

Ю.Д. Філатов¹, В.І. Сідорко¹, А.Ю. Бояринцев², доктори технічних наук,
С.В. Ковальов¹, В.Г. Кулич¹, В.А. Ковальов³, О.Я. Юрчишин³, кандидати технічних наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: filatov@ism.kiev.ua

²Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки 60, 61072 м. Харків,
e-mail: boyarintsev@isma.kharkov.ua

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: urchyshynoks@ukr.net

ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування полімерних оптичних матеріалів. На основі аналізу механізму полірування неметалевих матеріалів показано, що видалення оброблюваного матеріалу і формування шорсткості поверхні є наслідком видалення з неї наночастинок шламу, яке відбувається в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею в резонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притиру. Система «оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притиру» представлена як квантовий генератор наночастинок, потужність генерації яких залежить від добротності резонатора і визначає показники полірування. В результаті досліджень встановлено, що під час полірування оптичних поверхонь деталей з полістиролу, поліметилметакрилату та аллідігліколькарбонату за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків продуктивність полірування експоненційно зменшується за підвищення частотного показника ефективності FRET та лінійно зростає за підвищення часового показника ефективності FRET. Показано, що шорсткість полірованих поверхонь погіршується за зменшення частотного показника. За зменшення часового показника ефективності FRET шорсткість оброблених поверхонь поліщується. Встановлено, що продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів нелінійно збільшується, а шорсткість полірованих поверхонь погіршується за підвищення добротності резонатора. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці процесів хіміко-механічного полірування неметалевих матеріалів.

Ключові слова: полірування, дисперсна система, наночастинок, швидкість зняття матеріалу, шорсткість.

Вступ

На теперішній час полірування оптичних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів, в тому числі полімерних, які використовуються для виготовлення сцинтиляторів з полістиролу (ПС), контактних та інтраокулярних лінз з поліметилметакрилату (ПММА), лінз для окулярів з аллідігліколькарбонату (CR-39), здійснюється за допомогою полірувальних дисперсійних систем з неабразивних мікро- та нанопорошків [1–3]. Продуктивність полірування та шорсткість оптичних поверхонь залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної системи [4–6]. Незадовільна якість полірованих поверхонь оптичних деталей з полімерних оптичних матеріалів пов'язана з недосконалістю технології їх механічної обробки та відсутністю полірувальних дисперсійних

систем, які б забезпечували високі продуктивність та якість обробки полірованих поверхонь. Саме тому дослідження впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість оброблених поверхонь під час полірування полімерних оптичних матеріалів є актуальним.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування полімерних оптичних матеріалів.

Методика дослідження

Дослідження закономірностей зняття оброблюваного матеріалу та формування нанопрофілю полірованої поверхні здійснювалось при поліруванні плоских поверхонь деталей з оптичних полімерних матеріалів діаметром 60 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притиру з пінополіуретану діаметром 100 мм при зусиллі притискання деталі до притиру 50 Н, середній температурі в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру $T = 298$ К. Оброблювались полімерні матеріали: полістирол (ПС) (діелектрична проникність $\epsilon_1=2,5$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1=0,15$ Вт/(м·К)), поліметилметакрилат (ПММА) ($\epsilon_1=3,9$, $\lambda_1=0,19$ Вт/(м·К)), поліалілдігліколькарбонат (CR-39) ($\epsilon_1=10,0$, $\lambda_1=0,20$ Вт/(м·К)). Полірування здійснювалось за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (ДС1) ($\epsilon_2=6,1$) та водяної суспензії двооксиду церію (ДС2) ($\epsilon_2=21,2$). Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку дисперсної системи ДС1, визначені за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр *Nicolet 6700*), складала (см^{-1}): 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1085, а дисперсної системи ДС2 – 465, 521, 848. Досліджувані полімерні оптичні матеріали характеризувались частотами власних коливань молекулярних фрагментів, які визначались за відповідними ІЧ-спектрами: ПС – 537, 696, 753, 905, 1027 (см^{-1}), ПММА – 481, 750, 840, 960, 1065 (см^{-1}), CR-39 – 495, 621, 792, 839 (см^{-1}). Підготовка плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювалась за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування. Розміри частинок полірувального порошку визначались за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу *AZtec*. Зняття оброблюваного матеріалу визначалось ваговим методом за допомогою аналітичних терезів. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа «*Micron-alpha*».

Механізм утворення частинок шламу під час полірування

Згідно з сучасними уявленнями про механізм утворення нанорельєфу обробленої поверхні під час полірування неметалевих матеріалів видалення оброблюваного матеріалу і формування шорсткості поверхні є наслідком видалення з неї частинок шламу, яке відбувається при взаємодії оброблюваної поверхні та частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи. Видалення оброблюваного матеріалу у вигляді наночастинок шламу відбувається в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (*FRET*) [7, 8] між частинками дисперсної фази та оброблюваною поверхнею в резонаторі, що утворюється двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притиру, між якими розташована дисперсна система. Ефективність *FRET* на частотах ω_2^m і ω_1^m (ω_2^m , ω_1^m – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні) залежить від енергії частинок шламу ΔE_m , коефіцієнту ефективності передачі енергії ψ та часу життя кластерів оброблюваної поверхні τ_m і частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані, та характеризується частотним $K_v = \frac{\omega_2^m \omega_1^p}{\omega_1^m \omega_2^p}$ і

часовим $K_{\tau} = \frac{\tau_p}{\tau_m}$ показниками. При цьому система «оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притиру» являє собою квантовий генератор наночастинок, потужність генерації якого залежить від розмірів і добротності резонатора, яка визначається як $q_m = \omega_1^m / (\omega_2^m - \omega_1^m)$.

Швидкість зняття оброблюваного матеріалу Q визначається відповідно до формули

$$Q = q_m \lambda_1 V \frac{L_t T}{\Delta E_m \psi} \frac{\tau_m \tau_p}{t_c}, \quad (1)$$

де λ_1 – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу; V – об’єм частинок шламу; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; $t_c = d/u$ – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею, d – розмір частинок полірувального порошку; u – швидкість відносного переміщення деталі та притиру.

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою та показники полірування полімерних оптичних матеріалів наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою при поліруванні полімерних оптичних матеріалів

Параметри взаємодії поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
	Полірувальна дисперсна система					
	ДС1			ДС2		
Частота ω_1^m , $10^{13} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	13,12 (696)	14,14 (750)	14,93 (792)	14,19 (753)	15,83 (840)	14,93 (792)
Частота ω_2^m , $10^{13} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	13,82 (733)	14,65 (777)	16,02 (850)	15,98 (848)	15,98 (848)	15,98 (848)
Частота ω_1^p , $10^{13} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	14,19 (753)	14,14 (750)	11,71 (621)	17,06 (905)	9,067 (481)	9,331 (495)
Частота ω_2^p , $10^{13} \text{ c}^{-1} (\text{cm}^{-1})$	13,82 (733)	13,82 (733)	11,25 (597)	8,765 (465)	8,765 (465)	8,765 (465)
Енергія частинок шламу ΔE_m , еВ	9,3	22,4	4,1	1,1	5,3	4,6
Час життя τ_m і τ_p , мкс	1,50	1,90	0,65	0,15	0,15	0,43
	0,33	0,49	0,10	0,07	0,64	0,50
Коефіцієнт ефективності ψ	0,95	0,97	0,93	0,89	0,99	0,93
Показник K_v	1,08	1,06	1,12	1,20	1,04	1,14
Показник K_{τ}	0,22	0,26	0,15	0,47	4,41	1,14
Добротність резонатора q_m	18,7	27,7	13,7	7,9	105,5	14,2

Таблиця 2. Показники полірування полімерних оптичних матеріалів

Оброблюваний матеріал	ПС	ПММА	CR-39	ПС	ПММА	CR-39
Дисперсна система	ДС1			ДС2		
Продуктивність полірування: Q , 10^{-13} м ³ /с	37,8	143,0	4,9	0,3	362,3	7,7
Експеримент: 10^{-13} м ³ /с	39,3	155,0	5,0	–	363,0	7,2
мкм/год	5,0	19,0	0,6	–	46,0	1,0
Параметри шорсткості						
Ra , нм	8,9	12,0	7,3	5,2	29,1	7,6
Rq , нм	9,6	12,8	7,7	5,5	31,3	7,9
$Rmax$, нм	17,1	20,3	13,0	9,6	51,1	13,1

В результаті досліджень встановлено, що під час полірування оптичних поверхонь деталей з полістиролу (ПС), поліметилметакрилату (ПММА) та аллідігліколькарбонату (CR-39) за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 енергія частинок шламу ΔE_m зменшується при зменшенні спектрального розділення $(\omega_2^m - \omega_1^m)$ між частинками дисперсної фази і оброблюваним матеріалом.

Показано, що залежність продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від частотного показника K_v є експоненційно спадаючою функцією, яку можна апроксимувати як $Q = Q_0 \exp[-\alpha(K_v - 1)]$ (де $\alpha = \begin{cases} 60,1 \\ 45,7 \end{cases}$, $Q_0 = \begin{cases} 5,6 \cdot 10^{-10} \\ 3,1 \cdot 10^{-10} \end{cases}$ м³/с – коефіцієнти, які визначено за методом найменших квадратів, похибка апроксимації менша 1 %).

Швидкість зняття оброблюваного матеріалу Q_0 за умови абсолютного резонансу, коли $K_v \rightarrow 1$, під час полірування оптичних поверхонь полімерних матеріалів за допомогою дисперсної системи ДС1 майже вдвічі більша, ніж при використанні дисперсної системи ДС2. Разом з тим встановлено, що продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем ДС1 і ДС2 за підвищення показника K_t нелінійно зростає. Залежності продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів від узагальнених показників ефективності передачі енергії K_v і K_t показують, що саме співвідношення частот коливань молекулярних фрагментів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні і час життя кластерів частинок полірувального порошку та оброблюваної поверхні у збудженому стані визначають ефективність ферстерівського резонансного перенесення енергії, і відповідно, процесу видалення оброблюваного матеріалу.

При дослідженні формування нанорельєфу оброблених поверхонь показано, що шорсткість полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів погіршується за зменшення частотного показника K_v . Залежність $Ra = f(K_v)$ в напівлогарифмічному масштабі показує, що за збільшення спектрального розділення між частинками дисперсної фази полірувальної дисперсної системи і оброблюваним матеріалом параметр шорсткості Ra оброблюваної поверхні зменшується відповідно до експоненціальної функції, яка має вигляд

$$Ra = Ra_0 \exp[-\alpha_2(K_v - 1)] \text{ (де } \alpha_2 = \begin{cases} 8,2 \\ 11,1 \end{cases}, Ra_0 = \begin{cases} 18,5 \\ 43,9 \end{cases} \text{ нм – коефіцієнти, які визначено}$$

за методом найменших квадратів, похибка апроксимації 1 %). Параметр шорсткості Ra_0 за умови резонансу, коли $K_v \rightarrow 1$, під час полірування оптичних поверхонь полімерних матеріалів

за допомогою дисперсної системи ДС2 більш ніж удвічі більший, ніж при використанні дисперсної системи ДС1. Слід зауважити, що ця залежність знаходиться у повній відповідності до залежності продуктивності полірування від частотного показника K_v , що є природним, оскільки зняття оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю оброблюваної поверхні відбуваються одночасно в процесі полірування.

Залежності параметрів шорсткості Ra , Rq , R_{max} полірованих поверхонь деталей з полімерних оптичних матеріалів від часового показника K_t показують, що вони лінійно зростають за підвищення K_t у відповідності до формули

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ R_{max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} K_t \quad \left(\alpha_3 = \begin{pmatrix} 44,1 \\ 47,2 \\ 79,6 \end{pmatrix} \text{ нм}, \right.$$

$$\left. \alpha_4 = \begin{pmatrix} 6,4 \\ 6,9 \\ 11,2 \end{pmatrix} \text{ нм} \right) \text{ – коефіцієнти, визначені методом найменших квадратів, характерні для}$$

дисперсних систем ДС1 і ДС2; похибки апроксимації 3–6% і 8–10% відповідно).

Крім того, встановлено, що продуктивність полірування полімерних оптичних матеріалів нелінійно збільшується, а шорсткість полірованих поверхонь погіршується за підвищення добротності резонатора. Залежності параметрів шорсткості Ra , Rq , R_{max} полірованих поверхонь від добротності резонатора q_m можна апроксимувати лінійно зростаючими функціями

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ R_{max} \end{pmatrix} = \alpha_5 q_m + \beta_5 \quad \left(\text{де } \alpha_5 = \begin{pmatrix} 23,8 \\ 25,8 \\ 41,4 \end{pmatrix} \text{ нм}, \beta_5 = \begin{pmatrix} 4,0 \\ 4,1 \\ 7,4 \end{pmatrix} \text{ нм} \right) \text{ – коефіцієнти,}$$

визначені методом найменших квадратів, похибка апроксимації 5–6%.

Експериментальна перевірка отриманих результатів, яка здійснювалась за результатами вимірювань величини зняття оброблюваного матеріалу, показала, що результати теоретичного розрахунку продуктивності полірування полімерних оптичних матеріалів збігаються з результатами експериментів; їх відхилення складає від 1 до 8 %.

Висновки

В результаті дослідження механізму полірування полімерних оптичних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- та наночастинок полірувальних порошків встановлено, що продуктивність полірування і параметри шорсткості оброблених поверхонь збільшуються за зменшення частотного показника K_v і збільшення часового показника K_t та добротності резонатора, який утворюється поверхнями оброблюваної деталі і притиру під час полірування.

**Yu.D. Filatov, V.I. Sidorko¹, A.Y. Boyarintsev², S.V. Kovalev, V.G. Kulich¹,
V.A. Kovalev, O.Ya. Yurchyshyn³**

¹*V.N. Bakul Institut for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

²*Institute for Scintillation Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

³*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Ukraine*

POLISHING OF OPTICAL SURFACES OF PARTS MADE OF POLYMERIC MATERIALS

The purpose of this study is to study the patterns of influence of physicochemical properties of the processed material and the dispersed system on the polishing performance of polymer optical materials. Based on the analysis of the polishing mechanism of non-metallic materials, it is shown that material removal and

surface roughness formation is a consequence of sludge nanoparticle removal resulting from Förster resonant energy transfer (FRET) between dispersed phase particles and treated surface in resonator processed material and grinding. The system "treated surface – dispersed system – grinding surface" is presented as a quantum generator of nanoparticles, the generation power of which depends on the quality factor of the resonator and determines the polishing properties. Studies have shown that when polishing the optical surfaces of polystyrene, polymethylmethacrylate and allyldiglycolcarbonate parts using dispersed micro- and nanopowder systems, polishing productivity decreases exponentially with frequency indicator of FRET efficiency and increases linearly with increasing increase of time indicator of FRET. It is shown that the roughness of polished surfaces deteriorates with frequency indicator. By reducing the time indicator efficiency of FRET, the roughness of the treated surfaces improves. It is established that the polishing productivity of polymer optical materials increases nonlinearly, and the roughness of polished surfaces deteriorates with increasing the quality factor of the resonator. The results of the study should be used in the development of chemical-mechanical polishing of non-metallic materials.

Key words: polishing, dispersed system, nanoparticles, material removal rate, roughness.

Література

1. Filatov Yu. D. Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review // *J. Superhard Mater.* – 2020. – 42, N 1. – P. 30–48.
2. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. – К.: Наук. думка, 2017. – 248 с.
3. Filatov Yu. D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining // Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2019. – P. 129–165.
4. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics // *J. Superhard Mater.* – 2021. – 43, N 1. – P. 65–73.
5. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A., Effect of the Processed Material Structure on the Polishing Quality of Optical Surfaces // *J. Superhard Materials.* – 2021. – Vol. 43, N 6. – P. 435–443.
6. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Garachenko V.V., Kovalev V.A., Effect of the Spectroscopic Parameters of the Processed Material and Polishing Powder on the Parameters of Polishing // *J. Superhard Materials.* – 2022. – Vol. 44, N 1. – P. 37–45.
7. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K., Vaskan I., Rakovich Yu., Nabiev I. Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity // *Chem. Sci.* – 2021. – Vol. 12. – P. 12794–12805.
8. Nabiev I., Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019* // *J. Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 2058 (012001). – P. 1–7.

Надійшла 03.06.22

References

1. Filatov, Yu.D. (2020). Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.*, 42, 1, 30–48.

2. Filatov, Iu.D., Sidorko, V.I., Filatov, O.Iu., et al., *Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]*. Kiyv: Naukova dumka [in Ukrainian].
3. Filatov Yu.D. (2019). Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining. *Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 129–165.
4. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V., et al. (2021). Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics. *J. Superhard Mater.*, 43, 1, 65–73.
5. Al-Kadhemy, M.F.H., Rasheed, Z.S., & Salim, S.R. (2016). Fourier transform infrared spectroscopy for irradiation coumarin doped polystyrene polymer films by alpha ray. *J. Radiation Research and Appl. Sciences.*, 9, 3, 321–331.
6. Babitha, K.K., Sreedevi, A., Priyanka, K.P., et al. (2015). Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian Journal of Pure & Applied Physics.*, 53, 596–603.
7. Suratwala, T.I. (2018) *Materials Science and Technology of Optical Fabrication*. USA, Hoboken: Wiley.
8. Jones, G.A., & Bradshaw, D.S. (2019). Resonance Energy Transfer: From Fundamental Theory to Recept Applications. *Front. Phys.*, 7, 100, 1–19.
9. Singldinger, A., Gramlich, M., Gruber, et al. (2020). Nonradiative Energy Transfer between Thickness-Controlled Halide Perovskite Nanoplatelets. *ACS Energy Lett.*, 5, 1380–1385.

УДК 621.002.3; 678.029.46:544.733;
678:66.08/.09

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-337-345

Є. О. Пащенко, д-р техн. наук; **Д. О. Савченко**, **С. А. Кухаренко**, кандидати технічних наук; **В. М. Бичихін**, **С. В. Скороход**; **С. В. Рябченко**, канд. техн. наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 2, вул. Автозаводська, 04074, м. Київ, Україна, e-mail: lab6_1@ukr.net

ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІЧНИХ СУБСТРАТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОЇ АДГЕЗІЇ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПОКРИТТІВ

Визначений найбільш ефективний комплекс підготовки поверхні металічних субстратів з легованих сталей, що забезпечує максимальну довговічність адгезійного контакту на границі розділу субстрат-полімерне покриття. Він передбачає хімічне прищеплення функціональних груп, що забезпечують змочування поверхонь субстратів розчинами чи розплавами олігомерних зв'язуючих та хімічну взаємодію з компонентами покриттів. Прищеплення здійснили шляхом обробки попередньо підготовлених металічних поверхонь розчинами аміносиланів.

Ключові слова: модифікування (функціоналізації) поверхні, нікелеві підкладки, механізм самодовільного прищеплення солей діазонію, адгезійний контакт на границі розділу субстрат-полімерне покриття