

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9:539.621

doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-23-30

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА ОТ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТРИБОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Евгений Валерьевич Фоминов^{1✉}, Валерия Енвериевна Гвинджилия², Елена Ивановна Фисунова³, Андрей Анатольевич Марченко⁴, Виктория Викторовна Сухомлинова⁵

^{1,2,3,4,5} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ fominoff83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

² vgvindjiliya@donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>

³ fis62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4293-3426>

⁴ sigen-67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>

⁵ tobago13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>

Аннотация

Цель исследования: моделирование температурного распределения на поверхности тяжело нагруженного трибоконтакта «передняя поверхность токарного резца-стружка» с учётом эволюционных изменений в системе резания.

Задача, решению которой посвящена статья. Оценка влияния эволюционных изменений комплекса трибодеформационных показателей процесса резания на среднюю и максимальную температуру передней поверхности токарного резца.

Методы исследования. Определение контактных температур осуществлялось на основании математического моделирования с использованием данных, полученных в ходе натурных экспериментов при продольном точении заготовок из стали 15Х2НМФА без охлаждения пластинами твёрдого сплава Т15К6. При стойкостных испытаниях определялась длина контакта стружки с передней поверхностью и коэффициент усадки стружки, переменные для расчёта, а также средняя температура в зоне резания, величина которой использовалась для оценки адекватности полученных цифровым моделированием результатов.

Новизна работы. Прогнозирование роста температуры на передней поверхности резца с учётом вклада эволюционных изменений трибодеформационных показателей процесса резания.

Результаты исследования. В исследуемой системе резания по результатам стойкостных испытаний зафиксировано снижение коэффициента усадки стружки с течением времени обработки. Произведено моделирование температурного распределения на передней поверхности резца в двух вариантах: с учётом эволюционной перестройки коэффициента усадки стружки и связанных с ним параметров – скорости скольжения и толщины пластически деформированного слоя в стружке, и без учёта их изменений. Установлено, что моделирование с поправкой на изменение трибопоказателей позволяет получить расчётные значения температуры передней поверхности, наиболее близкие к экспериментально зафиксированной средней температуре в зоне резания.

Выводы: Прогнозирование контактных температур с поправкой на эволюционные изменения трибодеформационных показателей позволит точнее определить момент в эволюции системы резания, на котором могут быть достигнуты критические значения температуры, и дальнейшая обработка сопряжена с риском критического изнашивания или ухудшения качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: температура, резание, точение, усадка, стружка, деформации, трибосистема.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии»», договор № 160312622214 от 14.04.2022.

Ссылка для цитирования:

Фоминов Е.В. Зависимость температуры передней поверхности токарного резца от эволюционных изменений трибодеформационных показателей процесса обработки / Е. В. Фоминов, В. Е. Гвинджилия, Е. И. Фисунова, А. А. Марченко, В. В. Сухомлинова // Транспортное машиностроение. – 2024. - №2. – С.23-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-23-30.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE FRONT LATHE TOOL SURFACE ON EVOLUTIONARY CHANGES IN TRIBO-DEFORMATION INDICATORS OF PROCESSING

Evgeny Valeryevich Fominov^{1✉}, Valeria Enverievna Gwindzhilia², Elena Ivanovna Fisunova³,
Andrey Anatolyevich Marchenko⁴, Victoria Viktorovna Sukhomlinova⁵

^{1,2,3,4,5} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ fominoff83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

² vvgvindjiliya@donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>

³ fis62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4293-3426>

⁴ sigen-67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>

⁵ tobago13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>

Abstract

The study objective is modeling the temperature distribution on the surface of a heavily loaded tribocontact - front surface of a lathe tool - chips taking into account evolutionary changes in the cutting system.

The task to which the paper is devoted is to assess the influence of evolutionary changes of tribodeformation parameters of the cutting process on the average and maximum temperature of the front surface of the lathe tool.

Research methods. Contact temperatures are found out on the basis of mathematical modeling using data obtained during field experiments at longitudinal turning of 15X2HMΦA steel blanks without cooling by T15K6 hard alloy plates. During resistance tests, the chip contact length with the front surface and the chip reduction coefficient used for calculation are determined, as well as the average temperature in the cutting zone, the value of which is used to assess the adequacy of the results obtained by digital modeling.

The novelty of the work. Forecasting the temperature increase on the front surface of the cutter, taking into account the contribution of evolutionary changes in tribodeformation parameters of cutting.

The results of the study. In the studied cutting system, according to the results of resistance tests, a decrease in the chip reduction coefficient is recorded over the processing time. The temperature distribution on the front surface of the cutter is modeled in two versions: taking into account the evolutionary adjustment of the chip reduction coefficient and related parameters – sliding velocity and thickness of the plastically deformed layer in the chip, and without taking into account their changes. It is found out that modeling adjusted for changes in tribological indicators allows to obtain calculated values of the temperature of the front surface closest to the experimentally recorded of average temperature in the cutting zone.

Conclusions: Forecasting contact temperatures adjusted for evolutionary changes in tribodeformation parameters will allow to determine more accurately the moment in the evolution of the cutting system at which critical temperature values can be reached, and further processing is associated with the risk of critical wear or deterioration of the treated surface.

Keywords: temperature, cutting, turning, reduction, chips, deformations, tribosystem.

Funding: The study is carried out with the financial support of Engineering Company AEM-Technologii, agreement No. 160312622214 dated 04/14/2022.

Reference for citing:

Fominov EV, Gwindzhilia VE, Fisunova EI, Marchenko AA, Sukhomlinova VV. Temperature dependence of the front lathe tool surface on evolutionary changes in tribodeformation indicators of processing. *Transport Engineering*. 2024;2:23-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-23-30.

Введение

В процессе резания металлов выделяется значительное количество тепла из-за деформационных явлений в зоне обработки. Высокая температура способствует усилению адгезионного, диффузионного и окислительного видов износа режущего инструмента, сокращая срок его службы. Прогнозирование и контроль температуры

в зоне обработки является актуальной задачей, поскольку величина этого параметра тесно связана с силой резания, вибрациями и износом инструмента, а также является важным показателем производительности процесса обработки [1-3]. Нагрев передней поверхности токарного резца происходит в процессе тепловыделения на

участках первичных пластических деформаций (ППД), вторичных пластических деформаций (ВПД) и упругого контакта (УК), причём, наибольшего значения температура в зоне резания достигает в конце отрезка ВПД. Контроль максимальной температуры в процессе обработки является важной задачей, однако, её измерение сильно затруднено из-за физической недоступности контактной зоны. Наиболее распространённым способом оценки теплового состояния является мониторинг распределенной или средней температуры заготовки или же режущего инструмента за счёт размещения термопар различного типа в непосредственной близости от контактной зоны [4-6]. Определение температуры может осуществляться и на основании аналитического и конечно-элементного методов, причём наибольшей точности значения прогнозируемых показателей может быть достигнута в том случае, когда в качестве входных данных для модели используется ряд параметров, полученных в результате натурального эксперимента [6-9].

Сопряжение «передняя поверхность-обрабатываемый материал» на отрезке ВПД представляет собой тяжело нагружен-

Материалы, модели, эксперименты и методы

Натурные испытания и моделирование температурного распределения осуществлялись для процесса наружного продольного точения заготовок с исходным диаметром 120 мм и длиной 400 мм из стали 15Х2НМФА твердосплавными пластинами Т15К6 без применения охлаждения. Режимы обработки и геометрия режущей части: скорость резания $V=190$ м/мин, подача $s=0.195$ мм/об, глубина резания $t=1.0$ мм; передний угол $\gamma=10^\circ$, задний угол $\alpha=10^\circ$, главный угол в плане $\varphi=95^\circ$, радиус при вершине пластины $r=0.5$ мм. Средняя температура в зоне резания определялись при помощи лабораторного измерительно-

Результаты

Наиболее значимыми параметрами, определяющими характер температурного распределения согласно [10,11], являются скорость скольжения, длина трибоконтакта

ную трибосистему, выделение теплоты в которой происходит за счёт вязкой диссипации энергии трения в деформируемом поверхностном микрообъёме стружки. Применение гидродинамических аналогий к оценке этих деформационных явлений позволило получить аналитические зависимости, описывающие температурные распределения внутри деформированного слоя и вдоль участка ВПД [10,11]. Ряд трибологических и деформационных параметров процесса резания, определяющих форму температурной кривой и максимальные значения температуры, подвержены эволюционным изменениям в процессе функционирования системы резания. Таким образом, температурные характеристики трибоконтакта, рассчитанные для конечных этапов работы трибосистемы на основании исходных данных, справедливых лишь для начального времени процесса обработки, могут быть значительно искажены.

Настоящая статья посвящена моделированию температурного распределения на передней поверхности токарного резца с учётом эволюционных изменений трибодеформационных характеристик процесса резания.

го станда для токарной обработки STD 201.1 и цифровых преобразователей National Instruments. Износ по задней грани h_z и длина контакта на передней поверхности l_k пластин оценивались на металлографическом инвертированном микроскопе ЛабоМет-И4. Усадка стружки измерялась весовым методом на лабораторных весах Масса-К-150-1. Путь резания для одного прохода при стойкостных испытаниях составлял $L_p=789.2$ м, количество проходов для каждого эксперимента $N=9$. Критическое значение износа пластин по задней поверхности принималось $h_{kp}=0.15$ мм.

и толщина слоя ВПД в стружке. Все эти показатели подвержены изменениям в ходе эволюции системы резания. Так, скорость скольжения для трибосистемы «передняя

поверхность-обрабатываемый материал» определяется как $V_c=V/K_a$, где K_a – коэффициент усадки стружки. В исследуемой системе резания параметр K_a обнаруживает тенденцию к снижению в зависимости от выполняемого подхода при стойкостных испытаниях (рис. 1), следовательно, скорость скольжения стружки при этом будет несколько повышаться.

Также экспериментально установлена зависимость износа пластин по задней поверхности от количества выполненных проходов $h_3(N)$ и соответствующее изменение длины контакта по передней грани $l_k(N)$. Установление же опытным путём изменения толщины пластически деформированного слоя в стружке h в процессе эволюции системы резания представляет собой крайне сложную задачу. Известна зависимость этого параметра от теплофизических свойств обрабатываемого материала, действующих на поверхности касательных напряжений, а также от длины трибоконтакта. Таким образом, для учёта эволюционных изменений толщины слоя ВПД при моделировании может быть использована эмпирическая зависимость [2]:

$$h = \frac{\tau_k l_1}{\lambda T_{пл.}}$$

где τ_k – касательные напряжения на передней поверхности; l_1 – длина участка ВПД на передней поверхности, $l_1=l_k/2$; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; $T_{пл.}$ – температура плавления обрабатываемого материала.

Произведём моделирование температурного распределения на участке ВПД передней поверхности для проходов №3,5,7 и 9. Эти моменты в эволюции системы резания отражают следующие этапы развития износа инструмента по задней поверхности: $h_3 < h_{кр}$ для проходов №3,5; $h_3 \approx h_{кр}$ для прохода №7; $h_3 > h_{кр}$ для прохода №9 (рис.1).

При расчёте использованы трибодеформационные параметры, установленные опытным путём для конечной точки соответствующего прохода. Графическое представление математической модели наглядно демонстрирует влияние эволюционных изменений комплекса трибодеформацион-

ных параметров на температуру контакта по передней поверхности (рис. 2).

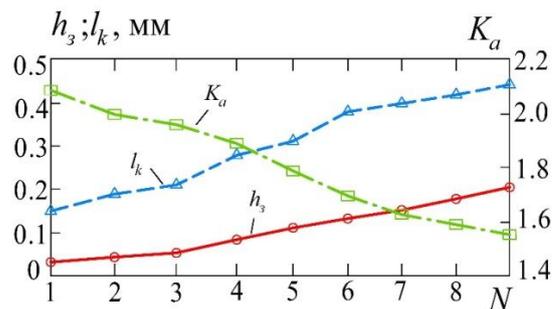


Рис.1. Изменение трибодеформационных показателей h_3 , l_k и K_a в зависимости от количества проходов N

Fig. 1. Changes in tribostrain parameters h_3 , l_k and K_a depending on the number of passes N

На рис. 3 представлены примеры измерения температуры $T_{ср.}$ в режиме реального времени τ для проходов №1 и 7 без этапа врезания. По результатам экспериментальных измерений средняя температура в зоне резания возрастала как со временем обработки в пределах одного прохода, так и с увеличением количества выполняемых проходов.

Средняя температура в зоне резания, которая достигается к концу каждого выполняемого прохода по итогам экспериментальных измерений, представлена в таблице. Сравнение этих данных со значениями средней расчётной температуры контакта на участке ВПД $T_{к.ср.}$ (температура в точке, соответствующей $X=l_1/2$) и максимальной расчётной температуры передней поверхности $T_{к.мах}$ хорошо соотносится с результатами моделирования.

Наименьшее относительное отклонение расчётного значения $T_{к.ср.}$ от фактической температуры в зоне обработки $T_{ср.}$, определяемое как $\delta=(T_{ср.} - T_{к.ср.})/T_{ср.}$, характерно для последних проходов. Такое расхождение результатов для начальных и конечных этапов стойкостных испытаний может объясняться погрешностью при определении длины и площади трибоконтакта на передней поверхности при визуальной оценке посредством оптической микроскопии, в результате чего используемое для расчёта значение l_k может быть ниже своей реальной величины.

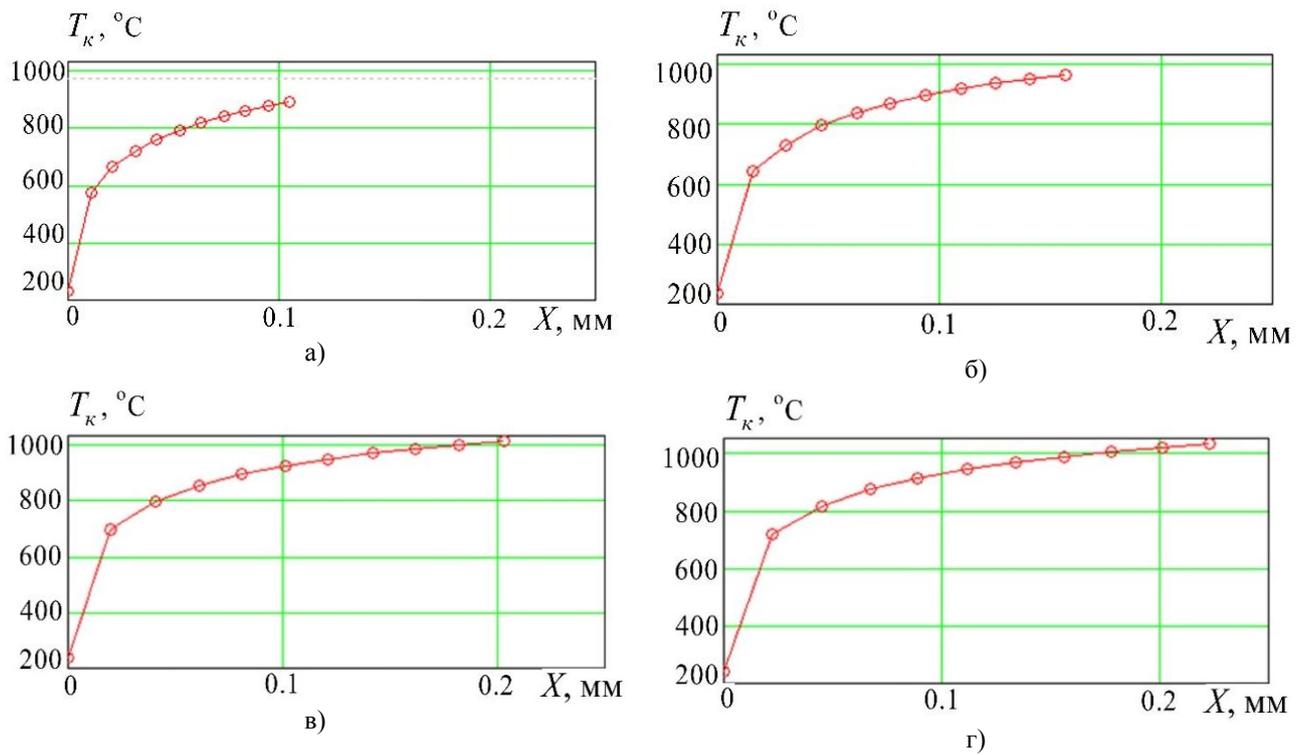


Рис. 2. Распределение температуры T_k вдоль передней поверхности резца ($X=0 \dots l_1$) для количества проходов: а – $N=3(2209 \text{ м})$; б – $N=5(3546 \text{ м})$; в – $N=7(4787 \text{ м})$; г – $N=9(6031 \text{ м})$
 Fig. 2. Temperature distribution T_k along the rake face of the lathe cutter ($X=0 \dots l_1$) for the passage: а – $N=3(2209 \text{ m})$; б – $N=5(3546 \text{ m})$; в – $N=7(4787 \text{ m})$; г – $N=9(6031 \text{ m})$

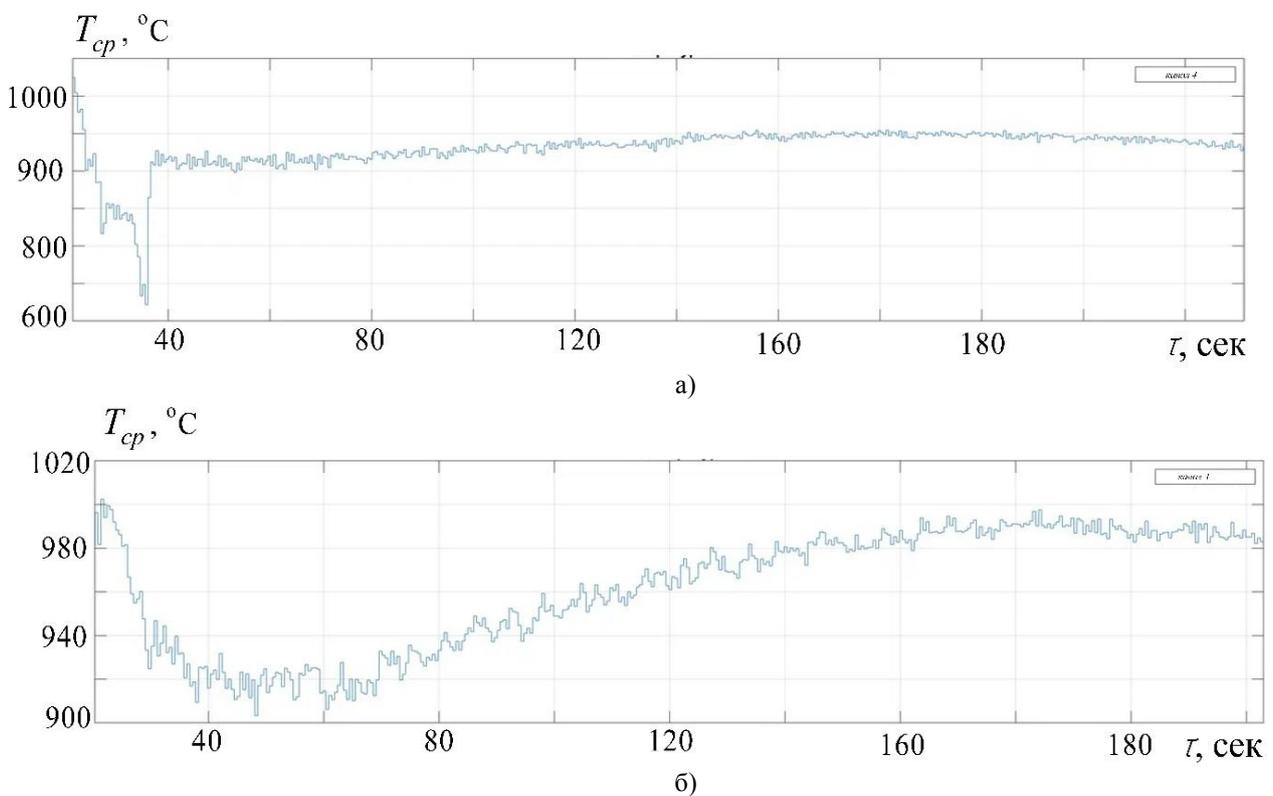


Рис.3. Зависимость температуры в зоне резания T_{cp} от времени обработки τ для прохода: а – $N=1(763 \text{ м})$; б – $N=7(4787)$
 Fig. 3. Dependence of temperature in the cutting zone T_{avg} on processing time τ for the passage: а – $N=1(763 \text{ m})$; б – $N=7(4787 \text{ m})$

Thermodynamic characteristics of turning

№ прохода	L_p , м	T_{cp} , °C	$T_{k,cp}$, °C	δ , %	$T_{k,max}$, °C
1	763,2	915	812	11,3	928
3	2209,7	920	820	10,8	952
5	3546,2	938	870	7,2	980
7	4787,1	976	920	5,7	1010
9	6031,5	992	940	5,2	1035

По мере усиления износа режущей части следы фактического контакта стружки с пластиной становятся более явными, что повышает точность используемых для моделирования геометрических данных трибоконтакта.

Значения контактных температур, рассчитанные для последних проходов с

использованием коэффициента усадки стружки, характерного для начального этапа обработки ($K_a = \text{const} = 2,09$), будут ниже, при этом расхождение с опытными данными увеличиться (рис. 4). Так, для прохода №9 средняя температура контакта в этом случае $T_{k,cp} = 870^\circ\text{C}$, а относительная погрешность составит $\delta = 12,3\%$.

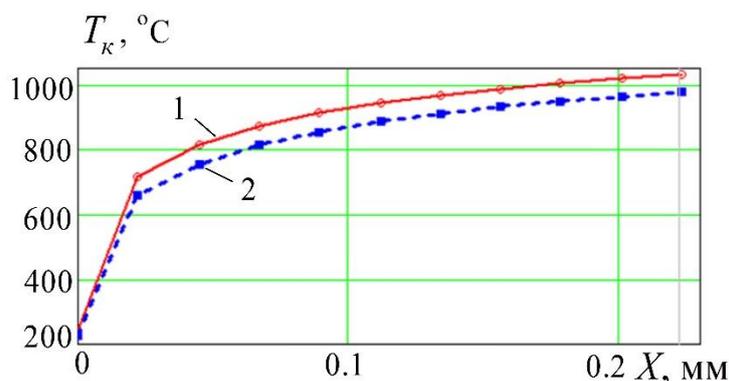


Рис. 4. Сравнение температур передней поверхности, рассчитанных при $K_a = f(\tau)$ (1) и $K_a = \text{const}$ (2) для прохода № 9

Fig. 4. Comparison of rake face temperatures calculated at $K_a = f(\tau)$ (1) and $K_a = \text{const}$ (2) for the passage № 9.

Заключение

Произведено моделирование температурного распределения на передней поверхности токарного резца для различных этапов функционирования системы резания при продольном наружном точении стали 15X2НМФА без применения охлаждения. Дополнительно к основному фактору, способствующему росту температуры, – увеличению длины трибоконтакта за счёт процесса изнашивания, в математической модели были учтены эволюционные изменения деформационных характеристик процесса обработки. В исследуемой системе резания по результатам натурных экспериментов было зафиксировано сни-

жение коэффициента усадки стружки, вызванное изменением геометрических параметров режущей части на фоне износа инструмента. Перестройка основных характеристик работы трибосистемы, а именно скорости скольжения и толщины пластически деформированного слоя в стружке, вызванная уменьшением K_a , способствует дополнительному росту температуры контакта. Сравнение средней расчётной температуры передней поверхности и средней температуры в зоне резания, измеренной в ходе эксперимента, показало, что учёт эволюции трибодеформационных показателей

позволяет получить более точные результаты моделирования.

Прогнозирование средней и максимальной контактных температур с поправкой на эволюционные изменения трибодинамических показателей позволит точнее определить временной отрезок в работе инструмента, на котором высока веро-

ятность достижения критических значений температуры. Дальнейшее использование режущей пластины в этом случае может привести к интенсификации окислительного и диффузионного видов изнашивания или ухудшению качества обработанной поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рыжкин А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: моногр. / А. А. Рыжкин; Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 289 с.
2. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов /А. А. Рыжкин. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2005. 311 с.
3. Заковоротный В.Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2017;17(3):14-26.
4. Лебедев В.А. Термоэлектрические характеристики процесса точения стальных заготовок твердосплавными пластинами с комбинированными покрытиями. Трение и износ. 2023; 44(2):114-121.
5. Kesriklioglu S. Characterization of Tool–Chip Interface Temperature Measurement With Thermocouple Fabricated Directly on the Rake Face. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2019;141:091008
6. Ślusarczyk Ł. Experimental-Analytical Method for Temperature Determination in the Cutting Zone during Orthogonal Turning of GRADE 2 Titanium Alloy. Materials. 2021;14(15): 4328.
7. Фоминов Е.В. Моделирование температурного распределения на передней поверхности токарного резца с учётом геометрических параметров зоны вторичных пластических деформаций. Транспортное машиностроение. 2023; 2(14): 4–11.
8. Ahmed W. et al. Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method, Journal of Manufacturing Processes. 2021;61:100-110.
9. Veiga F. et al. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity. International Journal of Mechanical Sciences. 2021;204: 106524.
10. Чичинадзе А.В. Температурный режим при трении инструментальных материалов с учётом объёмности источника тепловыделения. Трение и износ. 1986;7:43-51.
11. Рыжкин А.А. Применение гидродинамических аналогий для оценки контактной температуры инструмента при высокоскоростной обработке. Вестник ДГТУ. Сер. Трение и износ. 2000;3:35-42.

REFERENCES

1. Ryzhkin AA. Synergetics of tool materials wear during edge cutting machining: monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2019.
2. Ryzhkin AA. Thermalphysic processes during wear of tool cutting materials. Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU; 2005.
3. Zakovorotny VL. Effect of heat generation on dynamics of cutting process. Advanced Engineering Research. 2017;17(3):14-26.
4. Lebedev VA. Thermoelectric characteristics of the process steel turning by carbide inserts with combined coatings. Friction and Wear. 2023; 44(2):114-121.
5. Kesriklioglu S. Characterization of tool–chip interface temperature measurement with thermocouple fabricated directly on the rake face. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2019;141:091008
6. Ślusarczyk Ł. Experimental-analytical method for temperature determination in the cutting zone during orthogonal turning of GRADE 2 titanium alloy. Materials. 2021;14(15): 4328.
7. Fominov EV. Modeling of the temperature distribution on the lathe front surface taking into account geometric parameters of the secondary plastic zone. Transport Engineering. 2023;2:(14): 4–11.
8. Ahmed W. Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method, Journal of Manufacturing Processes. 2021;6:100-110.
9. Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity. International Journal of Mechanical Sciences. 2021;204:106524.

10. Chichinadze AV. Temperature mode during friction of tool materials taking into account the volume of the heat source. *Friction and Wear*. 1986;7:43-51.

11. Ryzhkin AA. Application of hydrodynamic analogies to estimate the contact temperature of a tool during high-speed processing. *Advanced Engineering Research. Friction and Wear*. 2000;3:35-42.

Информация об авторах:

Фоминов Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, тел. +7(918)507-54-43, доцент, международные идентификационные номера автора Researcher ID: V-77225-2018, Scopus ID 57188653761, ORCID 0000-0002-0165-7536, e-mail: fominoff83@mail.ru.

Гвинджилия Валерия Энвериевна – кандидат технических наук, тел. + 7(988) 256-74-33, старший преподаватель, международные идентификационные номера автора ResearcherID: AAM-4580-2020, ScopusID 57204638971, ORCID: 0000-0003-1066-4604, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru.

Fominov Evgeny Valeryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; phone: +7(918)507-54-43; Researcher ID: V-77225-2018, Scopus ID 57188653761, ORCID 0000-0002-0165-7536, e-mail: fominoff83@mail.ru.

Gwindzhilia Valeria Enverievna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; phone: + 7(988) 256-74-33, Researcher ID: AAM-4580-2020, ScopusID 57204638971, ORCID: 0000-0003-1066-4604, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru.

Фисунова Елена Ивановна – кандидат технических наук, тел. +7(918)540-54-48, доцент, международные идентификационные номера автора Scopus ID 57204675107, ORCID 0000-0003-4293-3426, e-mail: fis62@mail.ru.

Марченко Андрей Анатольевич – аспирант, тел. :+7 (812) 331-93-31, международные идентификационные номера автора: ORCID 0000-0003-4028-6712, ScopusID, e-mail: tobago13@yandex.ru.

Сухомлинова Виктория Викторовна – старший преподаватель, тел.+7(903)4342716, SPIN-код 3356-3382, международные идентификационные номера автора ORCID: 0000-0001-5436-4756, e-mail: sigen67@mail.ru.

Fisunova Elena Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; phone: tel. +7(918)540-54-48, Scopus ID 57204675107, ORCID 0000-0003-4293-3426, e-mail: fis62@mail.ru.

Marchenko Andrey Anatolyevich – Postgraduate Student; phone:+7 (812) 331-93-31, ORCID 0000-0003-4028-6712, ScopusID, e-mail: tobago13@yandex.ru.

Sukhomlinova Victoria Viktorovna – Senior Lecturer; phone: +7(903)4342716, SPIN code 3356-3382, ORCID: 0000-0001-5436-4756, e-mail: sigen67@mail.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 09.01.2024; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 26.01.2024. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 09.01.2024; approved after review on 12.01.2024; accepted for publication on 26.01.2024. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.