

УДК 538.951,531.7  
 PACS 71.70.Gm,61.43.Fs  
 DOI 10.24144/2415-8038.2020.48.7-13

М.І. Бабіля, І.О. Шендер, А.І. Погодін, В.С. Біланич, І.П.Студеняк

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,  
 e-mail: vitaliy.bilanych@uzhnu.edu.ua

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СУПЕРІОННИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$

Композити на основі суперіонних провідників  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  були виготовлені шляхом перемішування мікропорошків з етилен-вінілацетатом у пропорції 9:1, суміш яких в подальшому висушували та пресували. Проведено вимірювання мікротвердості композитних зразків при кімнатній температурі з використанням індентора Віккерса. Отримано залежності мікротвердості композитів на основі  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  від глибини відбитку та проведено їх аналіз. Мікротвердість композитів виявилася значно меншою, ніж мікротвердість керамік та кристалів  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$ , а концентраційна залежність мікротвердості є нелінійною з мінімумом при  $x=0.25$ .

**Ключові слова:** суперіонні провідники, тверді розчини, композити, механічні властивості, мікротвердість, концентраційна залежність.

### Вступ

Серед перспективних суперіонних матеріалів для твердотільної іоніки як науковий, так і прикладний інтерес представляють дослідження кристалів зі структурою аргіродиту [1]. Зокрема, для кристалів твердих розчинів  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  виявлено високу іонну провідність, яка є характерною для кращих суперіонних провідників [2]. У порівнянні з монокристалами, більш придатними для практичного використання є полікристалічні та композитні суперіонні матеріали. Характерною особливістю структури композитів є різка відмінність фізичних властивостей кристалітів та полімерних міжкристалічних областей. Наявність двох компонент у композиті та співвідношення їх відносно го вмісту суттєво впливає на фізичні властивості даних матеріалів, зокрема – на механічні [3–5].

При дослідженні композитів на основі твердих розчинів  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  було встановлено, що зі збільшенням вмісту Ag загальна електрична провідність нелінійно зменшується, тоді як відношення іонної провідності до електронної при катіонному замі-

щенні  $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Ag}^+$  нелінійно зростає більш, ніж на порядок [6].

Метою даної роботи є дослідження механічних властивостей композитів на основі твердих розчинів  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  методом мікроіндентування.

### Методика експерименту

Для виготовлення композитів були синтезовані сполуки  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  за методикою, описаною в роботі [7]. Мікропорошки з розміром кристалітів 20–50 мкм були отримані шляхом розтирання синтезованої полікристалічної шихти в агатовій ступці. Мікрокристалічні порошки перемішували з етилен-вінілацетатним (ЕВА) полімером, розчиненим у етилацетаті, у співвідношенні: 90 мас.%  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  : 10 мас.% ЕВА. Раніше було показано, що таке співвідношення між компонентами є оптимальним по відношенню до їх електричних та механічних властивостей [7, 8]. Перемішування проводили протягом 15 хв з використанням ультразвукового пристрою CE-7200A (44 кГц) для одержання гомогенних суспен-

зій, які в подальшому висушували при температурі 333 К та пресували при тиску  $\sim 400$  МПа. У результаті були отримані зразки у вигляді дисків з діаметром 8 мм і товщиною 3–4 мм. Вимірювання мікротвердості  $HV$  композитних зразків проводили при кімнатній температурі за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 з використанням індентора Віккерса - алмазної правильної чотирикутної піраміди з кутом при вершині  $136^\circ$ . Числові значення мікротвердості  $HV$  визначали за формулою [9]:

$$H = \frac{P}{S} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

де  $\alpha=136^\circ$ ,  $P$  – сила навантаження на індентор,  $d$  – діагональ відбитку. Силу навантаження на індентор змінювали в діапазоні 0.049–1.47 Н. Глибина відбитків індентора становила 1–10 мкм.

## Результати досліджень

На рис.1 наведено залежності мікротвердості  $HV$  від глибини відбитку  $h$  при кімнатній температурі для композитів на основі твердих розчинів  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7SiS_5I$ . Видно, що при зростанні глибини відбитку  $h$  мікротвердість  $HV$  зменшується. В усьому інтервалі зміни  $h$  мікротвердість композитів на основі  $Cu_7SiS_5I$  більша, ніж для  $Ag_7SiS_5I$ . Аналогічне зменшення мікротвердості спостерігається в кристалах  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7SiS_5I$  такого ж хімічного складу при ізовалентному заміщенні  $Cu^+ \rightarrow Ag^+$  [10]. Слід зазначити, що під час утворення відбитку в області контакту з індентором утворюються різні деформаційні зони, які обумовлюють пружну, пластичну, релаксаційну складову деформації досліджуваного зразка [11]. Глибину відбитку можна представити сумою складових, які обумовлені різними механізмами деформування зразка під індентором:

$$h = h_e + h_r + h_p, \quad (2)$$

де  $h_e$  – пружна складова,  $h_e = P/k$ ,  $k$  – жорсткість матеріалу під індентором;  $h_r$  – релаксаційна (відновлювальна) складова,  $h_r = h_{r0} - h_0 \exp(-\frac{t}{\tau})$ ,  $t$  – час прикладання навантаження

на відбиток ( $h_{r0} = h_r$  при  $h \rightarrow \infty$ ),  $\tau$  – час релаксації;  $h_p$  – пластична складова;  $h_p = \frac{\Delta h_p}{\Delta \tau} \times t$ ,  $\frac{\Delta h_p}{\Delta \tau}$  – швидкість зростання пластичної деформації. На відміну від кристалів, на формування деформаційних зон у композитних зразках істотно впливає полімерна матриця. Як було показано в роботі [7], формування відбитку в композитах при великих глибинах визначається переважно механічними властивостями більш м'якої полімерної матриці.

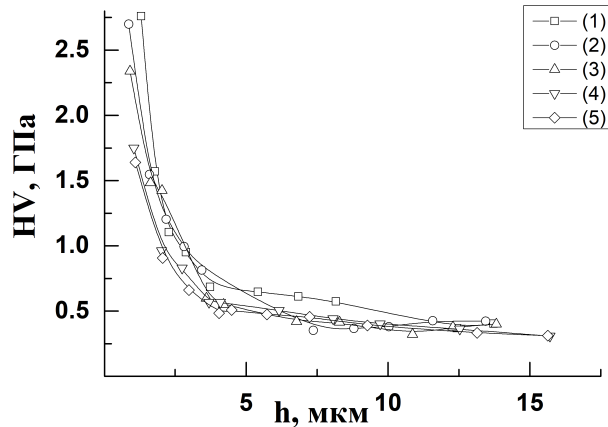


Рис. 1: Залежність мікротвердості  $HV$  композитів на основі  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7SiS_5I$ : 1 –  $Cu_7SiS_5I$ , 2 –  $(Cu_{0.75}Ag_{0.25})_7SiS_5I$ , 3 –  $(Cu_{0.5}Ag_{0.5})_7SiS_5I$ , 4 –  $(Cu_{0.25}Ag_{0.75})_7SiS_5I$ , 5 –  $Ag_7SiS_5I$ .

Як видно з рис.1, при зростанні глибини занурення індентора відбувається зменшення мікротвердості композитів. При цьому максимальні зміни на залежності  $H(h)$  спостерігаються в області  $h < 3$  мкм. В області  $h = 5 - 15$  мкм зменшення мікротвердості композитів відбувається досить слабо. Істотне зменшення мікротвердості досліджуваних композитів в області малих значень  $h$  може бути обумовлено розмірним ефектом індентування («indentation size effect»). Даний ефект можна пояснити як наслідок індукованого, тобто створеного в процесі індентування, градієнту пластичної деформації в області мікроконтакту, який може бути проінтерпретований в моделі геометрично необхідних дислокацій [12–15]. При малих значеннях  $h$  область мікроконтакту співрозмірна з величиною мікрокристалів даних композитів. Тому, можна вважати, що при  $h < 3$  мкм мікротвердість композитів визначається твердістю мікрокристалічної компо-

ненти. Тобто, при деформуванні композиту при  $h < 3$  мкм під індентором проходить генерація, переміщення і накопичення дислокацій (що відповідає за локальне підвищення механічної міцності матеріалу). Дислокації накопичуються по одній із двох причин: 1) вони акумулюються шляхом хаотичного взаємного захоплення (статистично накопичувані дислокації), або 2) дислокації необхідні для узгодженої деформації різних частин матеріалу (це так звані геометрично необхідні дислокації - ГНД). При малих значеннях  $h$  велика (у порівнянні з  $h$ ) кривизна притуплення вістря індентора приводить до появи градієнта напруг  $i$ , як наслідок, до градієнта пластичної деформації. При цьому, крім статистичних дислокацій, у мікрочастинках накопичуються ГНД. Це приводить до збільшення густини дислокацій у зв'язку із зменшенням розміру відбитка при зменшенні  $h$ , і рухом дислокацій по меншому колу ковзання вздовж напівкруглих поверхонь ковзання з центром у вершині індентора. Тому, при зменшенні  $h$  мікротвердість зростає.

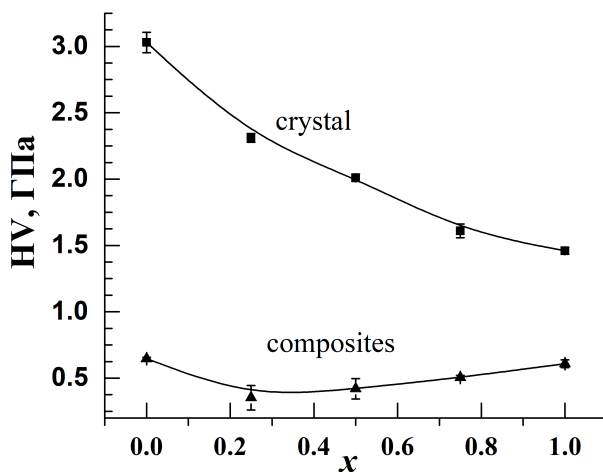


Рис. 2: Концентраційна залежність мікротвердості  $HV$  кристалів  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7Si_5I$  і композитів на їх основі при силі навантаження на індентор 0.5 Н.

Як видно з рис.1, твердість досліджених композитів слабо змінюється при  $h > 5$  мкм. Низькі значення мікротвердості досліджених композитів в інтервалі  $h = 5 - 15$  мкм можуть бути пов'язані з тим, що від-

битки формуються не лише за рахунок пластичної деформації мікрочастин, але й в основному в результаті пластичної деформації полімерної матриці та взаємного зміщення мікрочастин у полімерній матриці під дією високих механічних напруг під індентором. В області  $h > 5$  мкм відносний внесок полімерної матриці у твердість композиту зростає. За результатами концентраційних досліджень встановлено, що при заміщенні  $Cu^+ \leftrightarrow Ag^+$  зміна мікротвердості композитів відбувається нелінійно (рис.2). Мінімальні значення твердості має композит при  $x=0.25$ . Загалом мікротвердість отриманих композитів складає близько 20% - 30% від твердості кристалів аналогічного хімічного складу. Крім того, твердість досліджуваних композитів є значно меншою (у 2 рази), ніж мікротвердість кераміки  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7Si_5I$ , одержаної методом твердофазового спікання [16]. Таким чином, інтегрально механічна міцність отриманих композитів визначається в'язко-пружними властивостями полімерної матриці, а локально ( $< 3$  мкм) - пружно-пластичними властивостями мікрочастин.

## Висновки

Встановлено, що мікротвердість композитів на основі  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7Si_5I$  суттєво менша, ніж мікротвердість керамік та кристалів аналогічних хімічних складів. Мікротвердість композитів  $(Cu_{1-x}Ag_x)_7Si_5I$  в області глибин відбитку  $h < 3$  мкм швидко зменшується при зростанні глибини, що може бути обумовлено розмірним ефектом при мікроіндентуванні мікрочастин. Слабка зміна мікротвердості досліджуваних композитів при  $h > 5$  мкм може бути обумовлена зміною механізму формування відбитку, який утворюється переважно за рахунок в'язко-пружного деформування полімерної матриці та взаємного зміщення у ній мікрочастин під впливом великих механічних напруг під індентором.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Студеняк І.П. Процеси розупорядкування в суперіонних провідниках зі структурою аргіродита / І.П. Студеняк, М. Краньчєц. – Ужгород: Вид-во. Говерла, 2007. – 208 с.
- [2] Studenyak I.P. Electrical properties of copper- and silver-containing superionic  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  mixed crystals with argyrodite structure / I.P. Studenyak, A.I. Pogodin, V.I. Studenyak, V.Yu. Izai, M. J. Filep, O.P. Kokhan, M. Kranjčec, P. Kúš // [Solid State Ionics](#). – 2020. – Vol. 345. P. 115183(6).
- [3] Еренков О.Ю. Инновационные технологии полимерных композиционных материалов / О.Ю. Еренков, С.А. Ковальчук. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 187 с.
- [4] Perry A.J. The microhardness of composite materials / A.J. Perry, D.J. Rowcliffe // [J. Mater. Sci. Lett.](#) – 1973. Vol. 8 (6). – P. 904–907.
- [5] Suryanarayana C. Mechanically alloyed nanocomposites / C. Suryanarayana, A. Nasser // [Prog. Mater. Sci.](#) – 2013. – Vol. 58. P. 383–502.
- [6] Погодін А.І. Електричні властивості композитів на основі твердих розчинів суперіонних провідників  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  / А.І. Погодін, О.П. Кохан, О.О. Ямковий, Л.М. Сусліков, І.П. Студеняк // [Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. "Фізика"](#) – 2019. – Vol. 45. С. 19–26.
- [7] Погодін А.І. Синтез, вирощування та структурні дослідження монокристалів  $\text{Cu}_7\text{SiS}_5\text{I}$ ,  $\text{Ag}_7\text{SiS}_5\text{I}$  та твердих розчинів на їх основі / А.І. Погодін, М.Й. Філеп, М.М. Лучинець, О.О. Ямковий, О.П. Кохан, І.П. Студеняк // [Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. "Фізика"](#) – 2018. – Vol. 43. С. 9–14.
- [8] Bendak A.V. Influence of cation substitution on mechanical properties of  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{GeSe}_5\text{I}$  mixed crystals and composites on their base / A.V. Bendak, K.V. Skubenysh, A.I. Pogodin, V.S. Bilanych, M. Kranjčec, I.P. Studenyak // [Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics](#). – 2020. – Vol. 23 (1). P. 37–40.
- [9] Rebouças Filho P.R. Brinell and Vickers hardness measurement using image processing and analysis techniques / P.R. Rebouças Filho, T.S. Cavalcante, V.H.C. Albuquerque, J.M.R.S. Tavares // [Journal of Testing and Evaluation](#). – 2010. – Vol. 38 (1). P. 88–94.
- [10] Bilanych V.S. The Effect of Isovalent Cation Substitution on Mechanical Properties of  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  Superionic Mixed Single Crystals / V. S. Bilanych, K. V. Skubenysh, M. I. Babilya, A. I. Pogodin, I. P. Studenyak // [Ukrainian Journal of Physics](#). – 2020. – Vol. 65 (5). P. 453–457.
- [11] Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers and films: a review / Yu.I. Golovin // [Physics of the Solid State](#) – 2008. – Vol. 50. P. 2205–2236.
- [12] Gao H. Mechanism Based Strain Gradient Plasticity – I. Theory / H. Gao, Y. Huang, W.D. Nix, J.W. Hutchinson // [J.Mech. Phys. Solids](#) – 1999. – Vol. 47. P. 1239–1263.
- [13] Nix W.D. Indentation Size Effects in Crystalline Materials: A Law for Strain Gradient Plasticity / W.D. Nix, H. Gao. // [J.Mech. Phys. Solids](#) – 1998. – Vol. 46 (3). P. 411–425.

- [14] Begley M.R. The mechanics of size-dependent indentation / M.R. Begley, J.W. Hutchinson. // [J.Mech. Phys. Solids – 1998. – Vol. 35 \(9\). P. 2049-2068](#).
- [15] Zong Z. Indentation Size Effects in the Nano and Microhardness of FCC Single Crystal Metals / Z. Zong, J. Lou, O.O. Adewoye, A. A. Elmustafa, F. Hammad, W. O.Soboyejo. // [Materials and Manufacturing Processes – 2007. – Vol. 22. P. 228–237](#).
- [16] Шендер І.О. Вплив катіонного заміщення на електричну провідність суперіонної кераміки на основі мікрокристалічних порошоків  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  / І.О. Шендер, А.І. Погодін, С.М. Березнюк, М.Й. Філеп, О.П. Кохан, І.П. Студеняк // [Наук. вісник Ужгородського ун-ту. Сер. "Фізика" – 2020. – Vol. 47. С. 21](#).

Стаття надійшла до редакції 7.08.2020

М.И. Бабиля, И.А. Шендер, А.И. Погодин, В.С. Биланич, И.П.Студеняк

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина,  
e-mail: vitaliy.bilanych@uzhnu.edu.ua

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУПЕРИОННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$

Композиты на основе суперіонных проводников  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  были изготовлены путем перемешивания микропорошков с этилен-винилацетатом в пропорции 9:1, смесь которых в дальнейшем высушивали и прессовали. Проведены измерения микротвердости композитных образцов при комнатной температуре с использованием индентора Виккерса. Получены зависимости микротвердости композитов на основе  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  от глубины отпечатка и проведен их анализ. Микротвердость композитов оказалась значительно меньше, чем микротвердость керамики и кристаллов  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$ , а концентрационная зависимость микротвердости является нелинейной с минимумом при  $x = 0.25$ .

**Ключевые слова:** суперіонные проводники, твердые растворы, композиты, механические свойства, микротвердость, концентрационная зависимость.

M.I. Babilya, I.A. Shender, A.I. Pogodin, V.S. Bilanych, I.P. Studenyak

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, 54, Voloshyna Str., Ukraine,  
e-mail: vitaliy.bilanych@uzhnu.edu.ua

## MECHANICAL PROPERTIES OF SUPERIONIC COMPOSITES BASED ON $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$

**Purpose.** The purpose of this work was to investigate the mechanical properties of composites based on  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  solid solutions by the microindentation method.

**Methods.** Composites based on superіonic conductors were prepared by mixing powders  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  (with a microcrystal size of 20–50  $\mu\text{m}$ ) with ethylene-vinyl acetate in a ratio of 9:1, the mixture of which was subsequently dried and pressed. The microhardness of the composite samples was measured at room temperature using a PMT-3 microhardness tester using a Vickers indenter. The load force on the indenter was varied in the range of 0.049–1.47 N.

The indentation depth of the indenter was 1–10  $\mu\text{m}$ .

**Results.** The dependences of the microhardness of composites based on  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  solid solutions on the indentation depth at room temperature are obtained. It was found that with an increase in the indentation depth, the microhardness of the composites decreases. The microhardness of composites based on  $\text{Cu}_7\text{SiS}_5\text{I}$  is higher than for  $\text{Ag}_7\text{SiS}_5\text{I}$ . The maximum changes in microhardness are observed in the region  $h < 3 \mu\text{m}$ . In the range  $h = 5 - 15 \mu\text{m}$ , the decrease in the microhardness of the composites is rather weak. It was found that with  $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$  substitution, the change in the microhardness of the composites occurs nonlinearly. The hardness values of composites has the minimum at  $x = 0.25$ . The microhardness of the obtained composites is about 20% - 30% of the microhardness of crystals of similar chemical composition. The microhardness of the investigated composites is significantly lower (2 times) than the microhardness of  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  ceramics obtained by solid-phase sintering.

**Conclusions.** It has been established that the microhardness of composites based on  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  is significantly lower than the microhardness of ceramics and crystals of similar chemical compositions. The dependence of the microhardness of the  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  composites in the region of indentation depths  $h < 3 \mu\text{m}$  rapidly decreases with increasing depth, which may be due to the indentation size effect during microindentation of microcrystals. The mechanism of the imprint formation changes at  $h > 5 \mu\text{m}$ . It is formed mainly due to the viscoelastic deformation of the polymer matrix and the mutual displacement of microcrystals in it due to the influence of high mechanical stresses under the indenter.

**Keywords:** solid electrolytes, solid solutions, composites, mechanical properties, microhardness, concentration dependence.

## REFERENCES

- [1] Studenyak, I.P., Kranjčec M. (2007), Processes of disordering in superionic conductors with argyrodite structure [Procesy rozuporjadkuvannja v superionnyh providnyka zi strukturoju argirodytu], Uzhhorod, Goverla, 208 p.
- [2] Studenyak I.P., Pogodin A.I., Studenyak V.I., Izai V.Yu., Filep M.J., Kokhan O.P., Kranjčec M., Kúš P. (2020), Electrical properties of copper- and silver-containing superionic  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  mixed crystals with argyrodite structure, [Solid State Ionics., Vol.345., № 115183\(6\)](#).
- [3] Erenkov O.Ju., Kovalchuk S.A. (2016), Innovative technologies of polymer composite materials [Innovatsionnye tehnologii polimernych kompozitsionnyh materyalov], Chabarovsk, Tochookeanskii gosudrstvennyj universitet, 187 p.
- [4] Perry A.J., Rowcliffe D.J. (1973), The microhardness of composite materials, [J. Mater. Sci. Lett., Vol. 8., P. 904–907](#).
- [5] Suryanarayana C., Nasser A. (2013), Mechanically alloyed nanocomposites, [Prog. Mater. Sci., Vol. 58., P. 383–502](#).
- [6] Pogodin A.I., Kokhan O.P., Yamkovy O.O, Suslikov L.M., Studenyak I.P. (2019), Electrical properties of composites based on solid solutions of superionic conductors  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  [Elektrychni vlastyivosti kompozytiv na osnovi tverdyh rozchyniv superionnyh providnykiv  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$ ], [Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics \[Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.\], Iss. 45, P. 19–26](#).
- [7] Pogodin A.I., Filep M.J., Luchynets M.M., Yamkovy O.O, Kokhan O.P., Studenyak I.P. (2018), Synthesis, growth and structural studies of  $\text{Cu}_7\text{SiS}_5\text{I}$ ,  $\text{Ag}_7\text{SiS}_5\text{I}$  single crystals and solid solutions based on them [Syntez, vyroshchuvannja ta strukturni doslidzhennja monokystaliv  $\text{Cu}_7\text{SiS}_5\text{I}$ ,  $\text{Ag}_7\text{SiS}_5\text{I}$  ta tverdych rozchyniv na ich osnovi], [Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics \[Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.\], Iss. 43, P. 9–14](#).
- [8] Bendak A.V., Skubenych K.V., Pogodin A.I., Bilanych V.S., Kranjčec M., Studenyak I.P. (2020), Influence of cation substitution on mechanical properties of  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{GeSe}_5\text{I}$

- mixed crystals and composites on their base, [Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.](#), Vol. 23 (1), P. 37–40.
- [9] Rebouças Filho P.R., Cavalcante T.S., Albuquerque V.H.C., Tavares J.M.R.S. (2010), Brinell and Vickers hardness measurement using image processing and analysis techniques, [Journal of Testing and Evaluation](#), Vol. 38 (1), P. 88–94.
- [10] Bilanych V.S., Skubenych K.V., Babilya M.I., Pogodin A.I., Studenyak I.P. (2020), The Effect of Isovalent Cation Substitution on Mechanical Properties of  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  Superionic Mixed Single Crystals, [Ukrainian Journal of Physics.](#), Vol. 65 (5), P. 453–457.
- [11] Golovin Yu.I. (2008), Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers and films: a review, [Physics of the Solid State](#), Vol. 50., P. 2205–2236.
- [12] Gao H., Huang Y., Nix W. D., Hutchinson J. W. (1999), Mechanism Based Strain Gradient Plasticity–I. Theory, [J.Mech. Phys. Solids](#), Vol. 47., P. 1239–1263.
- [13] Nix W. D., Gao H. (1998), Indentation Size Effects in Crystalline Materials: A Law for Strain Gradient Plasticity, [J.Mech. Phys. Solids](#), Vol. 46 (3), P. 411–425.
- [14] Begley M.R., Hutchinson J. W. (1998), The mechanics of size-dependent indentation, [J.Mech. Phys. Solids](#), Vol. 35 (9), P. 2049–2068.
- [15] Zong Z., Lou J., Adewoye O.O., Elmustafa A. A., Hammad F., Soboyejo W. O. (2007), Indentation Size Effects in the Nano and Microhardness of FCC Single Crystal Metals, [Materials and Manufacturing Processes](#), Vol. 22, P. 228–237.
- [16] Shender I.O., Pogodin A.I., Bereznyuk S.M., Filep M.J., Kokhan O.P., Studenyak I.P. (2020), Effect of cationic substitution on the electrical conductivity of superionic ceramics based on microcrystalline powders  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$  [Vplyv kationnogo zamishchennya na elektrychnu providnist superionnoji keramiky na osnovi mikrokrytaliv poroshkiv  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{SiS}_5\text{I}$ ], [Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics \[Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.\]](#), Iss. 47, P. 21 .