

ІВАНОВА Л. П.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Перспективним шляхом підвищення точності виготовлення деталей є мінімізація теплових деформацій технологічної системи. Важливим фактором такого впливу є тепловий стан технологічних рідин, які використовуються в циклі обробки. Вказаний фактор вивчено недостатньо, але у теперішній час проводиться велика кількість наукових досліджень у цьому напрямку. В даній статті проведено детальний аналіз найбільш відомих результатів досліджень, надрукованих як у закордонних, так і в вітчизняних авторитетних наукових виданнях. На цій підставі виконано оцінку ступені впливу теплового стану технологічних рідин на деформацію базових елементів шліфувальних верстатів, класифіковано відомі способи і техніка охолодження металорізальних верстатів та виконана порівняльна оцінка ефективності їх застосування, запропоновано комплекс шляхів зниження кількості теплоти, яка сприймається МОР.

Ключові слова: гідросистема верстата, тепловий стан технологічних рідин, техніка охолодження, конвекційний теплообмін.

ІВАНОВА Л. П.

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Перспективным путем повышения точности изготовления деталей является минимизация тепловых деформаций технологической системы. Важным фактором такого влияния является тепловое состояние технологических жидкостей, используемых в цикле обработки. Указанный фактор изучен недостаточно, но в настоящее время проводится большое количество научных исследований в этом направлении. В данной статье проведен детальный анализ наиболее известных результатов исследований, опубликованных как в зарубежных, так и в отечественных научных изданиях. На этой основе выполнена оценка степени влияния теплового состояния технологических жидкостей на деформацию базовых элементов шлифовальных станков, классифицированы известные способы и техника охлаждения металлорежущих станков и выполнена сравнительная оценка эффективности их применения, предложен комплекс путей снижения количества теплоты, которая воспринимается СОЖ.

Ключевые слова: гидросистема станка, тепловое состояние технологических жидкостей, техника охлаждения, конвекционный теплообмен.

IVANOVA L. P.

ANALYSIS OF THE THERMAL STATE OF TECHNOLOGICAL FLUIDS OF METAL CUTTING MACHINES

A promising way to increase the accuracy of manufacturing parts is to minimize thermal deformations of the technological system. An important factor in this effect is the thermal state of the process fluids used in the treatment cycle. The indicated factor has not been studied enough, but a large amount of scientific research is currently being conducted in this direction. This article provides a detailed analysis of the most famous research results published both in foreign and domestic scientific journals. On this basis, an assessment of the degree of influence of the thermal state of process fluids on the deformation of the basic elements of grinding machines was made, the known methods and techniques for cooling metal cutting machines were classified, a comparative assessment of the effectiveness of their use was performed, a set of ways to reduce the amount of heat that was absorbed by the coolant was proposed.

Keywords: machine hydraulic system, thermal state of technological liquids, cooling technology, convection heat exchange.

Вступ. Сучасні транспортні і технологічні машини використовують все більш інтенсивні швидкісні режими праці, що викликає потребу у підвищенні точності і якості виготовлення їх деталей та вузлів. У цих умовах значно зростає роль шліфування, як однієї з поширених фінішних технологічних операцій. Шліфування відрізняється високою енергонасиченістю процесу, що визиває теплові деформації технологічної системи і викликає зниження точності обробки. Тепловий стан технологічних речовин відіграє значну роль у формуванні теплового поля верстата, тому зменшення теплового впливу технологічних рідин на елементи верстата потребує більш детального вивчення цього фактору.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Останнім часом питанням вивчення теплового впливу технологічних речовин на протікання теплових процесів у технологічній системі металорізальних верстатів приділяється значна увага дослідників. Вивченню цього питання присвячена велика кількість робіт як закордонних [1-7], так і вітчизняних [8-13] вчених.

Незважаючи на різноманітні підходи і

використану методологію досліджень дослідники єдині в оцінці значного впливу цього фактору на точність операцій механічної обробки. Численні відомості з цих питань потребують детального аналізу, узагальнення і систематизації з метою використання їх для створення методології і засобів зниження впливу теплової дії технологічних рідин на точність обробки на верстатах.

3. Мета дослідження. Виконати детальний оглядовий аналіз найбільш відомих публікацій з питань вивчення впливу теплового стану технологічних рідин на точність обробки узагальнити і класифікувати інформацію з цих питань та рекомендувати на цій основі шляхи зниження кількості тепла, що переходить у МОР при механічній обробці.

4. Викладення основного матеріалу.

Тепловий вплив на вузли верстата може викликати температурні деформації і пов'язані з ними погіршеності розмірів і форми деталей. Тепловий режим роботи верстата, як правило, є нестабільним, так як це обумовлено відмінністю умов циклічності процесу обробки. При цьому похибки, викликані температурними змінами можуть мати різну природу (рис. 1).



Рис. 1 – Фактори, що викликають температурні погрішності при механічній обробці на верстатах

Серед факторів, які викликають температурні похибки, слід виділити тепловий стан технологічних рідин в елементах (підсистемах) гідросистеми верстата: гідроприводу подач, мащення, охолодження і застосування МОР.

Температура рідини в гідросистемі верстата може змінюватися в залежності від етапу роботи протягом 300 с часу від 24 °С до 38 °С, що негативним чином може вплинути на точність обробки [1].

Температурні деформації верстатів залежать від величини, споживаної ними енергії і характеру її розподілу між елементами технологічної системи.

Інформація з цього питання суперечлива. На думку деяких дослідників, основним споживачем енергії є шпиндельний вузол [2], який споживає до 45,1% енергії, споживаної верстатом.

За даними інших джерел [3] основними споживачами енергії, що підводиться є інші функціональні елементи верстата (рис. 2).

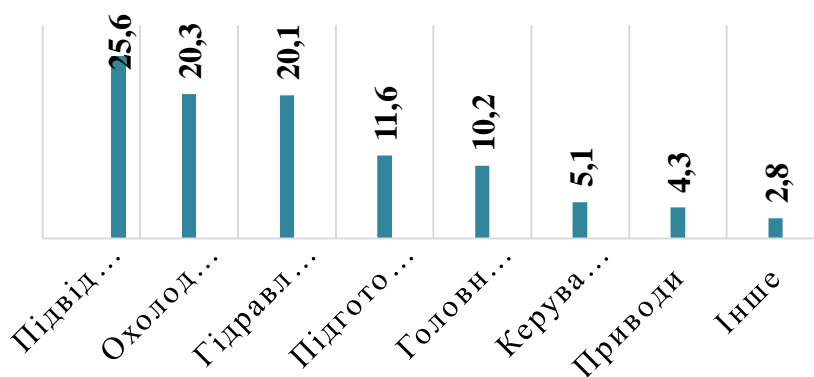


Рис. 2 – Розподіл енергії, що вживається, %, між елементами технологічної системи обробного центру

В роботі [4] проведено 3D-моделювання прецизійного шліфувального верстата з визначенням основних джерел теплової потужності: лінійного приводу $Q=13,23...30,70$ Вт; передача гвинт-гайка кочення $Q_{yo} = 350,3$ Вт/м²; напрямні $Q = 1,9$ Вт.

Поля розподілу температур отримано з урахуванням температури навколишнього середовища 22 °С і умови конвективного теплообміну. При підвищенні температур в парі гвинт-гайка кочення на 5 °С, температура лінійних приводів збільшується на 0,8-1,5 °С, а температура напрямних – на 0,9 °С.

Деформація елементів верстата з тепловим впливом і без нього практично одна і та ж і змінюється від 6,6 до 6,69 мкм.

Обсяг інформації про теплові процеси в гідросистемах металорізальних верстатів обмежений. У гідросистемах верстатів гідравлічна енергія передається по трубах через гідроапаратуру до споживачів. При цьому певна кількість енергії перетворюється в теплову. Характер цього

перетворення залежить від ряду факторів, у тому числі, від вязкісних властивостей рідини.

За функціональним призначенням гідросистема верстата може бути структурно розділена на кілька підсистем (наприклад, на чотири [2]):

- підсистема гідроприводу, призначена для перетворення гідравлічної енергії в механічну роботу, яка використовується, наприклад, для затиску інструменту, повороту столу та інших рухів виконавчих механізмів;

- підсистема застосування МОР, що забезпечує її подачу в зону різання і оптимальні умови експлуатації технологічної системи;

- підсистема мащення, призначена для змащення напрямних, механічних передач коробок швидкостей, підшипників і т. п .

- підсистема охолодження, призначена для охолодження шпинделів і інших елементів верстата. Підсистема забезпечує можливість управління станом теплових потоків в верстаті і підвищення точності обробки (аж до прецизійної).

Встановлено [2], що елементи верстатів, які пов'язані з експлуатацією технологічних рідин відрізняються значною енергонасиченістю. Крім того,

визначено структуру розподілу гідравлічної і теплової енергії в гідросистемі на різних етапах технологічного циклу роботи верстата (рис. 3).

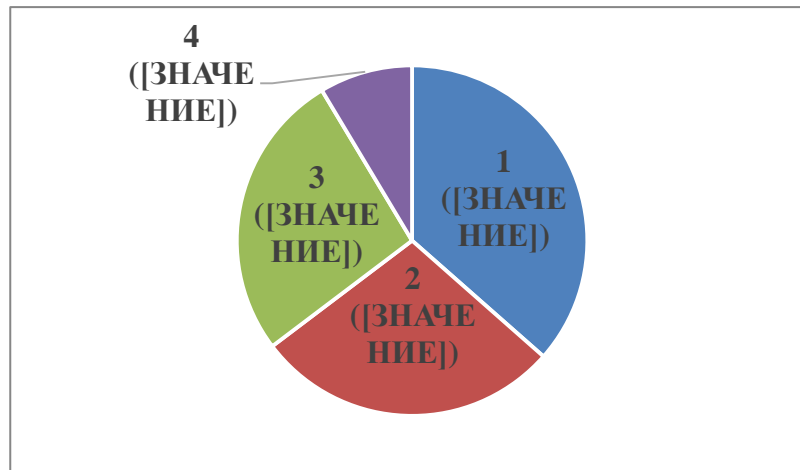


Рис. 3 – Розподілення споживаної енергії, %, в елементах гідросистеми 5-ти координатного обробного центра: 1 – підсистема застосування МОР; 2 – підсистема мащення; 3 – підсистема охолодження; 4 – підсистема гідроприводу подач

Для підсистеми гідроприводу подач характерно наступне. Оскільки потужність, яка втрачається в системі перетворюється в тепло, температура рідини може значно підвищитися. При цьому знижується в'язкість самої рідини, що збільшує витрати і сприяє прогресуючому підвищенню температури за рахунок втрат енергії в результаті витоків. У свою чергу, підвищення температури тягне за собою окислення рідини, яке супроводжується подальшим зниженням її в'язкості, появи в ній смолистих включень і опадів. Крім того, з підвищенням температури об'єм робочої рідини збільшується, причому приріст об'єму можна визначити за формулою:

$$\Delta V_{жс} = \alpha_{жс} \cdot V_{жс} \cdot \Delta t_{жс},$$

де $\alpha_{жс}$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини; $V_{жс}$ – початковий об'єм рідини;

$\Delta t_{жс}$ – приріст температури рідини.

Приріст температури рідини на 1 °С призводить до збільшення її об'єму на 0,07%.

Як наслідок, перераховані чинники можуть стати однією з причин зміни просторового положення деталей гідроприводу і верстата в цілому.

Дуже важливим досить енергоємним елементом гідросистеми верстата є підсистема охолодження. Від її функціонального стану значною мірою залежить поведінка елементів верстата при обробці. В першу чергу це стосується шпиндельних вузлів і деяких інших елементів.

Узагальнення даних [5] дозволило скласти класифікацію способів і техніки охолодження металорізальних верстатів (рис. 4).

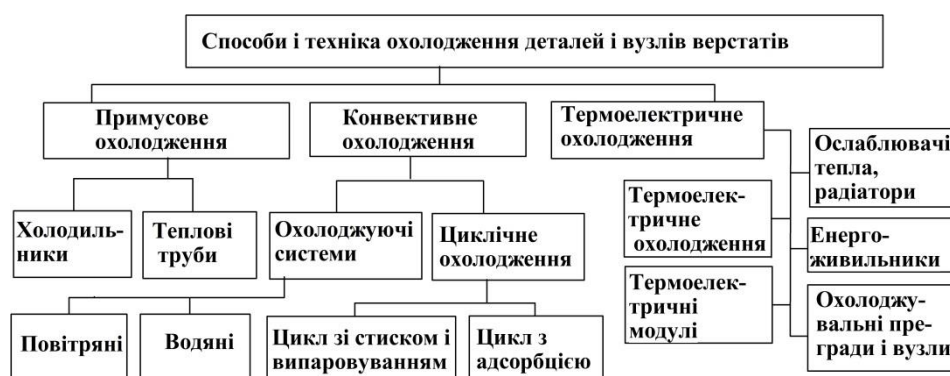


Рис. 4. – Класифікація способів і техніки охолодження металорізальних верстатів

Термоелектричне охолодження вимагає пристроїв з малим числом рухомих частин, є більш гнучким і надійним і, отже, більше підходить для верстатів з високошвидкісної обробкою.

Конвективне охолодження забезпечується за рахунок випаровування при стисненні і адсорбції в використовуваних повітряних або водяних

конденсаторах. Однак це вимагає великих витрат, пов'язаних з обладнанням для підготовки та обробки води.

Примусове охолодження з використанням холодильників, в яких циркулює охолоджуючий агент вимагає енергоємного обладнання. Теплові труби можуть трансформувати велику кількість тепла через

простір з малими поперечними перетинами, однак їх можливості обмежені.

В результаті досліджень [6] встановлено зв'язок між споживаною енергією приводу головного руху, енергією, що витрачається системою охолодження і зміщенням базових точок обробного центру в залежності від тривалості обробки. Конструкція системи охолодження впливає на величину зміщення характерних точок, яке знаходиться в межах 3-35 мкм.

Дослідження теплового стану шліфувальної бабки [7] з гідростатичними підшипниками ($V_k = 60$ м/с) показали, при температурі навколишнього середовища 25 °С температура в різних точках бабки змінюється від 21,9 до 38 °С, при цьому фронтальна поверхня бабки нагрівається до 30-35 °С. Температура охолоджуючої рідини змінюється в

межах від 18 до 27 °С. Це призводить до деформації шліфувального шпинделя в межах 3,5-13 мкм.

Одним з джерел тепла, що визначає температурне поле і температурні деформації вузлів і деталей верстата є МОР нагріта в зоні різання. Встановлено [8, 9, 10], що тепловий фактор МОР може негативно впливати на температурні деформації верстатів.

За даними [11] підвищення температури МОР в підсистемі її застосування призводить до відхилення осей шліфувальних шпинделів, що призводить зміни кутового положення шліфувальних кругів. За деякими даними [12] виміряна температура в елементах технологічної системи, що працює із застосуванням МОР, вище, ніж в технологічній системі, що працює без її застосування (рис. 5).

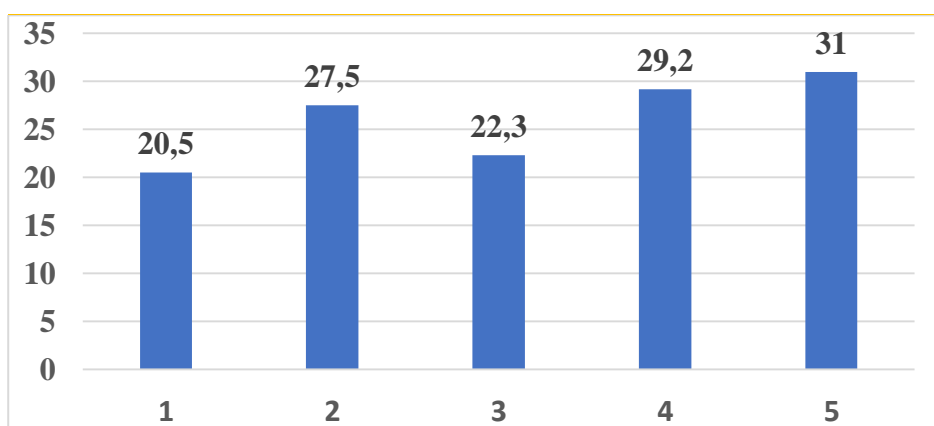


Рис. 5 – Результати вимірювань температури (°С) елементів 5-ти координатного обробного центру після 7-ми годин роботи: 1 і 2 – область, що прилягає до зони різання, відповідно, обробка без і із застосуванням МОР; 3 і 4 – поворотний стіл, відповідно, обробка без і із застосуванням МОР; 5 – експлуатаційна температура МОР

Причому це помітно в першу чергу в фазі нагріву системи. У фазі охолодження різниці між температурами елементів не так відчутна. Одним з перспективних шляхів такого зниження є використання прогресивних технологічних схем обробки з застосуванням додаткових проміжних правок шліфувального круга, що дозволяє лімітувати

максимальне значення виділеної теплоти на кожній стадії обробки [13].

За результатами досліджень можна виділити заходи, що дозволяють знизити величину температурних деформацій верстатів і тим самим підвищити точність обробки (рис. 6).



Рис. 6 – Шляхи зниження теплового впливу на МОР при шліфуванні

На цій підставі намічено шляхи зниження теплових впливів на МОР. Це можна зробити в тому числі і за рахунок правильної організації поглинання тепла, що генерується зоною різання, мастильно-охолоджувальної рідиною.

Висновки. Таким чином, на основі оглядового аналізу літературних джерел виконана оцінка ступені впливу теплового стану технологічних рідин на деформації базових елементів шліфувальних верстатів і, в кінцевому рахунку, на точність обробки на фінішних операціях виготовлення деталей машин.

Класифіковано відомі способи і техніки охолодження металорізальних верстатів та виконана порівняльна оцінка ефективності їх застосування.

Запропоновано комплекс шляхів зниження кількості теплоти, яка сприймається МОР, тобто, опосередковано вказано шляхи зменшення теплових деформацій верстата.

Список літератури:

1. Pursian S. *Therme-energetische Modellierung Rung der Fluidsysteme eines Bearbeitungszentrums* / TU Dresden; 2015.
2. Juliane Weber, Jürgen Weber, Linart Shabi, Harald Lohse. Energy, power and heat flow of the cooling and fluid systems in a cutting machine tool / 7 HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. P. 99-102.
3. Bäuml S., Bode H., Brecher C., Braeibach, T, Hansch, S, Henges, N. *Resourceneffizienz im Werkzeugmaschinenbau* / in Brecher, C, Cboche, F, Schmitt, R, Schuh, G. *Weltbewerbsfaktor Produktionstechnik Aachener Perspektiven*, Proceedings of Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK).
4. Leon-Yeol Oh, Joon Jang, WooChun Chooi. *Analyses of High-Precision Grinding Machine* / International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), Vol. 3 No 1, Pages: 12-16 (2015).
5. Poonam S., Patil, R. *Mudholkar. Cooling Techniques for a Spindle of Machine Tool* / International Journal Of Engineering And Computer Science ISSN: 2319-7242 Volume 5 Issue 12 Dec. 2016, Page No. 19653-19656.
6. Brecher, C, Bäuml, S, Jasper, D and Triebs J. *Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools* / 19 CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012. p. 239-244.
7. Bo-Sung, Gueong-Tae Bay, Gwi-Nam Kit. *A study on the thermal Characteristics of the grinding machine applied hydrostatic bearing* / Transaction of the Canadian society for Mechanical Engineering. Vol. 39, No 3, 2015, p. 717-728.
8. Вектрис В.Ю. *Стабилизация температурного режима круглошлифовальных станков* / В.Ю. Вектрис // Станки и инструмент. – 1986. – №7. – с. 17.
9. Марцинкявичус А.-Г. Ю. *Снижение температурных деформаций круглошлифовального станка* / А.-Г. Ю. Марцинкявичус // Станки и инструмент. – 1991. – №5. – с. 7-10.
10. Якимов, О.В. *Теплофизика механической обработки* / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д.В. Горгачов. – Одесса: Астропринт, 2000. – 256 с.
11. Андрианова И.А. *Повышение точности торцевого шлифования методом терморегулирования*. / И.А. Андрианова, С.С. Шахновский // Станки и инструмент, 1984. – № 11. – с. 31-32.
12. Gebharolt, M. *Thermal Befavionur and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools*, Dissertation No21733, ETHZu rich, 2014.
13. M Stepanov, L Ivanova, P Litovchenko, M Ivanova, Y Basova. *Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing*. In the book: Ivanov V. et al. (Ed.) *Advances in Design, Modeling and Production II. DSMIE 2019. Summary of lectures in the field of mechanical engineering*. Springer, Cham, P. 331-339

References (transliterated)

1. Pursian S. *Therme-energetische Modellierung Rung der Fluidsysteme eines Bearbeitungszentrums* / TU Dresden; 2015.
2. Juliane Weber, Jürgen Weber, Linart Shabi, Harald Lohse. Energy, power and heat flow of the cooling and fluid systems in a cutting machine tool / 7 HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. P. 99-102.
3. Bäuml S., Bode H., Brecher C., Braeibach, T, Hansch, S, Henges, N. *Resourceneffizienz im Werkzeugmaschinenbau* / in Brecher, C, Cboche, F, Schmitt, R, Schuh, G. *Weltbewerbsfaktor Produktionstechnik Aachener Perspektiven*, Proceedings of Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK).
4. Leon-Yeol Oh, Joon Jang, WooChun Chooi. *Analyses of High-Precision Grinding Machine* / International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), Vol. 3 No 1, Pages: 12-16 (2015).
5. Poonam S. Patil, R. R. Mudholkar. *Cooling Techniques for a Spindle of Machine Tool*. International Journal Of Engineering And Computer Science ISSN: 2319-7242 Volume 5 Issue 12 Dec. 2016, Page No. 19653-19656.
6. Brecher, C, Bäuml, S, Jasper, D and Triebs J. *Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools*. 19 CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, 2012. p. 239-244.
7. Bo-Sung, Gueong-Tae Bay, Gwi-Nam Kit. *A study on the thermal Characteristics of the grinding machine applied hydrostatic bearing*. Transaction of the Canadian society for Mechanical Engineering. Vol. 39, No 3, 2015, p. 717-728.
8. Вектрис В.Ю. *Стабилизация температурного режима круглошлифовальных станков* / В.Ю. Вектрис // Станки и инструмент. – 1986. – №7. – с. 17.
9. Марцинкявичус А.-Г. Ю. *Снижение температурных деформаций круглошлифовального станка* / А.-Г. Ю. Марцинкявичус // Станки и инструмент. – 1991. – №5. – с. 7-10.
10. Якимов, О.В. *Теплофизика механической обработки* / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д.В. Горгачов. – Одесса: Астропринт, 2000. – 256 с.
11. Андрианова, И.А. *Повышение точности торцевого шлифования методом терморегулирования*. / И.А. Андрианова, С.С. Шахновский // Станки и инструмент, 1984. – № 11. – с. 31-32.
12. Gebharolt, M. *Thermal Befavionur and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools*, Dissertation No21733, ETHZu rich, 2014.
13. M Stepanov, L Ivanova, P Litovchenko, M Ivanova, Y Basova. *Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing*. In the book: Ivanov V. et al. (Ed.) *Advances in Design, Modeling and Production II. DSMIE 2019. Summary of lectures in the field of mechanical engineering*. Springer, Cham, P. 331-339

Поступила (received) 1.06.2020

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Ivanova Larisa Petrovna) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, e-mail: larisanangu@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>