

Лапто І.М.

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Добришкін Ю.М.

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Геращенко М.О.

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Приходько С.М.

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ СТАН У ЗОНІ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ОТВОРІВ КОМБІНОВАНИМ ОСЬОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Актуальність вивчення теплофізичних процесів механічної обробки зумовлена тим, що теплота, яка виділилась під час роботи різання, значною мірою визначає навантаження на різальний інструмент, його стійкість, а також якість і точність розмірів оброблюваних поверхонь. Тому дослідження робочих процесів у зоні різання під час обробки отворів і розроблення на цій основі практичних рекомендацій щодо підвищення точності обробки отворів з урахуванням особливостей тепловиділення в зоні різання є важливим науково-практичним завданням у галузі обробки різанням.

***Мета дослідження.** Для вирішення проблеми підвищення точності обробки отворів осьовим інструментом необхідно провести комплексні дослідження робочих процесів у зоні різання за чистової обробки отворів із метою створення нових способів оброблення, які дадуть змогу забезпечити підвищення точності профілю отвору.*

***Методи дослідження** базуються на методах чисельного моделювання, сучасній теорії різання, теплофізики. Експериментальні дослідження виконувались із використанням теорії статистичної обробки даних і сучасної виміральної апаратури.*

***Результати.** Розроблено алгоритм і чисельну математичну теплову модель поширення температурних полів у поперечному та повздовжньому перерізах осесиметричної деталі під час обробки отворів двоступінчастим осьовим інструментом з урахуванням особливостей тепловиділення в зоні різання.*

***Висновки.** В результаті проведених досліджень було розроблено алгоритм і чисельну математичну модель поширення температурних полів у перерізі осесиметричної деталі під час обробки отворів двоступінчастим осьовим інструментом.*

Встановлено, що вплив тепловиділення на першому ступені на температуру в зоні різання другого ступеня має виражений нелінійний характер на початку і в кінці отвору, що може суттєво впливати на точність отворів.

Розроблена модель поширення температурних полів у поперечному перерізі деталі під час обробки отворів двоступінчастим осьовим інструментом є основою для створення комплексної моделі розвитку теплових процесів, в якій необхідно врахувати поширення теплоти в інструменті та вторинний перерозподіл теплоти між інструментом і деталлю.

***Ключові слова:** отвір, комбінований інструмент, теплові потоки, точність обробки, зона різання.*

Постановка проблеми. Розвиток високих технологій сприяє зростанню вимог до точності механічної обробки різанням. Особливо важливим є завдання підвищення точності чистової обробки отворів осьовим інструментом, оскільки однією з основних причин обмеження режимів різання при цьому є негативний вплив теплових процесів

у зоні різання. Загально визнаним методом підвищення точності чистової обробки отворів осьовим інструментом є суміщення декількох операцій обробки в комбінованому осьовому інструменті. Однак при цьому неможливо уникнути взаємного впливу тепловиділення в зоні різання на температурний стан сусідніх ступенів, що призводить

до зниження точності обробки і, як наслідок, зниження ефективності суміщення операцій.

Вирішити цю проблему можливо шляхом управління параметрами робочих процесів і конструкцією комбінованого осьового інструмента, при цьому необхідно знати функціональні залежності між різними параметрами робочих процесів, геометрією осьового інструмента та температурним станом у зоні різання. Рішення цього завдання можливе шляхом розроблення комплексної математичної моделі обробки отворів комбінованим осьовим інструментом [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундамент науки, яка займається вивченням теплових явищ у технологічних системах механічної обробки, закладений ученими А.Н. Резніковим, А.М. Даніеляном, С.С. Силіним, П.І. Ящерициним, О.М. Тихонцовим, А.В. Якимовим, А.В. Усовим. Було запропоновано аналітичні формули для визначення температур і температурних розподілень для різних видів механічної обробки за визначених умов. Серед робіт, присвячених дослідженню температурного стану під час обробки отворів, відомі роботи А.В. Баранова, І.А. Малишка, Г.І. Грановського, П.А. Юдковського, О.Г. Татьянченка. Ґрунтовні теоретичні та експериментальні дослідження теплових явищ під час різання виконано А.Н. Резніковим, Н.В. Талантовим, А.А. Рижкіним, А.М. Вульфом тощо. У роботах А.Н. Резнікова наведено класифікацію джерел і стоків теплоти, які утворюються внаслідок переходу в теплоту енергії деформації оброблюваного матеріалу, роботи тертя на контактних поверхнях різального інструмента; уперше було розглянуто питання негативного впливу високих температур на точність обробки отворів [2; 3]. Цей напрям дослідження було продовжено у роботах [4; 5]. Однак у цих роботах процес виникнення джерел тепла та розподілення потоків і стоків теплоти не враховує вторинного перерозподілу потоків теплоти від впливу процесу тертя ковзання по передній та задній поверхнях різального інструмента. Вирішення проблеми первинного розподілу та вторинного перерозподілу теплових потоків під час обробки отворів осьовим інструментом висвітлено в роботах [6–9].

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що більшість наукових праць цього напрямку присвячена дослідженню теплофізики процесу ортогонального різання інструментом типу плоского клину. Але на теоретичному матеріалі та методах дослідження, які викладено в цих роботах, можуть базуватися більш складні завдання, а

саме: механічна обробка отворів осьовим комбінованим інструментом.

Постановка завдання. Для вирішення проблеми підвищення точності обробки отворів осьовим комбінованим інструментом необхідно провести комплексні дослідження робочих процесів у зоні різання під час чистової обробки отворів із метою розроблення математичної моделі розвитку теплових процесів і виявлення на її основі особливостей впливу теплових потоків на температурний стан у зоні різання другого ступеня комбінованого осьового інструмента.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час обробки отворів комбінованим інструментом теплові джерела здійснюють обертальний рух щодо повздовжньої осі отвору й поступальний рух поверхнею отвору. Обертальний рух здійснюється зі швидкістю різання V , поступальний рух здійснюється зі швидкістю подачі V_n для осьових інструментів $V \gg V_n$. Тому за теплового розрахунку традиційною є заміна дискретних теплових рухомих джерел на кожному зубі кільцевим тепловим джерелом, що рухається зі швидкістю V_n вздовж осі отвору [10].

Особливістю теплофізичних досліджень комбінованого осьового інструмента є взаємний вплив теплових джерел на різних ступенях. Зазвичай в комбінованому інструменті наступні ступені забезпечують більш якісну обробку поверхні. Тому найбільший інтерес становить дослідження впливу теплового джерела від попередніх ступенів на температурний стан на наступних ступенях.

Для оцінки впливу сусіднього теплового джерела було проведено числові дослідження на основі методу кінцевих елементів температурного стану в повздовжньому перерізі деталі типу циліндричної втулки довжиною L , зовнішнім діаметром D і діаметром отвору d під час чистової обробки отвору комбінованим осьовим інструментом. У розрахункових кінцево-елементних моделях важливим є питання адекватності отриманих результатів внаслідок заміни суцільного масиву деталі дискретними кінцевими елементами й нелінійності теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. Це дало змогу перейти від об'ємної моделі деталі до плоскої осесиметричної, що, у свою чергу, допомогло спростити розрахункову схему та підвищити точність розрахунків. Розрахункова схема теплового навантаження втулки двома кільцевими тепловими джерелами інтенсивністю $q_{екв1}$ і $q_{екв2}$, які рухаються по поверхні отвору зі швидкістю подачі V_n на відстані $a_{1,2}$ один від одного, наведена на рис. 1.

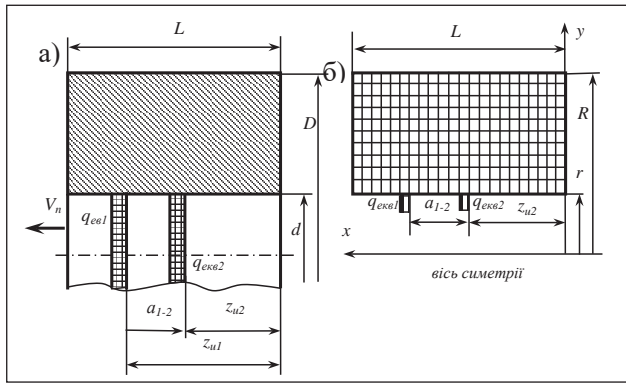


Рис. 1. Розрахункова схема теплового навантаження втулки під час обробки двоступінчастим осевим інструментом:
 а) навантаження кільцевим тепловим джерелом;
 б) плоска осесиметрична кінцево-елементна схема

Інтенсивність кільцевих теплових джерел q_{ekv1} і q_{ekv2} визначалась як $q_{ekv} = \frac{Q_d \tan \phi}{\pi d t T}$, де Q_d – загальна кількість теплоти, що поступає в деталь за час обробки отвору; T – загальний час обробки; t і ϕ – глибина різання та головний кут у плані відповідно. Ширина кільцевих теплових джерел приймалася рівною $l_{k1} = l_{k2} = t_2 / \tan \phi_2$, де t_2 і ϕ_2 – глибина різання та головний кут у плані для другого ступеня відповідно. Інтенсивність тепловиділення q_{ekv1} і q_{ekv2} була різною внаслідок різної геометрії різальної частини ступеня та глибини різання.

Блок-схема алгоритму дослідження температурних полів під час обробки двоступінчастим осевим інструментом наведена на рис. 2.

Встановлено [2], що під час визначення температури від дії двох одночасно діючих тепло-

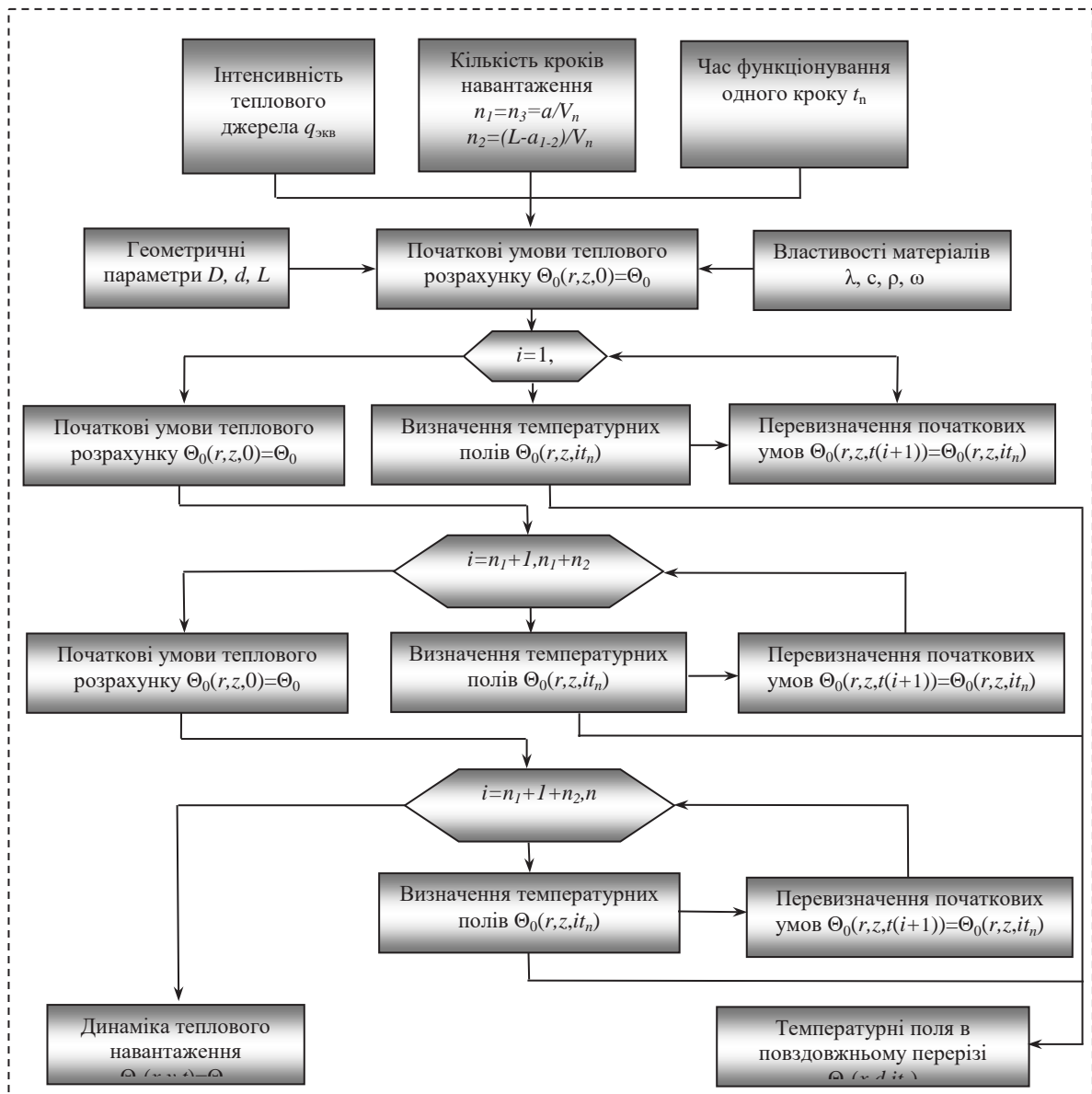


Рис. 2. Блок-схема математичної моделі дослідження розподілу температурних полів у повздовжньому перерізі деталі від двох теплових джерел источника

вих джерел справедливий принцип суперпозиції. Отже, температурний стан у будь-який момент часу може бути визначений як сума температурних полів у цей час від дії двох теплових джерел:

$$\Theta = \Theta_1(r_1, z_1, t_1) + \Theta_2(r_2, z_2, t_2),$$

де $\Theta_1(r_1, z_1, t)$, $\Theta_2(r_2, z_2, t)$ – розподіл температур від першого та другого теплового джерела, при цьому $r_1 = r_2 = r_u$.

Зважаючи на те, що теплові джерела рознесені вздовж осі z на відстані a , що відповідає часу функціонування в заданому перерізі $\Delta t = a/V_n$, температуру в довільній точці в масштабі часу першого й другого теплового джерела t_1 і t_2 можна визначити як:

$$\Theta(r_u, z, t_1) = \Theta_1(r_u, z, t_1) + \Theta_2(r_u, z, t_1 - a / V_n),$$

$$\Theta(r_u, z, t_2) = \Theta_1(r_u, z, t_2 + a / V_n) + \Theta_2(r_u, z, t_2),$$

або:

$$\Theta(r_u, z, t_1) = \Theta_1(r_u, z, t_1) + \Delta\Theta_{1-2}(r_u, z, t_1),$$

$$\Theta(r_u, z, t_2) = \Delta\Theta_{2-1}(r_u, z, t_2) + \Theta_2(r_u, z, t_2),$$

де параметри:

$$\Delta\Theta_{1-2}(r_u, z, t_1) = \Theta_2(r_u, z, t_1 - a / V_n),$$

$$\Delta\Theta_{2-1}(r_u, z, t_2) = \Theta_1(r_u, z, t_2 + a / V_n)$$

враховують вплив сусіднього теплового джерела на температурне поле діючого теплового джерела [11].

Температура в зоні дії першого q_1 та другого q_2 теплового джерела в момент часу t_1 і t_2 відповідно буде дорівнювати:

$$\Theta(r_u, z_1, t_1) = \Theta_1(r_u, z_1, t_1) + \Delta\Theta_{1-2}(r_u, z_1, t_1),$$

$$\Theta(r_u, z_2, t_2) = \Delta\Theta_{2-1}(r_u, z_2, t_2) + \Theta_2(r_u, z_2, t_2).$$

З позицій точності обробки найбільший інтерес має характер зміни температури на контактній поверхні отвору $\Theta(r_u, d / 2, t)$.

Аналіз розрахунків показав, що приріст температури $\Delta\Theta$ в зоні різання другого ступеня шляхом тепловиділення на першому ступені дуже істот-

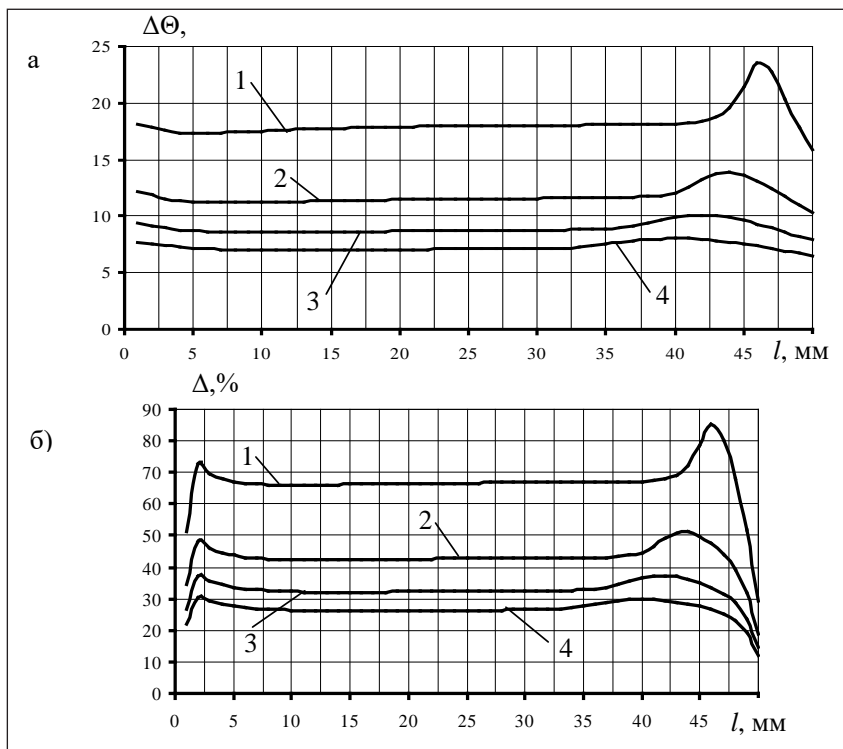


Рис. 3. Приріст температури $\Delta\Theta$ (а) та його частка Δ у загальній температурі (б) в зоні різання другого ступеня під час обробки двоступінчастою розверткою шляхом впливу першого ступеня: 1) $a_{1-2}=5\text{мм}$; 2) $a_{1-2}=10\text{мм}$; 3) $a_{1-2}=15\text{мм}$; 4) $a_{1-2}=20\text{мм}$

ний. При цьому як величина приросту, так і його частка в загальній температурі в зоні різання другого ступеня має виражений нелінійний характер на початку й в кінці отвору.

За результатами проведених розрахунків із використанням інтегральних переходів першого й третього типу на підставі методу конструювання була отримана модель формування теплового балансу комбінованого осьового інструмента у вигляді:

$$Q_u = \frac{3,37 \cdot q \cdot \sqrt{\pi} \cdot D^2 \cdot d^2 \cdot l}{4(D-d) \cdot V} \cdot e^{\left[\frac{V(D-d)}{2\omega} \right]},$$

де Q_u – кількість теплоти, яка перейшла в інструмент, Дж; q – об'ємна щільність тепловиділення внутрішніх джерел, Вт/м³; ω – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; V – швидкість різання, м/хв; D – найбільший діаметр інструмента, мм; d – найменший діаметр інструмента, мм; l – глибина отвору, мм.

Було встановлено, що за тепловим джерелом, що рухається, температура практично постійна, а перед ним температура зменшується за експоненціальним законом тим більше, чим більша швидкість.

На рис. 3 наведено діаграми зміни параметра $\Delta\Theta_{2-1} = \Delta\Theta$, які отримано на основі досліджень, проведених із використанням розробленої моделі для різних видів двоступінчастого інструмента, та частку Δ цього параметра в сумарній температурі в зоні різання у міру просування другого теплового джерела вздовж оброблюваного отвору. Ана-

ліз діаграм приросту температури в зоні різання другого ступеня показує, що найбільшого значення параметри $\Delta\Theta_{2-1}$ і Δ досягають на виході з отвору. При цьому зони екстремумів $\Delta\Theta_{2-1}$ і Δ не збігаються, що можна пояснити крайовими ефектами та різким підвищенням температури у міру наближення теплових джерел до краю отвору.

Аналіз отриманих результатів показав, що приріст температури $\Delta\Theta$ в зоні різання другого ступеня шляхом тепловиділення на першому ступені досить суттєвий (може досягати 85 %) і може бути співставлений із температурою в цій зоні від дії теплових джерел другого ступеня, що може суттєво впливати на точність обробки отвору на другому ступені.

Висновки. В результаті проведених досліджень було розроблено алгоритм і чисельну математичну модель поширення температурних полів у перерізі осесиметричної деталі під час обробки отворів двоступінчастим осьовим інструментом.

Встановлено, що вплив тепловиділення на першому ступені на температуру в зоні різання другого ступеня має виражений нелінійний характер на початку і в кінці отвору, що може суттєво впливати на точність отворів.

Розроблена модель поширення температурних полів у поперечному перерізі деталі під час обробки отворів двоступінчастим осьовим інструментом є основою для створення комплексної моделі розвитку теплових процесів, в якій необхідно врахувати поширення теплоти в інструменті та вторинний перерозподіл теплоти між інструментом і деталлю.

Список літератури:

1. Татьяначенко А.Г., Лаппо И.Н. Взаимное влияние тепловых потоков на температурное состояние при обработке отверстий комбинированным осевым инструментом. *Наукові праці Донецького технічного університету. Серія : Машинобудування і машинознавство*. 2014. № 1 (11). С. 116–125.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. Москва : Машиностроение, 1981. 279 с.
3. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. Москва : Машиностроение. 1990. 288 с.
4. Юдковский П.А., Крючков Н.К., Шевель А.П. Повышение качества спиральных сверл. Челябинск : Южно-уральское книжное издательство, 1970. 112 с.
5. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Киев ; Одесса : Лыбидь, 1991. 240 с.
6. Малышко И.А., Киселева И.В. Влияние параметров инструмента на производительность ГПС. *Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. пр. 2008. Вип. 23. С. 74–77.
7. Малышко И.А., Татьяначенко А.Г. Температурные деформации детали при обработке отверстий. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения* : междунар. сб. науч. тр. 2001. Вып. 17. С. 45–51.
8. Малышко И.А. Основы теории проектирования осевых комбинированных инструментов : автореф. дисс. ... докт. техн. Наук : 05.03.01. Киев, 1997. 36 с.
9. Малышко И.А., Татьяначенко А.Г. Моделирование процесса формирования продольного профиля отверстия с учетом термоупругих деформаций инструмента и детали при неустановившемся теплообмене. *Високі технології в машинобудуванні* : зб. наук. пр. / НТУ «ХП». 2002. С. 211–216.

10. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Минск : «Вышейш. школа», 1975. 528 с.

11. Татьянченко А.Г. Теоретические основы прогнозирования термоупругих деформаций осевого инструмента и детали и их влияние на точность обработки отверстий : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.03.01 Донецк, 2006. 36 с.

Lappo I.N., Dobryshkin Yu.N., Herashchenko M.A., Prykhodko S.N.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF HEAT FLOWS ON THE TEMPERATURE CONDITION IN THE CUTTING AREA DURING THE OPENING OF HOLES WITH COMBINED AXIAL TOOLS

The relevance of studying the thermophysical processes of machining is due to the fact that the heat released during the cutting operation largely determines the load on the cutting tool, his firmness and also quality and accuracy of the sizes of the processed surfaces. Therefore, research of work processes in the cutting area during the hole treatment and the development of practical recommendations on this basis to improve the accuracy of the hole treatment, taking into account the features of heat dissipation in the cutting zone is an important scientific and practical task in the field of cutting.

Research methods are based on the methods of numerical simulation, modern theory of cutting, and thermophysics. Experimental studies were performed using the theory of statistical data processing and modern measuring equipment.

Results. An algorithm and a numerical mathematical thermal model for the distribution of temperature fields in the cross-section and longitudinal section of an axisymmetric detail were developed during the processing of the openings with a two-stage axial tool, taking into account the features of the heat dissipation in the cutting zone.

Conclusions. As a result of the researches, an algorithm and a numerical mathematical model of the propagation of temperature fields in the cross section of an axisymmetric part during the processing of openings with a two-step axial tool were developed.

It is established that the influence of heat release on the first stage on the temperature in the cutting zone of the second stage has a pronounced nonlinear character at the beginning and at the end of the hole, which can significantly affect the accuracy of the holes.

The developed model of temperature field propagation in the cross-section of a detail during machining of openings with a two-stage axial tool is the basis for creation of a complex model of development of thermal processes, in which it is necessary to consider the heat distribution in the tool and the secondary redistribution of heat between the tool and the detail.

Key words: hole, combined tool, thermal streams, machining accuracy, cutting area.