

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО ПРИТИРАННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ НА ЇХ ШОРСТКІСТЬ

В. С. ТРУШ^{1,2}, В. М. КОРЕНДІЙ², О. Ю. КАЧУР², В. М. ЗАХАРОВ²,
К. В. ТРУШ³, Т. М. КРАВЧИШИН¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького

Розглянуто конструктивні і функціональні особливості вібраційної викінчувальної машини з електромагнетним приводом. Досліджено вплив амплітуди і частоти вібраційного збурення, а також зернистості паст і тривалості притирання, на шорсткість плоских поверхонь деталей (фланців), виготовлених зі Сталі 20. Встановлено, що шорсткість оброблюваних поверхонь обернено пропорційно залежить від амплітуди й частоти коливань та тривалості оброблення. При цьому інтенсивність притирання нелінійно знижується зі зростанням часу оброблення, тоді як збільшення амплітуди і частоти вібраційного збурення її підвищують практично за лінійною залежністю. Зменшення шорсткості та отримання вищих класів чистоти оброблюваної поверхні забезпечено застосуванням притиральних паст меншої зернистості. Конструкція вібраційної викінчувальної машини, яку використовували для притирання плоских поверхонь деталей (фланців), виготовлених зі Сталі 20, дає можливість досягати мінімальної шорсткості в межах 0,1...0,2 μm .

Ключові слова: вібраційне збурення, вібраційна викінчувальна машина, тривалість оброблення, інтенсивність притирання, шорсткість поверхні, клас чистоти.

The design and operational characteristics of a vibratory finishing machine with an electromagnetic drive is considered. The influence of the amplitude and frequency of the vibration excitation, as well as the grain size of the paste and the duration of the lapping process, on the roughness of flat surfaces of parts (flanges) made of Steel 20 was studied. The roughness of the machined surfaces inversely depends on the amplitude and frequency of oscillations and the time of the machining process. At the same time, the intensity of lapping decreases nonlinearly with increasing machining time, while an increase in the amplitude and frequency of the vibration excitation contributes to the intensification of the lapping process in an almost linear manner. Reducing the roughness and obtaining higher finish classes of the machined surface is ensured by using lapping pastes of smaller grain sizes. In general, the design of the vibratory finishing machine discussed in this article, used for lapping flat surfaces of parts (flanges) made of Steel 20, allows achieving a minimum roughness within 0.1...0.2 μm .

Keywords: vibration excitation, vibratory finishing machine, machining time, lapping intensity, surface roughness, surface finish class.

Вступ. Вібраційні технології для оброблення поверхонь деталей сприяють ефективному усуненню мікронерівностей та поліпшують шорсткість поверхонь. Вони також забезпечують рівномірне розподілення матеріалу, що підвищує якість обробки деталей [1–8]. На сьогодні одним із найпоширеніших методів фінішної обробки плоских поверхонь є притирання, яке забезпечує досягнення

високої точності геометричних параметрів поверхні внаслідок контрольованого видалення мікроскопічних шарів матеріалу за допомогою абразивної суспензії, яку наносять на робочу поверхню притира [9–12]. Притири, зазвичай, виготовляють зі спеціальних матеріалів таких, як чавун, мідь або бронза, які добре утримують абразивний матеріал на своїй поверхні [13], а абразивна суспензія забезпечує рівномірне розподілення частинок абразиву [14]. Притирають круговим або поступальним рухом деталі стосовно притира [15]. Для обробки плоских поверхонь сталевих деталей найширше використовують верстати планетарного типу. Такий рух дає змогу рівномірно обробляти поверхню деталі, уникаючи концентрації зношування в одному місці [16]. У сучасних планетарних верстатах можна регулювати низку параметрів обробки, зокрема швидкість обертання центральної плити і притиральних столів, силу притиску деталей до притира, тип та зернистість абразивного матеріалу тощо [17, 18]. Однак планетарні притиральні верстати мають низку недоліків, зокрема складність та вартість конструкції з багатьма рухомими частинами [19], які потребують регулярного обслуговування. Для досягнення оптимальної якості обробки необхідно точно налаштовувати параметри верстата, зокрема швидкість обертання окремих рухомих ланок [20, 21].

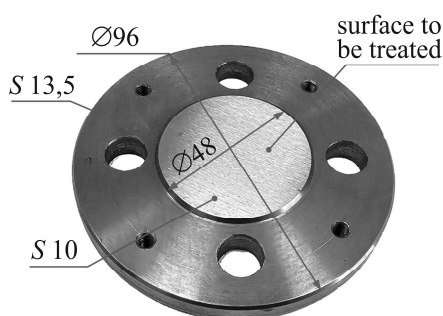
На сьогодні, хоча і розроблено низку конструкцій вібраційних притиральних машин із коловими траєкторіями руху притира стосовно оброблюваної поверхні [22–24], однак питання технологічного характеру, зокрема щодо шорсткості й площинності оброблених поверхонь та чистоти фінішної обробки, практично не розглянуті. Відомо, що шорсткість поверхні впливає на коефіцієнт тертя [25].

Мета роботи – встановити вплив амплітуди й частоти коливань робочого органу (притира), а також зернистості притиральної пасти і тривалості оброблення, на шорсткість плоских поверхонь сталевих деталей на прикладі фланців, виготовлених зі Сталі 20.

Матеріали та методика. Для оброблення використовували експериментальний зразок вібраційної притиральної машини [24]. Експериментальні результати аналізували та числово інтегрували в програмному забезпеченні MathCad. Як дослідні зразки використали гідравлічні фланці (рис. 1), виготовлені зі Сталі 20. Нижню поверхню фланця фіксували на підвісній платформі притиральної машини, а верхню виступаючу плоску поверхню обробляли коловими коливаннями верхнього притира. Основні параметри процесу подані в табл. 1.

Рис. 1. Загальний вигляд оброблюваної деталі (S – товщина).

Fig. 1. General design of the machined part (S – thickness).



Зважаючи на те, що досліджувані поверхні деталей попередньо піддавали плоскому шліфуванню, то їх шорсткість у поздовжньому і поперечному напрямках (стосовно напрямку руху шліфувального круга) є початково різною. Вимірювали шорсткість поверхонь профілометром моделі 176021 у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Таблиця 1. Основні параметри притирання

Параметри	Характеристика
Матеріал верхнього притира	Текстоліт ТК-5
Питома сила притискання притира, kPa	8,5...9
Частота віброзбурень, Hz	3; 6; 9; 12; 15
Амплітуда коливань притира, mm	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5
Тип і зернистість притиральної пасти	ГОІ № 1 (2,5...3 μm), ГОІ № 2 (5...8 μm), ГОІ № 3 (10...14 μm), ГОІ № 4 (17...20 μm)
Тривалість оброблення, min	10; 20; 30; 40; 50

Результати та їх обговорення. Після плоского шліфування шорсткість досліджуваних поверхонь деталей вимірювали в поздовжньому й поперечному напрямках для встановлення вихідних даних для подальшого вивчення притирання. Відповідні результати для восьми досліджуваних зразків (А–Н) подані у табл. 2.

Таблиця 2. Вихідні параметри шорсткості досліджуваних поверхонь деталей, які попередньо піддавали плоскому шліфуванню

Деталь	Середнє арифметичне відхилення профілю Ra , μm	
	Поперек деталі	Вздовж деталі
А	1,51±0,07	0,6±0,04
В	1,6±0,05	0,58±0,04
С	1,55±0,04	0,52±0,04
Д	1,65±0,05	0,57±0,04
Е	1,54±0,04	0,6±0,03
F	1,56±0,05	0,59±0,04
G	1,57±0,05	0,58±0,03
Н	1,55±0,05	0,57±0,04

Вплив амплітуди коливань притира. На рис. 2 показано результати дослідження впливу амплітуди коливань притира на шорсткість оброблюваних поверхонь, яка становила від 0,5 до 2,5 mm за максимальної частоти збурення 15 Hz, мінімальної зернистості притиральної пасти ГОІ №1 2,5...3 μm та оброблення 50 min. Збільшення амплітуди коливань притира, тобто радіуса його колової траєкторії, зумовило зростання лінійних швидкостей точок притира та зерен притирального абразиву, і відповідно, інтенсифікацію видалення мікроскопічних шарів матеріалу з оброблюваних поверхонь [3, 10, 16]. З іншого боку, збільшення амплітуди коливань притира спричинятиме нелінійне зростання споживаної вібраційною машиною потужності [23, 24], що негативно впливатиме на її експлуатаційну ефективність.

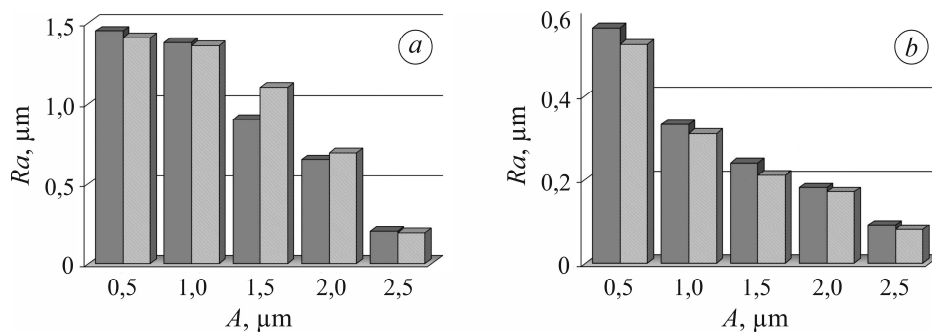


Рис. 2. Залежності шорсткості досліджуваних поверхонь деталей (деталь А – темні стовпчики, В – світлі) від амплітуди коливань притира за інших незмінних умов: *a* – вздовж притирання, *b* – поперек.

Fig. 2. Dependences of the roughness of the studied surfaces of parts (part A – dark columns, B – light) on the amplitude of the lap vibrations under other constant conditions: *a* – along the lapping surface, *b* – across the lapping surface.

Вплив частот збурення. Досліджували також за різних частот збурення в межах від 3 до 15 Hz за максимальної амплітуди коливань притира 2,5 mm, максимальної частоти збурення 15 Hz та мінімальної зернистості притиральної пасти ГОІ № 1 2,5...3 μm. Відповідні результати вимірювання шорсткості оброблюваних поверхонь подано на рис. 3. Також очевидним є те, що збільшення частоти коливань притира зумовлює зростання швидкості руху зерен притирального абразивного матеріалу стосовно оброблюваних поверхонь, що інтенсифікує згладжування мікронерівностей та зменшує шорсткість поверхонь [8, 9, 11]. Однак необхідно враховувати, що збільшення частоти коливань притира призводитиме до підвищення споживання електроенергії машини.

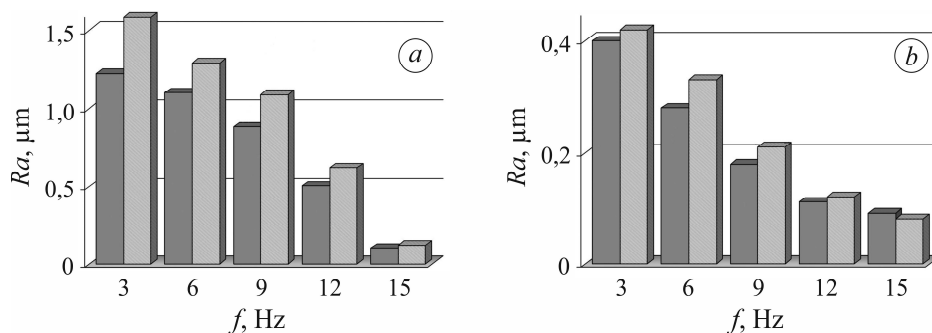


Рис. 3. Залежності шорсткості досліджуваних поверхонь деталей (деталь С – темні стовпчики, D – світлі) від частоти збурення коливань притира за інших незмінних умов: *a* – вздовж притирання, *b* – поперек.

Fig. 3. Dependences of the roughness of the studied surfaces of parts (part C – dark columns, D – light) on the excitation frequency of the lap vibrations under other constant conditions: *a* – along the lapping surface, *b* – across the lapping surface.

Вплив різних притиральних паст ГОІ. Третє дослідження (рис. 4) передбачало використання різних притиральних паст ГОІ № 1, № 2, № 3, № 4 із зернистостями 2,5...3 μm, 5...8 μm, 10...14 μm, 17...20 μm відповідно, за максимальної частоти збурення 15 Hz, амплітуди коливань 2,5 mm та тривалості оброблення 50 min. Зважаючи на те, що відповідні поверхні досліджуваних деталей уже були попередньо оброблені плоским шліфуванням, а їх максимальна шорсткість не

перевищувала 2 μm , то зменшення зернистості притиральної пасти закономірно дало змогу отримати чистішу поверхню за інших однакових умов [10, 16, 18].

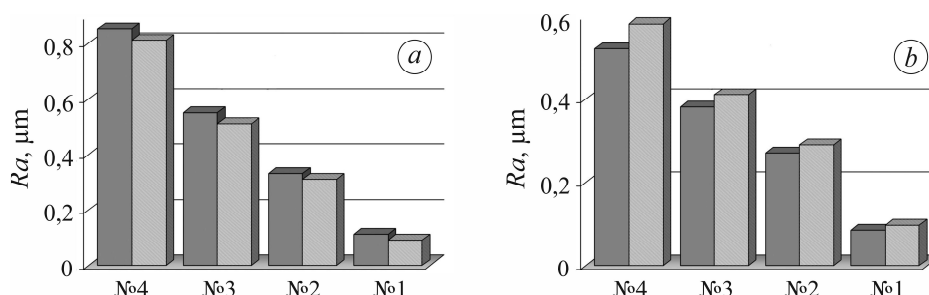


Рис. 4. Залежності шорсткості досліджуваних поверхонь деталей (деталь Е – темні стовпчики, F – світлі) за оброблення різними притиральними пастами ГОІ за інших незмінних умов: *a* – вздовж притирання, *b* – поперек.

Fig. 4. Dependences of the roughness of the studied surfaces of parts (part E – dark columns, F – light) after machining with the help of different GOI lapping pastes under other constant conditions: *a* – along the lapping surface, *b* – across the lapping surface.

Вплив тривалості оброблення. Результати експериментальних досліджень впливу тривалості оброблення, яку змінювали в діапазоні 10...50 min, на шорсткість оброблюваних поверхонь за максимальної частоти збурення 15 Hz, амплітуди коливань притира 2,5 mm та з використанням дрібнозернистої пасти ГОІ № 1 подано на рис. 5. Закономірно, що збільшення тривалості притирання сприяє зменшенню шорсткості оброблюваної поверхні через більшу кількість циклів зрізання (видалення) мікроскопічних шарів матеріалу [7, 10]. Однак надмірна тривалість оброблення без заміни притиральної пасти зменшує інтенсивність притирання [11], що вимагає додаткового часу та енергетичних затрат для досягнення необхідної чистоти оброблюваної поверхні [22, 23].

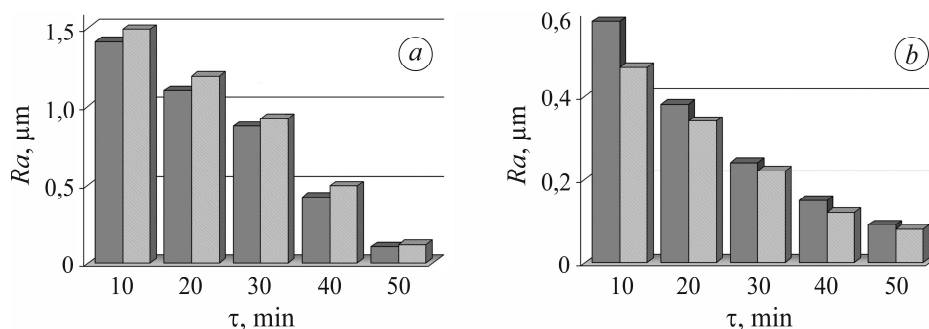


Рис. 5. Залежності шорсткості досліджуваних поверхонь деталей (деталь G – темні стовпчики, H – світлі) від тривалості оброблення за інших незмінних умов: *a* – вздовж притирання, *b* – поперек.

Fig. 5. Dependences of the roughness of the studied surfaces (part G – dark columns, H – light) of parts on the machining duration under other constant conditions: *a* – along the lapping surface, *b* – across the lapping surface.

ВИСНОВКИ

Для розробленої вібраційної притиральної машини досліджено вплив амплітуди коливань притира і частоти його збурення, а також зернистості притиральної пасти і тривалості оброблення на шорсткість плоских поверхонь деталей (фланців), виготовлених зі Сталі 20. Встановлено, що шорсткість оброблюваних

поверхонь нелінійно зменшується зі збільшенням амплітуди коливань притира, тобто радіуса його колової траєкторії, а також зі зростанням частоти збурення і тривалості оброблення. Також зменшення шорсткості та отримання вищих класів чистоти оброблюваної поверхні забезпечено застосуванням притиральних паст меншої зернистості. Шорсткість оброблюваних поверхонь після попереднього плоского шліфування була в діапазоні 1,4...1,6 μm , а внаслідок дії різних умов збурення і притиральних паст різної зернистості, вона дорівнювала 0,1...0,2 μm .

1. Heisel U. and Jakob P. Research on the workpiece kinematics in face lapping with friction drive // *Advanced Materials Research*. – 2012. – **565**. – P. 318–323. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.134>
2. Volumetric vibration treatment of machine parts fixed in rotary devices / V. Borovets, O. Lanets, V. Korendiy, and P. Dmyterko // *Advanced Manufacturing Processes II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – P. 373–383. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_37
3. Bańkowski D. and Spadło S. The application of vibro-abrasive machining for smoothing of castings // *Arch. Foundry Eng.* – 2017. – **17**, № 1. – P. 169–173.
4. Wang S., Timsit R. S., and Spelt J. K. Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum // *Wear*. – 2000. – **243**, № 1–2. – P. 147–156.
5. Barylski A. and Piotrowski N. Optimization of kinematic parameters in single-sided lapping // *Mechanik*. – 2017. – **90**, № 10. – P. 879–881. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.134>
6. Patejuka A. and Poniatowska M. Effects of finishing on the surface quality of precision castings // *Archives of Foundry Eng.* – 2007. – **7**, № 1. – P. 93–96.
7. Bańkowski D., Krajcarz D., and Młynarczyk P. Deburring and smoothing the edges using vibro-abrasive machining // *Procedia Eng.* – 2017. – **192**. – P. 28–33.
8. Uhlmann E. and Eulitz A. Wear mechanisms of ceramic vibratory finishing media // *Nano-manuf. Metrol.* – 2018. – **1**. – P. 96–104. <https://doi.org/10.1007/s41871-018-0010-2>
9. Cong W. L., Zhang P. F., and Pei Z. J. Experimental investigations on material removal rate and surface roughness in lapping of substrate wafers: A literature review // *Key Eng. Mater.* – 2009. – **404**. – P. 23–31. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.404.23>
10. Deaconescu A. and Deaconescu T. Improving the quality of surfaces finished by lapping by robust parameter design // *J. of Economics, Business and Management*. – 2014. – **2**, № 1. – P. 1–4. <https://doi.org/10.7763/JOEBM.2014.V2.88>
11. Sanchez L. E. A., Jun N. Z. X., and Fiocchi A. A. Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors // *Precision Eng.* – 2011. – **35**, № 2. – P. 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.012>
12. Tam H. Y., Cheng H. B., and Wang Y. W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components // *J. of Mater. Proces. Technol.* – 2007. – **192–193**. – P. 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.091>
13. Farahnakian M. and Shahrajabian H. Experimental study on surface roughness and flatness in lapping of AISI 52100 steel // *Int. J. of Advanced Design and Manufacturing Technol.* – 2016. – **9**, № 2. – P. 61–68.
14. Formation mechanism of concave and convex surface shapes in double-sided lapping / B. Pan, R. Kang, X. Zhu, D. Du, W. Huang, and J. Guo // *J. of Mater. Proces. Technol.* – 2022. – **309**. – Article number 117749. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117749>
15. Effect of kinematic parameters considering workpiece rotation on surface quality in YAG double-sided planetary lapping with the trajectory method / L. Yang, X. Guo, R. Kang, X. Zhu, and Y. Jia // *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technol.* – 2022. – **123**, № 7–8. – P. 2679–2690. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10288-y>
16. Stress-induced deformation of thin copper substrate in double-sided lapping / J. Guo, Z. He, B. Pan, B. Wang, Q. Bai, J. Kong, and R. Kang // *Chinese J. of Mechanical Eng.* – 2023. – **36**, № 1. – Article number 15. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00824-y>
17. A real-time dressing method for metal lapping pads based on the thermal deformation effect / L. Zhao, H. Zhao, H. Wang, R. Xie, M. Cao, M. Zhang, and S. Zhao // *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technol.* – 2022. – **120**, № 1–2. – P. 945–958. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08869-y>

18. *Prediction of surface profile evolution of workpiece and lapping plate in lapping process* / Z. Geng, P. Zhou, L. Meng, Y. Yan, and D. Guo // *J. of Manufacturing Sci. and Eng.* – 2022. – **144**, № 8. – Article number 081001. <https://doi.org/10.1115/1.4053279>
19. *A novel technique for dressing fixed abrasive lapping pad with abrasive water jet* / Z. Wang, Y. Yang, Z. Zhang, M. Pang, M. Liang, L. Ma, and J. Su // *Int. J. of Precision Eng. and Manufacturing-Green Technol.* – 2023. – **10**, № 6. – P. 1351–1373. <https://doi.org/10.1007/s40684-022-00500-5>
20. *Surface finishing and residual stress improvement of chemical vapour deposited tungsten carbide hard coatings by vibratory polishing* / C. Mikallef, K. Walton, Y. Zhuk, and A. I. Aria // *Surface and Coatings Technol.* – 2022. – **439**. – Article number 128447. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128447>
21. *Mathematical simulation of the vibration treatment of parts in a liquefied abrasive working medium* / J. Kundrak, M. Morgan, A. V. Mitsyk, V. A. Fedorovich, and A. I. Grabchenko // *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technol.* – 2022. – **120**, № 7–8. – P. 5377–5398. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08843-8>
22. *Dynamics and control of vibratory finishing machine with translational motion of lapping-polishing plates* / V. Korendiy, O. Kachur, V. Zakharov, I. Kuzio, O. Havrylchenko, and T. Hurey // *Vibroengineering Procedia.* – 2022. – **44**. – P. 8–14. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22842>
23. *Experimental study of the lap motion trajectory of vibratory finishing machine* / V. Korendiy, O. Kachur, V. Zakharov, I. Kuzio, I. Hurey, and R. Predko // *Vibroengineering Procedia.* – 2022. – **46**. – P. 1–7. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.23002>
24. *Practical implementation and experimental testing of control system for vibratory lapping-polishing machine* / O. Kachur, V. Korendiy, V. Zakharov, V. Borovets, O. Havrylchenko, and R. Palash // *Vibroengineering Procedia.* – 2023. – **50**. – P. 8–14. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23567>
25. *Comparison of friction behaviour of titanium grade 2 after non-contact boriding in oxygen-containing medium with gas nitriding* / S. Lavrys, I. Pohrelyuk, O. Tkachuk, J. Padgurskas, V. Trush, and R. Proskurnyak // *Coatings.* – 2023. – **13**. – Article number 282. <https://doi.org/10.3390/coatings13020282>

Одержано 19.08.2024