainforced by Quasicrystalline Particles: Microstructure and Key Properties// High Temperature Materials and Processes. – 2010. – V. 29, No 5-6. – P. 325-337.

#### **Публікації за участю студентів:**

1. A.V. Byakova, A.I. Yurkova, V.V. Cherednichanko (студент), A.I. Sirko. Cold-spray Technique as Efficient Alternative Process for Consolidation of Powdered Al-Fe-Cr alloys Reinforced by Nanoquasicrystalline Particles // Nanomaterials: Applications and Properties. – 2011. – Vol. 2, Part II. – P. 270-279.
2. Ю.В. Мильман, А.Н. Слипенюк, В.В. Куприн, Д.В. Козырев (студент). Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т. 98. – С. 85-88.
3. Чередніченко В.В., Клягін Е.О. (студенти), Кизь М.М., Бякова О.В. , Юркова О.І. Структура наноквазікристалічних покриттів на основі сплаву Al-Fe-Cr, нанесених методом холодного газодинамічного напилення // Сб. тез П'ятої міжнародної конференції студентів та аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного моделювання», 2-4 грудня 2010 р., Київ, Україна. – С. 17.
4. Клягін Є.О., Чередніченко В.В. (студенти), Кизь М.М., Бякова А.В., Юркова А.І. Метод холодного газодинамічного напилення // Сб. тез П'ятої міжнародної конференції студентів та аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-

матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного моделювання», 2-4 грудня 2010 р., Київ, Україна. – С. 39.

5. Ю.В. Мильман, С.И.Чугунова, *Д.В.Козырев* (студент), В.В.Куприн, А.Н.Слипенюк. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония // Тезисы материалов 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011, Харьков, Украина, с. 27.  
Участь у 13 конференціях: зроблено 22 доповіді в т.ч.4 із студентами
1. Dudnyk A.O., Vyakova A.V., Sirko A.I., Gnyloskurenko S.V., Milman Yu.V.. Effect of the cell wall constituents induced by blowing agent on mechanical performance of aluminium foams // 6th International Conference on Porous Metals and Melt Foaming Technology (MetFoam 2009), Bratislava, Slovakia, September 1-4, 2009.
2. Кизь М.Н., Сирко А.И., Бякова А.В., Мильман Ю.В. Консолидация порошкового алюминиевого сплава, упрочненного метастабильными квазикристаллическими частицами. / Сборник тезисов конференции «Sintering 2009», г. Киев, 7-11 сентябрь 2009.
3. Дудник А.О., Власов А.А., Бякова А.В., Мильман Ю.В. Механические свойства гидрида титана, определенные в условиях индентирования // 2 Международная конференция «HighMatTech», г. Киев, 19-23 октября 2009.
4. Бякова А.В., Мильман Ю.В., Корягин С.В. Магнитные свойства нанокompозита Nd-Fe-V с низким содержанием Nd // 2 Международная конференция «HighMatTech», Киев, 19-23 октября 2009.
5. Бякова А.В., Власов А.А., Ефимов Н.А., Мильман Ю.В. Влияние деформации в условиях всестороннего сжатия на структуру и механические свойства гидрида титана. // 49-я международная конференция «Актуальные проблемы прочности», АПП-2010, Киев, Украина, 14-18 июня 2010 г.
6. Мильман Ю.В., Коржова Н.П., Мордовец Н.М., др. Исследование механизма пластической деформации интерметаллидов с участием Al // 49-я международная конференция «Актуальные проблемы прочности», АПП-2010, Киев, Украина, 14-18 июня 2010 г. – С. 216.
7. Мильман Ю.В., Голубенко А.А., Дуб С.Н.. Масштабная зависимость нанотвердости // 49-я международная конференция «Актуальные проблемы прочности», АПП-2010, Киев, Украина, 14-18 июня 2010 г
8. Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В. Особенности механического поведения тугоплавких соединений в различных температурных интервалах // II-я Международная Самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений», 18-20 май 2010, Киев, Украина.
9. Кизь М.Н., Бякова А.В., Сирко А.И., Яковлева М.С., Мильман Ю.В. Композиционные покрытия на основе алюминиевых сплавов, упрочненных наноквазикристаллическими частицами // II международная научная конференция Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь-Россия-Украина, 19-22 октября 2010, Киев, Украина.
10. Бякова О.В., Кизь М.М., Сирко О.И., Яковлева М.С., Мильман Ю.В. Квазикристаллические Al-покрытия, полученные холодным газодинамическим напылением // 6-ая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 20-24 сентября 2010 г., Понизовка, АР Крым, Украина.
11. Мильман Ю.В. Фазовый переход под индентором // 11-ая международная конференция «Высокие давления – 2010» НР-2010, 26 сентября – 1 октября 2010, г. Судак, Украина.
12. Чередніченко В.В., Клягін Е.О. (студенти), Кизь М.М., Бякова О.В., Юркова О.І. Структура наноквазікристалічних покриттів на основі сплаву Al-Fe-Cr, нанесених методом холодного газодинамічного напилення // П'ята міжнародна конференція студентів та аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-

матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного моделювання», 2-4 грудня 2010 р., Київ, Україна. – С. 17.

13. Клягін С.О., Чередніченко В.В. (студенти), Кизь М.М., Бякова А.В., Юркова А.І. Метод холодного газодинамічного напилення // П'ята міжнародна конференція студентів та аспірантів «До високих технологій на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного моделювання», 2-4 грудня 2010 р., Київ, Україна. – С.39.
14. Юркова О.І., Мільман Ю.В. Новітні методики мікромеханічних випробувань матеріалів методом локального навантаження жорстким індентором // Українсько-Польський семінар «NTUU «КПІ»-WUT. New horizons in research cooperation», 6-9 квітня 2011, Україна, Київ.
15. Vyakova A.V., Yurkova A.I., V.V. Cherednichanko (студент), A.I. Sirko. Cold-spray Technique as Efficient Alternative Process for Consolidation of Powdered Al-Fe-Cr alloys Reinforced by Nanoquasicrystalline Particles // 1<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties NAP-2011, 27-30 September, 2011, Alushta, Crimea, Ukraine.
16. Ю.В. Мильман. Современные методики индентирования для определения механических свойств и изучения механизма деформации материалов // Тезисы материалов 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011, Харьков, Украина, с.7.
17. Ю.В. Мильман, С.И.Чугунова, И.В.Гончарова, А.А.Голубенко. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования // Тезисы материалов 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011, Харьков, Украина, с.28.
18. Ю.В. Мильман, С.И.Чугунова, Д.В.Козырев (студент), В.В.Куприн, А.Н.Слипенюк. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония // Тезисы материалов 51-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011, Харьков, Украина, с. 27.
19. Ю.В. Мильман. Физическая концепция пластичности материалов // Тез. V Межд. научной конференции «Современные достижения в науке и образовании», 27 сентября–4 октября 2011, г. Нетания, Израиль, т. 1, с. 5-7.
20. С.И. Чугунова, А.А. Голубенко, И.В. Гриднева, Ю.В. Мильман. Анализ механического поведения керамических материалов при индентировании. // Тез. V Межд. научной конференции «Современные достижения в науке и образовании», 27 сентября–4 октября 2011, г. Нетания, Израиль, т. 1, с. 7-10
21. A.V. Vyakova, A.A. Vlasov. Fracture toughness and wear fatigue damage of ceramic coatings // Тез. V Межд. научной конференции «Современные достижения в науке и образовании», 27 сентября-4 октября 2011, г. Нетания, Израиль, т. 1, с. 10-13
22. С.И. Чугунова. Построение кривых деформации методом индентирования и анализ механического поведения малопластичных материалов // Тез. V Межд. научной конференции «Современные достижения в науке и образовании», 27 сентября–4 октября 2011, г. Нетания, Израиль, т. 1, с. 13-15.