

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.6

UDC 620.1:536.2

**Popil Oleg**, Postgraduate Student, Department of Condensed State Physics

**Tomina Anna-Mariia**, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Condensed State Physics

**Bashev Valerii**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Condensed State Physics

**Kalinina Tetiana**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Condensed State Physics

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

**Попіль О.І.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, ORCID: 0009-0004-8770-2351, e-mail: ogi.popil93@gmail.com

**Томіна А.-М.В.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-5354-0674, e-mail: an.mtomina@gmail.com

**Башев В.Ф.**, д.ф.-м.н., професор, ORCID: 0000-0002-3177-0935, e-mail: bashev\_vf@ukr.net

**Калініна Т.В.**, к. ф.-м.н., доцент, ORCID: 0000-0002-6806-3425, e-mail: kalinina\_tv@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### INFLUENCE OF BINARY ALLOY OF THE AL-CR SYSTEM ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ULTRA-HIGH-MOLECULAR-WEIGHT POLYETHYLENE

*The article considers the influence of a liquid-quenched binary alloy of the Al-Cr system on the thermophysical properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene. It was found that introducing 5—30 wt. % alloy leads to a decrease in the specific heat capacity and an increase in thermal conductivity by approximately 25 %. The improvement of these indicators occurs because the particles of the binary alloy form effective heat-conducting paths in the volume of the polymer material, which contributes to a decrease in the thermal resistance at the polymer-filler interface. On the other hand, the decrease in the specific heat capacity and the increase in thermal conductivity are also associated with an increase in the degree of crystallinity of polymer composites compared to pure ultra-high-molecular-weight polyethylene. It was established that the effective filler content is 20 wt. %.*

**Keywords:** ultra-high-molecular-weight polyethylene; binary alloy of the Al-Cr system; thermal conductivity; thermal capacity.

*У статті розглянуто вплив загартованого з рідкого стану бінарного сплаву системи Al-Cr на теплофізичні властивості надвисокомолекулярного поліетилену. Встановлено, що введення сплаву у кількості 5—30 мас. % призводить до зменшення питомої теплоємності та зростання теплопровідності орієнтовано на 25 %. Покращення зазначених показників зумовлено тим, що частки бінарного сплаву формують ефективні теплопровідні шляхи в об'ємі полімерного матеріалу, що сприяє зменшенню теплового опору на межі поділу «полімер-наповнювач». З іншого боку, зменшення питомої теплоємності та зростання теплопровідності також пов'язані зі зростанням ступеня кристалічності полімерних композитів порівняно з чистим надвисокомолекулярним поліетиленом. Виявлено, що ефективний вміст наповнювача складає 20 мас. %.*

**Ключові слова:** надвисокомолекулярний поліетилен; бінарний сплав системи Al-Cr; теплопровідність; теплоємність.

#### Problem's formulation

The requirements for structural and tribotechnical materials are increasing while scientific and technological progress is developing rapidly. New innovative, environmentally safe, and effective developments are needed [1]. These include polymer composite materials (PCMs), which are characterized by a unique set of functional properties, in particular, lightness, resistance to low and high

temperatures, vibrations, corrosion, moisture, and other aggressive factors, stable operation in an abrasive environment (straw residues, soil, and sand particles), under the influence of cyclic and fatigue loads, as well as the possibility of operation in tribological joints under friction conditions without lubrication. Thus, according to the forecasts of the BCC Research Report Overview “Engineering Resins, Polymer Alloys, and Blends: Global Markets” (April 2022) [2], PCMs will displace more expensive traditional structural and tribotechnical materials (brass, bronze, babbitt, aluminum alloys) in the coming years, and their share will be \$94.0 billion in 2026.

A rather promising direction is developing and creating new PCMs based on thermoplastic polymers. As an analysis of literary sources has shown [3], replacing serial materials of friction unit elements and structures of existing equipment with such PCMs contributes to increasing its performance and durability. In addition, this replacement leads to a reduction in capital costs associated with the manufacture of products (even of complex geometry) and their subsequent maintenance [4, 5]. The environmental aspect is also an advantage of using PCMs instead of serial materials. This is because the amount of waste in the process of their manufacture is minimal, and the materials themselves are recyclable without significant deterioration of functional properties [6].

The disadvantages of PCM products include a relatively low thermal conductivity. Therefore, an urgent scientific and practical task for the manufacture of parts for modern machinery is the development of PCMs that do not have this drawback.

#### Analysis of recent research and publications

One of the effective polymer matrices for creating PCMs with high functional properties is ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE). It has been shown that the introduction of fillers (FLs) of various nature and form — basalt, carbon and organic fibres [7], binary and high-entropy alloys [8], calcium carbonate, wollastonite, aluminium, carbon nanofillers, graphene, zirconium, aluminium and zinc oxides — allows obtaining structural and tribotechnical products with high self-extinguishing properties, a wide temperature (from 173 to 423 K) operating range, low water absorption and friction coefficient, as well as high thermal stability, hardness, stiffness, wear resistance, and elasticity [9, 10]. However, despite the excellent properties of these PCMs, their widespread use in many fields of machinery is limited by their high cost, inaccessibility, low thermal conductivity, and the complexity of the technological process of forming products with some FLs.

#### Research objects and methods

We used the UHMWPE from Jiujiang Zhongke Xinxing New Material Co., Ltd. [2] as a matrix, and a dispersed (40—100  $\mu\text{m}$ ) single-phase liquid-hardened binary alloy of the Al-Cr system with a chromium content of 5 wt. % as a filler to create new compositions of metal-polymer composites. Tabl. 1 gives the functional characteristics of the UHMWPE from this company.

Table 1. Functional properties UHMWPE [7, 8]

Indicator		Value
Molecular weight, $\cdot 10^6$ , g/mol		5-5,5
Dispersion, $\mu\text{m}$		500
Melt viscosity, ml/g		2650
Density, $\text{kg/m}^3$		930-960
Bulk density, $\text{kg/m}^3$		400
Water absorption coefficient, %		<0,01
Tensile strength, MPa		35
Relative elongation at break, %		$\geq 300$
Temperature of, K		
-	thermal deformation	353
-	melting	398-411
Operating temperature, K		
-	minimum	73
-	maximum	353

Single-phase binary Al-Cr alloys are characterised by high technical characteristics, which is due to the significant level of microstresses ( $\Delta a/a \geq 2.5 \cdot 10^{-3}$ ) in the crystal lattice of the Al-based substitution solid solution. This effect occurs because of a significant difference in the atomic radii of elements, in particular aluminium ( $r_{Al} = 0.142$  nm) and chromium ( $r_{Cr} = 0.128$  nm) [11]. Samples of pure UHMWPE and PCMs with a content of 5—30 wt.% FL were manufactured by compression pressing [12]. X-ray studies of pure UHMWPE and binary alloy were carried out using a DRON-2.0 diffractometer in monochromatized  $K\alpha$  copper radiation.

The specific heat capacity ( $C_p$ , kJ/kg·K) of UHMWPE and PCMs based on it was determined on the "IT-S-400" device. Cylindrical samples (diameter  $15 \pm 0.1$  mm and height  $10 \pm 0.5$  mm) were manufactured to measure this indicator. The principle of operation of this device is based on the comparative method of dynamic calorimetry using a heat meter and an adiabatic shell.

We used the device "IT- $\lambda$ -400" to determine the thermal conductivity coefficient ( $\lambda$ , W/m·K) of UHMWPE and PCMs. The method used to determine this indicator was to measure the thermal resistance of the sample during its stable linear heating in a given temperature interval. The test samples in this test had the shape of a cylinder with a diameter of  $15 \pm 0.3$  mm and a height  $h$ , which satisfies the condition  $h \approx 3 \cdot \lambda$ .

In both cases, the samples must have strictly plane-parallel surfaces to ensure tight thermal contact with the sensors.

### Research results

It is clear from the data presented in Fig. 1 that the introduction of FL leads to a decrease in the specific heat capacity and an increase in the thermal conductivity of UHMWPE, in the entire experimental temperature range, by approximately 25 %, reaching minimum values at 20 wt. % filling. The improvement of these indicators occurs because FL particles form effective heat-conducting paths in the volume of UHMWPE, thereby reducing the thermal resistance at the "polymer-binary alloy" phases interface and ensuring better heat transfer through the PCM [14].

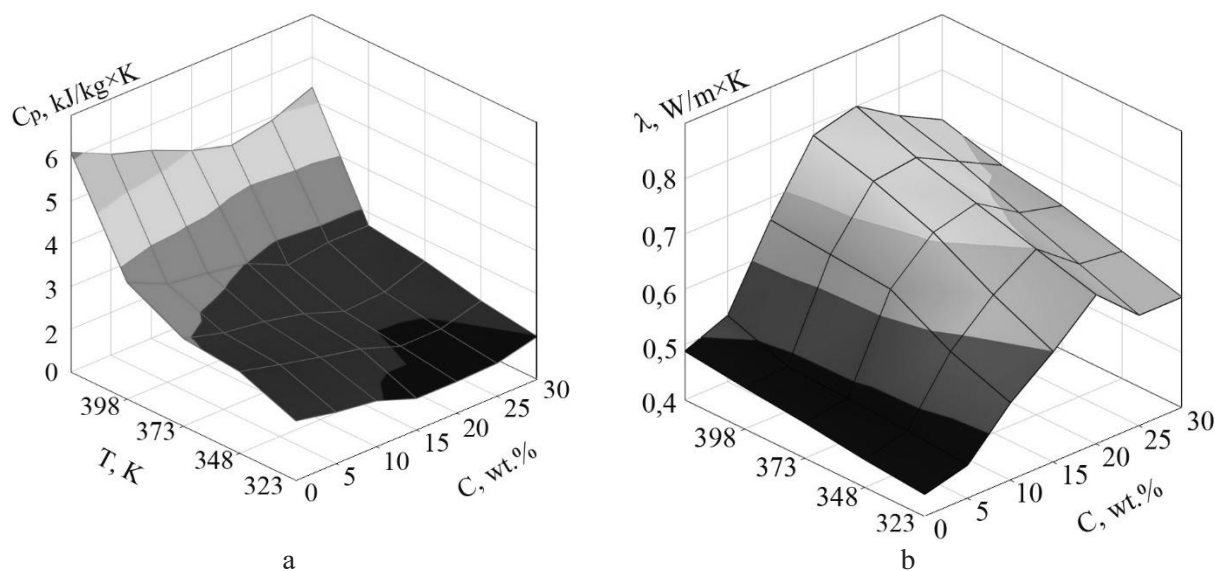


Fig. 1. Dependence of specific heat capacity ( $C_p$ , kJ/kg K, a) and thermal conductivity ( $\lambda$ , W/m K, b) of ultra-high-molecular-weight polyethylene and PCMs based on it on temperature ( $T$ , K) and alloy content ( $C$ , wt. %)

On the other hand, we can explain the improvement of these indicators by the ordering of the supramolecular structure of UHMWPE, due to the reduction of the amount of amorphous phase. It is known [14] that PCMs with a high content of amorphous phase are characterized by increased specific heat capacity and low thermal conductivity, while crystalline regions transfer thermal energy more

efficiently. As Fig. 2 shows, pure UHMWPE consists of a mixture of orthorhombic phase ( $a=0.7446$  nm,  $b=0.4980$  nm,  $c=0.2476$  nm), (planes (110), (200), (210)) and amorphous halo. Fig. 3 shows the diffractogram of a single-phase rapidly quenched Al-Cr alloy with reduced periods of the fcc lattice of a supersaturated solid solution based on Al.

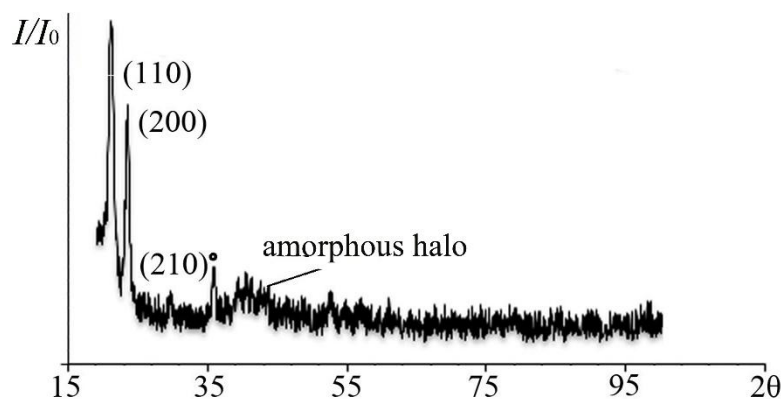


Fig. 2. Diffractogram of pure ultra-high-molecular-weight polyethylene

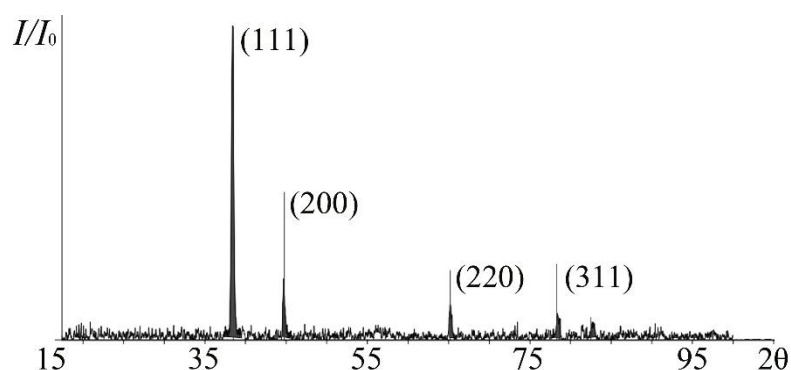


Fig. 3. Diffractogram of a single-phase binary alloy of the Al-Cr system

The obtained diffractogram of the Al-Cr alloy simultaneously recorded the formation of the predominant texture (111). It occurs during non-equilibrium crystallisation from the liquid state and intensive heat removal of the samples in the perpendicular direction to the heat-conducting substrate. So the ratio of the intensity of line (111) to line (200) is approximately 8.8, while during the equilibrium crystallisation of aluminium, this ratio does not exceed 2.5. The formed predominant texture (111), which corresponds to the largest reticular density of atoms parallel to the substrate along with microstresses, naturally additionally contributes to the growth of thermophysical and tribological properties [12] rapidly cooled Al-Cr samples.

The improvement of the thermophysical properties of UHMWPE also contributed to the slowing down of its thermal destruction processes, thereby increasing the overall thermal stability and wear resistance of the studied PCMs.

It should be noted that at a filler content of 25—30 wt. % binary alloy, a deterioration of the thermophysical properties of PCMs is observed. This can be explained by the fact that with an increase in the FL content, its agglomeration occurs, which leads to a violation of the homogeneity of the PCM structure and the formation of micropores. Such defects play the role of thermal barriers, reducing the efficiency of heat transfer.

### Conclusions

The combined effect of these components of metal-polymer composites contributes to the simultaneous improvement of the specified thermophysical properties. This naturally follows from the formation of thermally conductive chains between particles of the Al-Cr metal alloy. We established the effective ratio between the content of the FL and UHMWPE, which was previously revealed in the work for tribological properties under different operating conditions (under friction conditions without lubrication and influenced by abrasive particles) and hardness.

### References

- [1] Melnyk, L.I. & Svidersky, V.A. (2024). Polimernyi kompozytsiinyi material na osnovi perlitu [Polymer composite material based on perlite] *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*. 35 (4). P. 281–287 [in Ukrainian].
- [2] Kabat, O.S., Bannyk, N.G., & Voronyi, O.M. (2025). Polymer composite materials of special purpose for the aerospace and rocket industry. *Science and innovation*. 21 (1). P. 95–103.
- [3] Lebedev, V.V., Kryvobok, R.V., Cherkashyna, G.M., Blyznyuk O.V., Lisachuk G.V., & Voloshchuk V.V. (2022). Rozrobka ta oderzhannia polimernykh kompozytiv dlia pohlynannia elektromahnitnoho vyprominiuvannia [Development and production of polymer composites for absorption of electromagnetic radiation]. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*. 33 (5). P. 261–265 [in Ukrainian].
- [4] Kobets, A.S. [et al.]. (2022). *Application of polymer composites in the agricultural and industrial complex [Application of polymer composites in the agricultural and industrial complex]* Dnipro: Zhurfond, 356 p [in Ukrainian].
- [5] Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik., M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*. Vol.262. 113640.
- [6] Rybicka, J., Tiwari, A., Alvarez del Campo P., & Howarth J. (2015). Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping. *Journal of Cleaner Production*. 91. P.251–261.
- [7] Tomin, S.V., Yeromenko, O.V., & Yeriomina, Ye.A. (2024). Influence of dispersed filler on the abrasive wear index of ultra-high molecular polyethylene. *Functional Materials*. 31 (2). P. 210–214.
- [8] Tomina A.-M.V. Cheshenko Ye.D., & Dormed A.V. (2024). Influence of dispersed alloys on the tribological properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene. International scientific conference «MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, [Riga], November 28–29, 2024. Latvia: «Baltija Publishing». P. 196–198.
- [9] Guo, B., Lijuan, Wang, Yin, P., Bengang, Li, & Panxin, Li. (2017). Ultra-high-molecular-weight polyethylene fiber-reinforced thermoplastic corn starch composite. *Materials Science*. 33. P. 564–577.
- [10] Wang, L., Gao, S., Wang, J., Wang, W., Zhang, L., & Tian, M. (2018). Surface modification of UHMWPE fibers by ozone treatment and UV grafting for adhesion improvement. *The Journal of Adhesion*. 94. P.30–45.
- [11] Mudryi, S.I., Kulik Yu.O. & Yakymovych A.S. (2017). Renthenostrukturnyi analiz u materialoznavstvi [X-ray structural analysis in materials science]: teaching and methodical manual Lviv: I. Franko Lviv National University, 2017. 226 p [in Ukrainian].
- [12] Jones, H. (2005). Some effects of solidification kinetics in microstructure formation in Al-based alloys. *Materials Science and Engineering A*. 413-414. P.165–173.
- [13] Popil, O.I., Tomina, A.-M.V. & Mykyta K.A. (2025). Vplyv binarnoho splavu systemy Al-Cr na pokaznyk abrazyvnoho styranntia nadvysokomolekuliarnoho polietyleny [The influence of binary alloy of the Al-Cr system on the abrasive wear ratio of ultra-high-molecular-weight polyethylene]. Chemical Problems of Today (CPS-2025): collection of abstracts of the VIII International (XVIII Ukrainian) scientific conference of students, postgraduates and young

- scientists, [Vinnytsia], March 25–27, 2025 / Vasyl Stus Donetsk National University, ed. by O. M. Shendryk [et al.] P. 153 [in Ukrainian].
- [14] Sirenko, H.O., Sviderskyi, V.P. & Skladanyuk, M.B. (2020). *Fizychni metody doslidzhennia rechovyn: Ch.II. Teplofizychni metody ta vlastyvyosti polimernykh kompozytiv* [Physical methods of studying substances]: Part II. Thermophysical methods and properties of polymer composites: monographic textbook (special course of lectures. – 2nd ed. corrected., supplemented) ed. by H.O. Sirenko – Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. Publishing House 292 p [in Ukrainian].

## ВПЛИВ БІНАРНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-CR НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

### Реферат

В умовах стрімкого розвитку науково-технічного прогресу зростають вимоги до конструкційних і триботехнічних матеріалів: необхідні нові інноваційні, екологічно безпечні та ефективні розробки. До них належать полімерні композиційні матеріали, зокрема на основі термопластів, наповнені дисперсними наповнювачами. Такі матеріали знаходять широке застосування в сільськогосподарській, енергетичній і автомобільній промисловості завдяки високій стійкості до низьких та високих температур, вібрацій, корозії, дії вологи та інших агресивних чинників, стабільній роботі в абразивному середовищі, під впливом циклічних та втомних навантажень, а також здатності до безвідмовної експлуатації в трибологічних з'єднаннях в умовах тертя без змащення. Тому актуальним науково-практичним завданням для виготовлення деталей сучасної техніки є розробка та дослідження нових складів композитів на полімерній основі з високим комплексом функціональних властивостей, зокрема високою зносостійкістю та теплопровідністю.

У статті розглянуто вплив загартованого з рідкого стану бінарного сплаву системи Al-Cr на теплофізичні властивості надвисокомолекулярного поліетилену. Встановлено, що введення сплаву у кількості 5–30 мас. % призводить до зменшення питомої теплоємності та зростання теплопровідності орієнтовано на 25 %. Покращення зазначених показників зумовлено тим, що частки бінарного сплаву формують ефективні теплопровідні шляхи в об'ємі полімерного матеріалу, що сприяє зменшенню теплового опору на межі поділу «полімер-наповнювач». З іншого боку, зменшення питомої теплоємності та зростання теплопровідності також пов'язані зі зростанням ступеня кристалічності полімерних композитів порівняно з чистим надвисокомолекулярним поліетиленом. Виявлено, що ефективний вміст наповнювача в надвисокомолекулярному поліетилені складає 20 мас. %. Даний матеріал доцільно рекомендувати для виготовлення деталей конструкційного та триботехнічного призначення, які працюють в умовах інтенсивного тертя, де необхідні висока зносостійкість і теплопровідність.

### Література

1. Мельник Л.І., Свідерський В.А. Полімерний композиційний матеріал на основі перліту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35, № 4. С. 281–287.
2. Kabat O.S., Bannyk N.G., Voronyi O.M. Polymer composite materials of special purpose for the aerospace and rocket industry. *Sci. innov.*, 2025, Вип. 21(1). С. 95–103.
3. Лебедев В.В., Кривобок Р.В., Черкашина Г.М., Близнюк О.В., Лісачук Г.В., Волощук В.В. Розробка та одержання полімерних композитів для поглинання електромагнітного випромінювання. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т.33, №5. С. 261–265.
4. Застосування полімерних композитів в АПК / А.С. Кобець [та ін.]; – Дніпро: Журфонд, 2022. 356 с.
5. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharfi A. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*. 2021. Vol.262. 113640.

6. Rybicka J., Tiwari A., Alvarez del Campo P., Howarth J. Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping. *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol.91. P.251–261.
7. Tomin S.V., Yeromenko O.V., Yeriomina Ye.A. Influence of dispersed filler on the abrasive wear index of ultra-high molecular polyethylene. *Functional Materials*. 2024. Vol.31. No.2. P. 210–214
8. Tomina A.-M.V. Influence of dispersed alloys on the tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene / A.-M.V. Tomina, Ye.D. Cheshenko, A.V. Dormed // International scientific conference «MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings (November 28–29, 2024, Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia: «Baltija Publishing». 2024. Vol. 1. P. 196–198.
9. Guo B., Lijuan Wang, P. Yin, Bengang Li, Panxin Li Ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced thermoplastic corn starch composite. *Materials Science*. 2017. Vol. 33. P. 564–577.
10. Wang L., Gao S., Wang J., Wang W., Zhang L., Tian M. Surface modification of UHMWPE fibers by ozone treatment and UV grafting for adhesion improvement. *The Journal of Adhesion*. 2018. Vol. 94. P.30–45.
11. Мудрий С.І. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві: навч.-метод. посібник / С.І. Мудрий, Ю.О Кулік, А.С. Якимович. Львів: ЛНУ імені І.Франка. 2017. 226 с.
12. Jones H. Some effects of solidification kinetics in microstructure formation in Al-based alloys. *Mat .Sci. and Eng.A.*-413-414. 2005. P.165–173.
13. Попіль О.І. Вплив бінарного сплаву системи Al-Cr на показник абразивного стирання надвисокомолекулярного поліетилену / О.І. Попіль, А.-М.В. Томіна, К.А. Микита // Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2025): збірник тез доповідей VIII Міжнародної (XVIII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених, 25–27 березня 2025 року, м. Вінниця / Донецький національний університет імені Василя Стуса; редколегія: О. М. Шендрик (відп. ред.) [та ін.]. Вінниця, 2025. С. 153.
14. Сіренко Г.О., Свідерський В.П., Складанюк М.Б. Фізичні методи дослідження речовин: Ч.ІІ. Теплофізичні методи та властивості полімерних композитів: монографічний підручник (спеціальний курс лекцій. – 2-ге вид. випр., доп.) / за ред. Г.О. Сіренка – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2020, 292 с.

Надійшла до редколегії 05.12.2024