

СЕКЦІЯ № 2. НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ І МАТЕРІАЛИ В СУДНОВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ, ЯК СКЛАДОВА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ОБОРОНОЗДАТНОСТІ УКРАЇНИ

УДК 621.78

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНО-ТЕРМІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ТВЕРДІСТЬ ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІВ ПІСЛЯ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Дубовий О.М.

доктор технічних наук,

професор кафедри матеріалознавства і технології металів

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua

Карпеченко А. А.

кандидат технічних наук,

доцент кафедри вищої математики

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

anton.karpechenko@nuos.edu.ua

Бобров М. М.

кандидат технічних наук,

доцент кафедри матеріалознавства і технології металів

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

laborantmtm@gmail.com

Анотація. Показано, що актуальною задачею сучасного машинобудування є розробка технології об'ємного наноструктурування металевих виробів. Встановлено, що перспективним є спосіб передрекристиалізаційної термічної обробки. На прикладі технічно чистого заліза встановлено закономірності впливу ступеня деформації та температури термічної обробки на твердість. Показано, що оптимальна температура передрекристиалізаційної обробки складає 500° С, при цьому залежність носить екстремальний характер, а максимальна твердість досягається при витримці протягом 1.5...2 хв.

Ключові слова: передрекристиалізаційна термічна обробка, наноструктурування, полігонізація, субструктура, властивості.

Вступна частина. Експлуатаційні характеристики деталей машин в цілому, їх ресурс роботи визначаються переважно фізико-механічними властивостями здебільшого металів, сталей і сплавів, з яких вони виготовляються. Високі фізико-механічні властивості сталей досягаються наноструктуруванням. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є розробка методів отримання об'ємних наномасштабних металевих матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями. Досягається це переважно подрібненням структури (субструктури).

Подрібнення зеренної (субзеренної) структури до нанокристалічного (НК) стану здійснюють переважно найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Основним методом ІПД є рівноканальне кутове пресування (РККП) [1, с. 881], яке найбільш широко застосовується та має різновиди. Досить перспективним вважається формування НК стану у поверхневих шарах металевих матеріалів за рахунок деформування тертям [2, с. 13] та

ультразвукового ударного оброблення [3, с. 546]. Однак, об'ємне наноструктурування методами ПД застосовується у техніці для отримання виробів невеликого розміру (авіаційні кріплення, медичні імпланти, деталі приладів тощо). Наноструктурування деталей великого розміру методами ПД викликає значні технічні та технологічні труднощі і не є економічно доцільним. Розроблено спосіб передрекristалізаційної термічної обробки металів і сплавів [4, с. 210], який забезпечує підвищення твердості деформованих обтискуванням ($> 70\%$) металів (Ni, Fe) і сплавів (бронзи, сталі) на $25\ldots 40\%$; напилених покриттів - на $30\ldots 70\%$ та зниження теплопровідності на 30% .

Метою роботи є подальше експериментальне встановлення закономірностей впливу деформаційно-термічних факторів на рівень фізико-механічних властивостей деформованих металів після передрекristалізаційної термічної обробки.

Основна частина. З метою визначення оптимальної температури і часу витримки при передрекristалізаційній термічній обробці (що забезпечує найбільш високі показники властивостей), зразки технічно чистого заліза у відпаленому стані (твердість після відпалу становила $HV_5 = 1,25$ ГПа), деформували на 20, 40, 60 і 80% . Деформовані зразки піддавали передрекristалізаційній термічній обробці при температурах 400°C , 500°C , 600°C , з витримкою при кожній з температур від 0,5 до 5 хвилин (рис. 1).

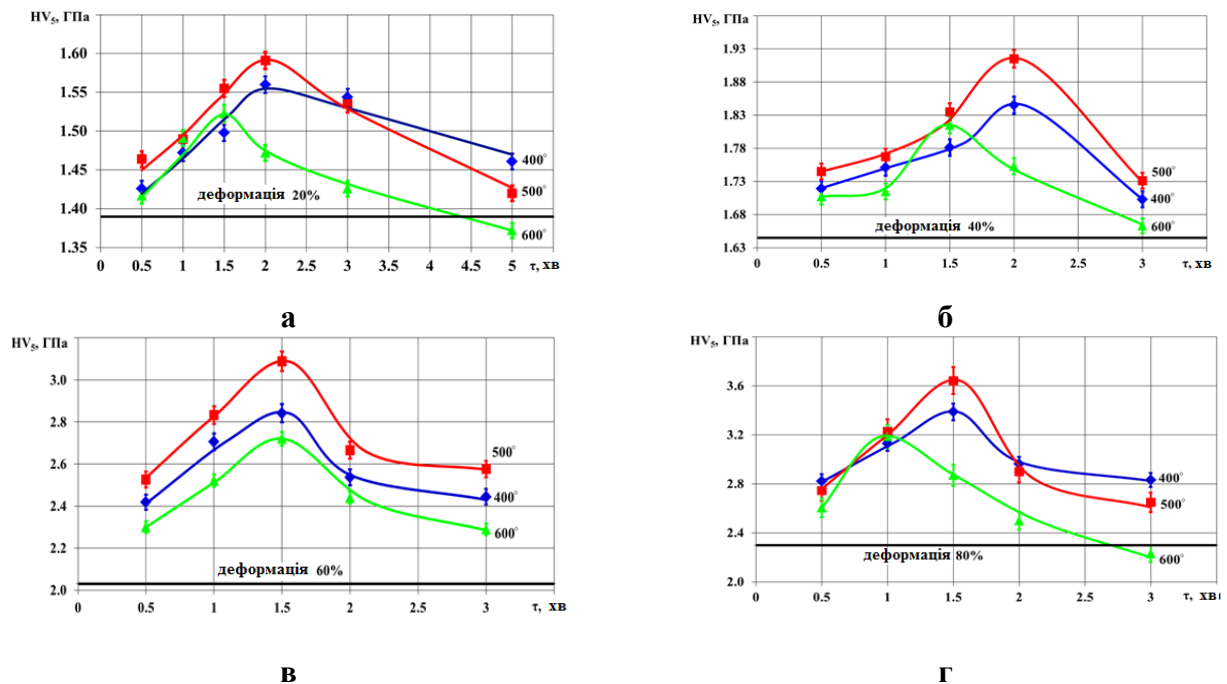


Рис. 1. Залежність твердості від часу витримки і температури передрекristалізаційної термічної обробки деформованого технічно чистого заліза: а - 20% ; б - 40% ; в - 60% ; г - 80%

Як видно на графіках, представлених на рис. 1, для пластично деформованого технічно чистого заліза в результаті передрекristалізаційної термічної обробки спостерігається підвищення твердості, яке носить екстремальний характер. При цьому максимальне значення твердості, отримане в результаті передрекristалізаційної термічної обробки, завжди вище значення твердості після пластичної деформації. Тому доцільно режим передрекristалізаційної термічної обробки, що забезпечує найбільший приріст твердості, називати оптимальним. Зі збільшенням ступеня деформації час витримки, при якому фіксується максимальна твердість, знижується. Пояснюється це тим, що зі збільшенням ступеня деформації ростуть щільність дислокацій і енергія, яка накопичується при деформації, отже зростає термодинамічний стимул полігонізації. Внесені дефекти збільшують вільний обсяг границь зерен і, як наслідок, зменшують енергію активації дифузії. Оскільки температура початку рекристалізації

пропорційна активації, то при збільшенні щільності внесених дефектів час процесу повинен знижуватися. Крім того, зі збільшенням ступеня деформації зростає концентрація вакансій, що також сприяє прискоренню процесу зародження і зростання центрів рекристалізації. Так як щільність дислокацій і, відповідно, накопичена при деформації енергія зі збільшенням ступеня деформації ростуть зі загасанням, то і час початку рекристалізації знижується при збільшенні ступеня деформації зі загасанням, досягаючи певних значень при заданій температурі.

Більш інформативні, стосовно впливу деформаційно-термічних факторів на твердість (HV_5) технічно чистого заліза, є побудовані на основі уточнених даних рис. 1 та додаткових досліджень діаграми (рис. 2). Ці діаграми можна назвати умовними діаграмами полігонізації, так як фактором впливу використано не розмір зерна (субзерна), а твердість (HV_5).

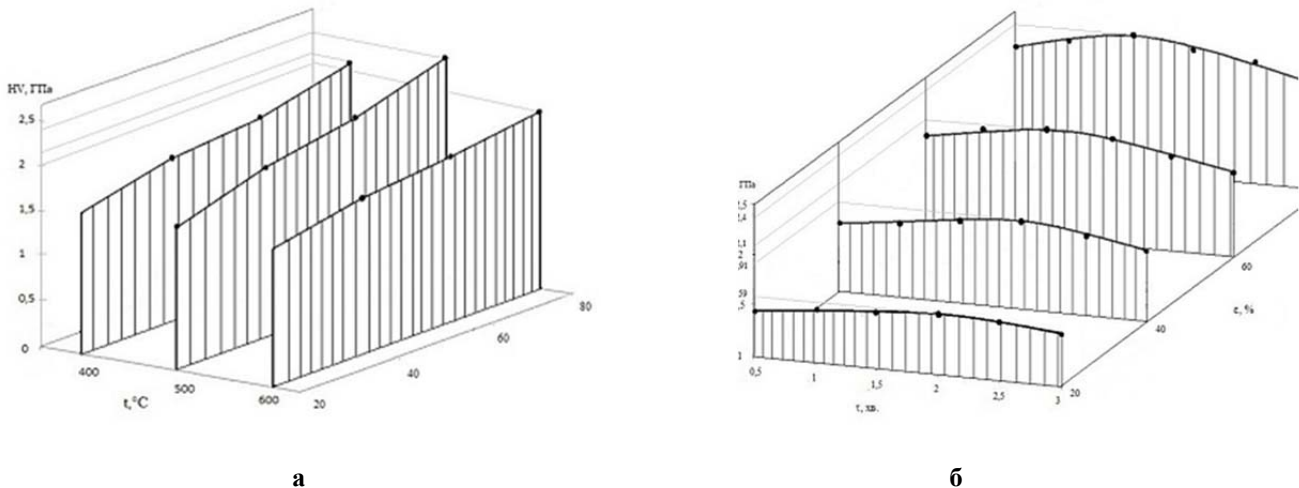


Рис. 2 Вплив деформаційно-термічних факторів на твердість технічно чистого заліза : а) залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і температури $^{\circ}\text{C}$; б) залежність твердості від ступеня деформації (ϵ ,%) і часу витримки при температурі 500°C

Дані рис. 2, також свідчать про те, що оптимальна температура передрекристалізаційної обробки складає 500°C , при цьому залежність носить екстремальний характер, а максимальна твердість досягається при витримці протягом 1.5...2 хв. (рис. 2 б). Зі збільшенням величини статичної деформації підвищується твердість, яка досягає максимального значення при деформації 80 %. Вплив більш високої статичної деформації не досліджувався через те, що при деформуванні близько 90 % деінде спостерігалися тріщини, і на практиці статичне деформування вище 80 % майже не застосовується.

Висновки. Проаналізовано основні методи підвищення фізико-механічних властивостей металів і сплавів, що полягають у подрібненні їх зеренної структури до нанокристалічного стану. Зроблено висновок щодо перспективи використання розробленої передрекристалізаційної термічної обробки. На основі експериментальних досліджень побудовано узагальнені діаграми полігонізації технічно чистого заліза, деформованого на різну величину. Встановлено, що оптимальна температура передрекристалізаційної обробки складає 500°C , при цьому залежність носить екстремальний характер, а максимальна твердість досягається при витримці протягом 1.5...2 хв. Зі збільшенням величини статичної деформації підвищується твердість, яка досягає максимального значення при деформації 80 %. При цьому максимальне значення твердості, отримане в результаті передрекристалізаційної термічної обробки, завжди вище значення твердості після пластичної деформації.

Література

[1] Valiev, R. Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R. Z. Valiev, T. G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2006. - Vol. 51. - P. 881-891.

[2] Юркова, О. І. Особливості формування нанокристалічної структури в α -залізі при деформації тертям / О. І. Юркова, Р. В. Карпов, Є. О. Клягін // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 1. – С. 12 – 16.

[3] Васильєв, М.О. Синтез деформаційних нанокомпозитів на поверхні алюмінійового сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення / М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак, М. В. Кіндрачук / *Металофізика та новітні технології*. – 2016. – №4. – с.545-563.

[4] Дубовий, О.М. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізико-механічні властивості металів, стопів і напорошених покриттів / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, О.О. Жданов, Т.О. Макруха, Ю.Є. Неделько / *Металофізика та новітні технології*. – 2017. – №2. – с.209-243.

Effect of deformation and thermal factors on the hardness of deformed metals after pre-recrystallization heat treatment

Dubovyi Oleksandr Mykolaiovych, Karpechenko Anton Anatoliiovych,
Bobrov Maksym Mykolaiovych, Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract. It is shown that the development of the technology of bulk nanostructuring of metal products is an urgent task of modern mechanical engineering. It was established that the method of pre-recrystallization heat treatment is promising. Using the example of technically pure iron, the influence of the deformation degree and heat treatment temperature on hardness was established. It is shown that the optimal temperature of the pre-recrystallization treatment is 500°C, while the dependence is of an extreme nature, and the maximum hardness is achieved after holding for 1.5...2 minutes.

Keywords: pre-recrystallization heat treatment, nanostructuring, polygonization, substructure, properties.

УДК 621.78

FORMATION OF ELECTROARC COMPOSITIONAL COATINGS FOR 65G STEEL - CR3C2 SYSTEM

Dubovyi O.M.

Doctor of Engineering,

Professor of the Department of Materials Science and Metal Technology

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Mykolaiv, Ukraine

oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua

Karpechenko E.A.

Majester's student at the Department of Materials Science and Metal Technology

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Mykolaiv, Ukraine

karpechenkoevgeniy@gmail.com

Filipishyna L.M.

Doctor of economic sciences, professor,

Pervomaysky Scientific Educational Institute of the Ukrainian National Academy of Sciences

Kondratieva A.A.

student Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Mykolaiv, Ukraine

kondratevaanna633@gmail.com

Oliinyk V.A.

student Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Mykolaiv, Ukraine

kondratevaanna633@gmail.com

Annotation. The most promising solution for strengthening and restoring worn surfaces of machine and mechanism components is the application of protective gas-thermal coatings, particularly those with cermet structures. In this study, for the first time, electroarc compositional cermet coatings of the 65G steel-Cr₃C₂ system were obtained using free-form reinforcement phase powder via a modernized EM-14M electroarc torch. To enhance the physical and mechanical properties of these coatings, the use of electro-impulse action at optimal amplitude-frequency parameters (amplitude of 5 kV, frequency of 6.5 kHz) is proposed, characterized by its simplicity of implementation and the use of cost-effective additional equipment. It is demonstrated that the use of electro-impulse action results in an increase in the adhesion strength of the coatings to the steel base from 28 MPa to 34 MPa (+21.5%) and an increase in the microhardness of the metal matrix from 2.7 GPa to 3.25 GPa (+20%).

Key words: Electric arc spraying, cermet coatings, electro-impulse action, hardness, porosity.

Introduction. In practice, there are various methods to address the problem of wear in components of different equipment, but the most advantageous and promising method is the application of protective coatings on working surfaces using gas-thermal spraying (GTS) techniques. Gas-thermal coatings with cermet structures represent the most widely used class of coatings for protecting surfaces of components from various types of wear [1]. Recently, they have received special attention due to their potential as an alternative to hard chrome coatings, addressing one of the contemporary environmental protection challenges [2-4]. The most widely used cermet systems are WC-Co and Cr₃C₂-NiCr [1, 4]. Leading global companies such as "Starck" (Germany), "Sulzer" (USA), and "Praxair" (USA) have developed compositions and a range of technologies for manufacturing powders of these materials, specialized in their properties for use in cold gas-dynamic, detonation, high-velocity oxy-fuel, and plasma spraying systems [5-8]. These materials are produced either as mechanical mixtures of carbide powders and matrix alloys or as conglomerate powders of cermet components, which have undergone prior processing steps like sintering and mechanical crushing of the mixture or conglomerate fusion.

Of particular interest are studies on the wear resistance of cermet coatings. For instance, in a study [9], the influence of parameters in high-velocity oxy-fuel spraying (spraying angle and distance) on the wear resistance of WC-17Co cermet coatings was investigated. Areas of carbide phase particle pull-out and corresponding wear grooves on the sample's surface were observed. This suggests the relatively low adhesive strength of coatings obtained from the mentioned powder. Thus, the drawbacks of coatings applied by these methods include their high cost associated with the use of expensive sintered or agglomerated powders and their mixtures, as well as the use of flammable and inert gases, and the requirement for expensive equipment for application, along with high demands on the qualifications of workers.

As for electroarc cermet coatings, they are obtained by spraying powder wires of different compositions [10-12]. The use of powder wires to obtain compositional coatings leads to increased porosity, negatively affecting their complex physical and mechanical properties and raising their cost.

To address these issues, the authors of studies [13, 14, 15] propose the use of a modernized torch and reinforcement phase powder in a free form for applying coatings of various compositions. This has resulted in the deposition of metal-polymer coatings [13], metal-ceramic, and metal-carbide compositional coatings [14]. However, the formed electroarc coatings are characterized by reduced adhesion strength to the base and cohesive strength, leading to the pull-out of reinforcement phase particles during operation in friction assemblies. To improve the physical and mechanical as well as operational properties of electroarc coatings, the use of electro-impulse influence at the spraying

distance is proposed [16], which provides additional fragmentation and acceleration of sprayed particles in a high-temperature heterophase jet.

The aim of this study is to investigate the influence of electro-impulse action during spraying on the formation of electroarc compositional cermet coatings and to determine their physical and mechanical properties.

Main Section. The object of this research comprises electroarc compositional cermet coatings obtained by spraying continuous steel wire of grade 65G and chromium carbide (Cr_3C_2) powder onto a substrate made of structural quality carbon steel 45. For the deposition of cermet electroarc coatings, the KDM-2 setup equipped with the EM-14M apparatus with a modernized nozzle cap for powder delivery into the high-temperature zone of the arc discharge was used [16]. The technological regime parameters were selected based on previous research on compositional cermet coatings [14] and included: current strength – 120 A, arc voltage – 30 V, compressed air pressure – 0.6 MPa, spraying distance – 100 mm.

Microstructure analysis revealed that the coating had a porosity of approximately 11.5% by volume. Chromium carbide particles of dark color were well-differentiated, and the interface between the coating and the substrate showed no inclusions or delamination. Chemical analysis of the phase was conducted at points using a scanning electron microscope ZEISS Gemini SEM 500. The results showed that the chemical composition of the mentioned phase consisted of 14.43% carbon and 85.57% chromium. As it is known, the molar mass of chromium carbide (Cr_3C_2) is 180 g/mol, with chromium accounting for 86.7% (mass) (156 g/mol) and carbon for 13.3% (mass) (24 g/mol). Thus, the obtained results correspond to the stoichiometry of this chemical compound and provide evidence to confidently identify the dark phase as chromium carbide.

The determination of the chromium carbide content in the coating was performed using a planimetric method based on the obtained microstructures. The choice of this method is explained by its effectiveness in metallographic practice for low content of the analyzed phase (around several percent) and its reliability in such cases compared to point or linear methods. The calculations established that the chromium carbide content in the coating was 15.4% by volume.

To apply electro-impulse action to the high-temperature two-phase jet, a source of high-voltage high-frequency pulses was used, connected directly to the spray gun. Spraying was carried out under the previously established optimal operating conditions of the pulse source during arc spraying: frequency of 6.5 kHz and voltage of 5 kV [16]. Comparative microstructure analysis showed that electro-impulse action at optimal amplitude-frequency parameters reduced the porosity of the electroarc compositional cermet coating of the 65G steel- Cr_3C_2 system from 11.5% to 7.7%. Additionally, there was no pull-out of carbide particles from the metal matrix during grinding and polishing of microsections, indicating increased cohesive strength between them and a more uniform distribution across the coating's cross-section. Furthermore, the structural components of the coating decreased, and the deformation of sprayed particles increased (lamella height decreased) from 80% to 85% due to increased particle velocity. According to the results of microhardness determination of the metal matrix, the use of electro-impulse action led to an increase in this characteristic from 2.7 GPa to 3.25 GPa (+20%).

One of the main methods for determining the adhesion strength of a coating to the base metal is the pin test method, which allows for quick testing immediately after coating application, and was therefore employed in this study. Analysis of the obtained results showed that the use of electro-impulse action increased this characteristic for the compositional electroarc cermet coating of the 65G- Cr_3C_2 system from 28 MPa to 34 MPa (+21.5%). This effect can be attributed to the increased particle velocity during spraying, resulting in an increased area of actual contact between the sprayed particles and the substrate and an increased number of adhesion sites, which in turn reduces the resulting load per unit area of the applied coating.

Conclusions. Using a modernized electroarc spray gun, samples of cermet compositional coatings of the 65G steel- Cr_3C_2 system were obtained. Analysis of microstructure images showed that

the coating had a porosity of approximately 11.5%, and chromium carbide particles of dark color were well-differentiated, with a content in the coating of 15.4% by volume. It was determined that electro-impulse action at optimal amplitude-frequency parameters provides the following benefits: reducing the coating's porosity from 11.5% to 7.7%; increasing the microhardness of the metal component from 2.7 GPa to 3.25 GPa (+20%); and increasing the adhesion strength from 28 MPa to 34 MPa (+21.5%).

Future research prospects lie in establishing new regularities and optimizing the process of applying these electroarc coatings. Additionally, it involves determining their operational properties, particularly wear resistance.

References

- [1] D. Toma, W. Brandt, G. Marginean "Wear and corrosion of thermo alloy sprayed cermet coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol.138, pp.149-158, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01141-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01141-5)
- [2] N. Espallargas, J. Berget, J.M. Guilemany, A.V. Benedetti, P.H. Suegama "Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance", *Surface and Coating Technology*, vol. 202, pp.1405-1417, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.048>.
- [3] L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. Bonora "Corrosion and wear behavior of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium", *Electrochimica Acta*, vol. 49, pp. 2803-2814, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.043>.
- [4] J.M. Guilemany, N. Espallargas, P.H. Suegama, A.V. Benedetti "Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings", *Corrosion Science*, vol. 48, pp. 2998-3013, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.016>.
- [5] A. Sai Jagadeeswar, S. Kumar, B. Venkataraman, P. Suresh Babu, A. Jyothirmayi "Effect of thermal energy on the deposition behavior, wear and corrosion resistance of cold sprayed Ni-WC cermet coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, 126138, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126138>.
- [6] V.N. Shukla, H. Trivedi, H. Kumar, A. Yadav "Surface Engineering Analysis of D-Gun Sprayed Cermet Coating in Aggressive Environment", *Material Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 10212-10215, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.350>.
- [7] E. Jonda, M. Szala, M. Sroka, L. Łatka, M. Walczak "Investigations of cavitation erosion and wear resistance of cermet coatings manufactured by HVOF spraying", *Applied Surface Science*, vol. 608, 155071, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155071>.
- [8] Q. Liu, Y. Wang, Y. Bai, Z. Li, G. Tan, M. Bao, X. Li, H. Zhan, Y. Sun, N. Chong, R. Wang, Y.S. Ma "Formation mechanism of gas phase in supersonic atmospheric plasma sprayed NiCr-Cr₃C₂ cermet coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. 397, 126052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126052>.
- [9] K. Vasileios, S. Kamnis, B. Allcock, S. Gu "Effects and Interplays of Spray Angle and Stand-off Distance on the Sliding Wear Behavior of HVOF WC-17Co Coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 28, pp. 517-534, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00831-x>.
- [10] C. Lima, R. Libardi, R. Camargo "Assessment of abrasive wear of nanostructured WC-Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray", *Journal of thermal spray technology*, vol.23, pp. 1097-1104, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.
- [11] B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student "Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures", *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 27-35, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>
- [12] P. Sheppard, H. Koiprasert "Effect of W dissolution in NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings on wear behaviors", *Surface and Coatings Technology*, vol. 317, pp. 194-200, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.008>.

[13] A. Karpechenko, M. Bobrov, Yu. Halynkin, Al. Labartkava, An Labartkava “Microstructure and Thermal Conductivity Analysis of Metal-Polymer Composite Coatings Deposited by Electric Arc Spraying”, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, vol. 16, pp. 38-43, 2022.

[14] O. Dubovoy, A. Karpechenko, M. Bobrov, et al. “Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.2, pp. 63–68, 2021. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>.

[15] O. Dubovyi, O. Chechel, M. Bobrov, Yu. Nedel'ko “Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.1 , pp. 82-87, 2017.

[16] О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.О. Мазуренко, «Пристрій для електродугового напilenня композиційних покриттів», *Патент України, МПК C23C 26/02, B05B 7/22*, № 111760, 10.06.2016.

УДК514.18

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ AUTOCAD ПРИ ГЕОМЕТРИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Бідніченко О.Г.,

кандидат технічних наук доцент

професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та інженерної графіки

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

helenbidnichenko@gmail.com

Дана доповідь присвячена висвітленню особливостей геометричного моделювання в системі *AutoCAD* при формуванні наочних зображень технічних об'єктів. Розглянуті можливості системи, способи формування моделей та методи їх редагування і візуалізації. Наведено приклади змодельованих технічних об'єктів методами поверхневого та твердотільного моделювання.

Ключові слова: геометричне моделювання, поверхневе та твердотільне моделювання, наочні зображення, технічні об'єкти.

Графічна система *AutoCAD* — це широко використовуване програмне забезпечення для автоматизованого проектування, яке відіграє вирішальну роль у зображенні багатьох об'єктів зокрема тривимірних тіл. Це потужний інструмент, який використовують професіонали в різних галузях промисловості, таких як машино- та кораблебудування, архітектура, інженерія, дизайн тощо. *AutoCAD* дозволяє користувачам створювати та візуалізувати змодельовані об'єкти, аналізувати результати моделювання, отримати точне представлення моделі у тривимірному вигляді, що робить графічну систему незамінним програмним забезпеченням для професіоналів.

Метою доповіді є аналіз методів геометричного моделювання наочних зображень технічного обладнання, що є складовим елементом енергетичних установок, в графічній системі *AutoCAD* та можливостей їх редагування і візуалізації.

Основна частина. Формування тривимірних об'єктів в системі *AutoCAD* дозволяє конструктору реалізувати проектні ідеї та вивчати змодельовані об'єкти у віртуальному середовищі перед їхньою фізичною реалізацією. Для проведення процесу моделювання в системі передбачено поверхневе (граничне) та твердотільне (конструктивне) моделювання.

Для створення *поверхневих моделей* система *AutoCAD* дає можливість моделювати полігональні та багатогранні сітки [1, с.5] та тонкі оболонки такими способами: поверхні