



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ТРИБОДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10ГН2МФА**

**TRIBODEFORMATION AND THERMODYNAMIC INDICATORS OF THE FINISH TURNING PROCESS OF HEAT-RESISTANT STEEL 10GN2MFA**

**Марченко Андрей Анатольевич**, аспирант, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, e-mail: [tobago13@yandex.ru](mailto:tobago13@yandex.ru)

**Marchenko Andrey Anatolyevich**, Postgraduate student, Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: [tobago13@yandex.ru](mailto:tobago13@yandex.ru)

**Аннотация.** Данная статья посвящена оценке связи между трибодформационными и термодинамическими показателями процесса обработки жаропрочной реакторной стали. Экспериментально исследован процесс продольного чистового точения стали 10ГН2МФА пластинами твёрдого сплава Т15К6 без применения охлаждения при различных режимах резания. На основании полученных опытных путём трибодформационных показателей процесса произведено математическое моделирование температурного распределения на передней поверхности резца. Установлено, что в исследованном диапазоне режимов обработки кривые зависимости температуры резания, максимальной расчётной температуры передней поверхности резца, а также интенсивности изнашивания пластин от скорости резания проходят через минимум. Наибольшей износостойкости инструмента соответствует диапазон скоростей обработки, при которых температура передней поверхности резца минимальна, при этом снижение общей температуры резания фиксируется в области более низких скоростей точения.

**Annotation.** This article is devoted to assessing the relationship between tribodeformation and thermodynamic parameters of the heat-resistant reactor steel processing process. The process of longitudinal finishing turning of 10GN2MFA steel with T15K6 hard alloy plates without cooling under various cutting modes has been experimentally investigated. Based on the experimental tribodeformation parameters of the process, mathematical modeling of the temperature distribution on the front surface of the cutter was performed. It is established that in the studied range of processing modes, the curves of the dependence of the cutting temperature, the maximum calculated temperature of the front surface of the cutter, as well as the wear rate of the plates on the cutting speed pass through a minimum. The maximum wear resistance of the tool corresponds to the range of machining speeds at which the temperature of the front surface of the die is minimal, while a decrease in the overall cutting temperature is recorded in the area of lower turning speeds.

**Ключевые слова:** ПРОДОЛЬНОЕ ТОЧЕНИЕ, ЖАРОПРОЧНАЯ СТАЛЬ, ТВЁРДЫЙ СПЛАВ, ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ, ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННАЯ ТРИБОСИСТЕМА, УСАДКА СТРУЖКИ, ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ.

**Keywords:** LONGITUDINAL TURNING, HEAT-RESISTANT STEEL, HARD ALLOY, CUTTING TEMPERATURE, HEAVILY LOADED TRIBOSYSTEM, CHIP SHRINKAGE, PLASTIC DEFORMATIONS, WEAR INTENSITY.

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивное тепловыделение в ходе резания металлов является причиной проявления ряда негативных факторов, существенно снижающих эффективность процесса обработки. К ним относится ухудшение физико-механических свойств инструментального режущего материала (ИРМ), наростообразование на рабочих поверхностях режущего инструмента (РИ), интенсификация диффузионного и окислительного видов изнашивания, снижение качества обработанной поверхности и пр. [1]. При этом на процесс изнашивания ИРМ влияет не только среднее значение температуры, но и характер температурного распределения на рабочих гранях инструмента и прилегающих к ним поверхностных объёмах ИРМ [2, 3]. Температура контактной зоны в значительной степени зависит от режимов резания, поэтому её величина способна ограничивать производительность процесса обработки. Оценка термодинамических явлений в зоне резания различными методами является актуальной темой многочисленных исследований [4-12]. В настоящее время увеличивается число предприятий металлообрабатывающей отрасли, стремящихся к сокращению использования смазывающе-охлаждающих технологических сред (СОТС), либо же вообще к полному отказу от них [11, 12]. В этой связи разработка надежных методов контроля и прогнозирования теплового состояния зоны резания становятся все более важной, особенно при резании материалов с низкой теплопроводностью [4, 9-11].

Тепловыделение в зоне резания происходит на участках первичных деформаций (ПД), вторичных деформаций (ВД) и упругого контакта (УК) на рабочих гранях РИ. Максимальной величины температура в контактной зоне достигает на границе зон ВД и УК на передней поверхности РИ; в этом же месте происходит формирование лунки износа. Протекающие на передней поверхности РИ теплофизические процессы не только напрямую определяют ряд показателей процесса резания в целом, но и тесно связаны с контактными явлениями и износом по задней грани. Так, для большинства скоростей резания виды контактного взаимодействия по передней и задней граням во многом идентичны, а характер тепловыделения на передней поверхности в значительной степени определяет температуру и ход протекания процессов изнашивания на задней грани РИ [13, 14]. Сопряжения «передняя поверхность инструмента – стружка» и «задняя поверхность инструмента – заготовка» на участках ВД представляет собой параллельно функционирующие тяжело нагруженные трибосистемы. Их входные характеристики (скорость скольжения, касательные напряжения и др.) определяются как непосредственно самими режимами резания, так и особенностями протекания деформационных процессов на участке ПД и ВД, имеющих место при этих режимах. Применение А.В. Чичинадзе и К.Г. Шучевым гидродинамических аналогий к оценке деформационных процессов в обрабатываемом материале на участке ВД позволило получить аналитические зависимости, описывающие температурное распределение внутри деформируемого микрообъёма, а также вдоль участка ВД на рабочих поверхностях РИ [15]. В этом случае поверхностный деформируемый микрообъём в материале заготовки (стружке) рассматривается в качестве зоны квазивязкого течения материала с объёмно распределённым источником тепловыделения, функционирующим за счёт вязкой диссипации энергии трения.

Широкое распространение в качестве материала для изготовления деталей в различных сферах энергетического машиностроения получила жаропрочная высоколегированная сталь 10ГН2МФА. Чистовая токарная обработка деталей из этого материала может осуществляться без

применения СОТС, и в этом случае важной задачей является выбор режимов резания, обеспечивающих минимальные контактные температуры и высокое качество обработанной поверхности.

Данная работа посвящена исследованию трибодеструкционных характеристик процесса обработки и оценке теплового состояния контактной зоны на передней поверхности резца при наружном чистовом точении заготовок из жаропрочной стали 10ГН2МФА без применения охлаждения.

## 2 Материалы и методы

Исследован комплекс характеристик наружного продольного точения заготовок из стали 10ГН2МФА диаметром  $D = 160$  мм и длиной 400 мм на чистовых режимах обработки. Опыты проводились на модернизированном универсальном токарном станке с системой бесступенчатого регулирования оборотов шпинделя Mitsubishi. Фактическая твёрдость обрабатываемого материала определялась при помощи твердомера комбинированного портативного Мет-УДА. Обработка осуществлялась твердосплавными пластинами Т15К6 с покрытием на следующих режимах: скорость резания  $V = 100-240$  м/мин, подача  $s = 0,097-0,26$  мм/об, глубина резания  $t = 0,5$  мм. Геометрические параметры режущей части: передний угол  $\gamma = 10^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 10^\circ$ ; главный угол в плане  $\varphi = 95^\circ$ . Общая температура в зоне резания  $T$ , а также силы резания по трём координатным осям  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  фиксировались в режиме реального времени при помощи измерительного лабораторного стенда STD 201.1. Оценка теплового состояния зоны резания осуществляется на данном стенде методом измерения термоЭДС, для чего предварительно проводилась тарировка термопары.

Коэффициент усадки стружки  $K_a$  определялся весовым методом с применением лабораторных весов Масса-К-150-1. Величина износа по задней грани  $h_z$  и геометрические параметры площадки контакта по передней поверхности измерялись на металлографическом инвертированном микроскопе ЛабоМЕТ-И4 с цифровой системой визуализации. Моделирование температурного распределения на рабочих поверхностях резца осуществлялось по зависимости Чичинадзе-Шучева [14] с использованием части параметров, полученных опытным путём: коэффициента усадки стружки  $K_a$ , длины  $l_k$ , площади  $A_k$  и периметра  $P_k$  контакта стружки с передней поверхностью резца, фактического предела прочности заготовок. Обработка результатов экспериментов производилась с использованием стандартных функций дисперсионного анализа программы MathCAD.

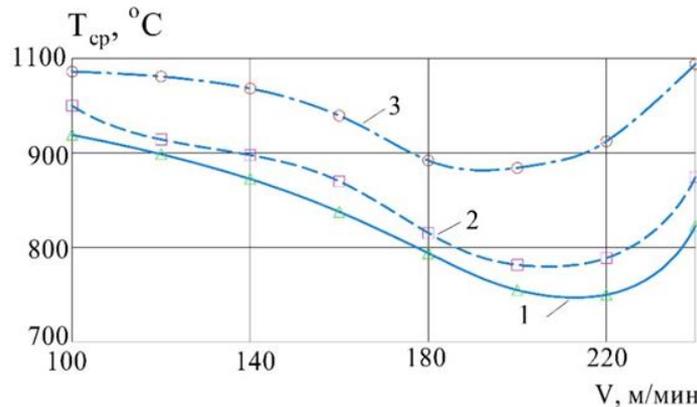
## 3 Результаты исследований

Средняя температура в зоне обработки  $T_{cp}$  для каждого режима определялась на основании показаний измерительного стенда для участка установившегося резания. По результатам экспериментов установлено, что зависимости  $T_{cp}(V)$  носят экстремальный характер (рис.1). При этом диапазон скоростей резания, обеспечивающих минимальные значения температуры, смещается с ростом подачи в область более низких скоростей.

Произведём моделирование температурных распределений на участке ВД передней поверхности резца для подачи  $S = 0,26$  мм/об. Геометрические параметры площадок контакта на рабочих поверхностях пластины при равных значениях пути резания  $L$  для различных скоростей обработки существенно отличаются. Поэтому для моделирования при каждой скорости  $V$  выделим такой квазистатический момент в эволюции системы резания, когда износ по задней поверхности достигает критического значения,  $h_z = h_{кр} \approx 0,12$  мм. В такой момент длину трибоконтакта на задней грани (одного из ключевых параметров, определяющих контактную температуру согласно [14]) для всех скоростей диапазона можно считать одинаковой, при этом геометрические параметры контактной зоны на передней поверхности будут значительно различаться. Это позволит уменьшить влияние геометрического фактора на температуру задней поверхности и его вклад в общую температуру в зоне резания. Таким образом, по результатам

моделирования возможно с большой степенью точности оценить взаимосвязь скорости резания, износа РИ и общей температуры в зоне обработки, с одной стороны, и теплового состояния участка ВД на передней поверхности пластины, с другой стороны.

По результатам стойкостных испытаний для каждого значения  $V$  установлен путь резания  $L$ , соответствующий возникновению критического износа по задней грани, а также определены геометрические параметры контакта на передней поверхности в этот момент – длины  $l_k$ , площади  $A_k$  и периметра  $P_k$  контакта (рис. 2).



1 –  $S = 0,097$  мм/об; 2 –  $S = 0,15$  мм/об; 3 –  $S = 0,195$  мм/об

Рисунок 1 – Кривые зависимости средней температуры в зоне резания  $T_{ср}$  от скорости обработки  $V$  при различных подачах  $S$

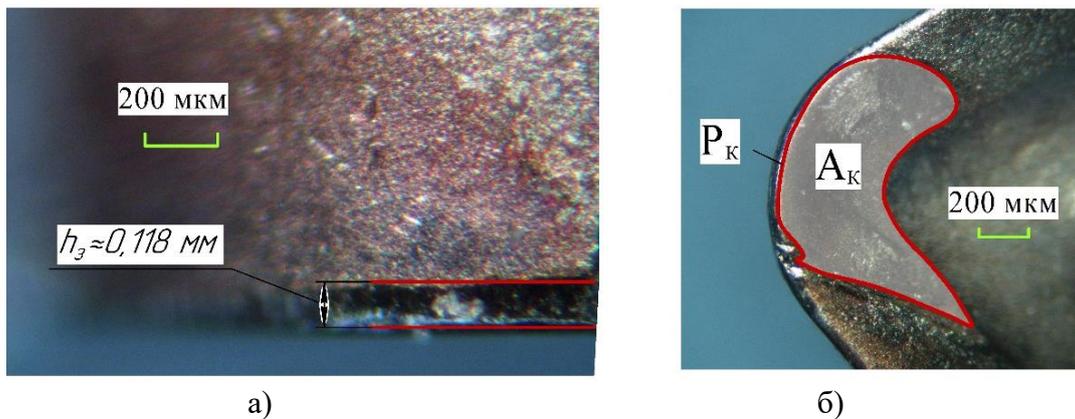


Рисунок 2 – Величина износа по задней грани  $h_z$  (а) и оценка геометрических параметров контакта на передней поверхности пластины (б) при  $V = 160$  м/мин,  $S = 0,26$  мм/об,  $L = 3267$  м

Также в качестве входных данных для математической модели [14] используется толщина пластически деформированного слоя в стружке  $h$  и величина касательных напряжений  $\tau_k$ , причём связь этих параметров может быть описана эмпирической зависимостью [1]:

$$h = \frac{\tau_k \cdot \left(\frac{l_k}{2}\right)}{\lambda \cdot T_{пл}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  и  $T_{пл}$  – коэффициент теплопроводности и температура плавления обрабатываемого материала соответственно.

Среднее значение касательных напряжений примем равным  $\tau_k = F_{XY} / A_k$ , где  $F_{XY}$  – результирующая сила резания для продольного (X) и радиального (Y) направлений. Это позволит учесть влияние изменений сил резания и геометрических характеристик пятна контакта на параметры  $h$  и  $\tau_k$  при различных скоростях обработки. В табл. 1 представлены триботехнические показатели процесса обработки, полученные опытным путём (столбцы 3-7) и параметры, рассчитанные на их основании (столбцы 8-10).

На рис. 3 представлены примеры температурного распределения на участке ВД передней поверхности  $T_{III}(x)$ , где  $x = 0 \dots l_k/2$  для скоростей резания 100 и 240 м/мин. Максимальные температуры достигаются на передней поверхности при различных длинах  $l_k$ , а их величина  $T_{III}$  и форма кривой определяется комплексом трибодеформационных показателей при этих режимах обработки.

Таблица 1 – Триботехнические параметры процесса точения стали 10ГН2МФА

№	V, м/мин	$K_a$	$F_{XY}$ , Н	$l_k$ , мм	$A_k$ , мм <sup>2</sup>	$P_k$ , мм	$V_c$ , м/мин	$\tau_k$ , МПа	$h$ , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	2,455	136	0,481	0,38	2,95	40,7	356	16
2	130	2,230	126	0,458	0,371	3,05	58,3	340	14
3	160	2,037	136	0,390	0,397	3,12	78,5	343	13
4	190	1,975	131	0,321	0,417	2,93	96,2	314	10
5	220	1,823	133	0,414	0,351	3,08	120,7	321	10
6	240	1,771	137	0,411	0,416	3,17	135,5	329	11

Представленные на рис. 3 расчётные значения  $T_{III}(x)$  характеризуют мгновенную температуру, возникающую на контакте за счёт тепловыделения в пластически деформированном слое стружке при её взаимодействии с поверхностью инструмента, и не учитывают термодиссипацию внутри поверхностных объёмов ИРМ режущей пластины.

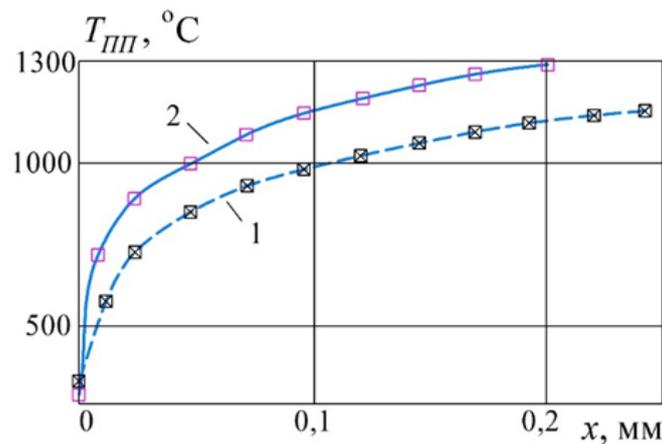


Рисунок 3 – Распределение температуры на участке ВД передней поверхности при скоростях резания: 1 – V = 100 м/мин; 2 – V = 240 м/мин

Интенсивности изнашивания РИ при различных скоростях обработки  $J(V)$  и теплового состояния зоны резания для данной скорости, характеризуемого средней температурой в зоне резания и максимальной температурой передней поверхности представлены на рис. 4. Видно, что параметр  $T_{ср}$  принимает свои наименьшие значения в области  $V = 160$  м/мин. При этом минимальные величины интенсивности изнашивания  $J$  соответствуют более высоким скоростям обработки (180-200 м/мин), причём именно в этом диапазоне скоростей температура передней поверхности  $T_{III}^{max}$  пластин характеризуется минимальными значениями.

#### 4 Обсуждение и заключение

В результате исследования процесса продольного чистового точения заготовок из жаропрочной стали 10ГН2МФА были установлены зависимости триботехнических и термодинамических показателей от режимов резания. Произведено моделирование температурного распределения на передней поверхности резца при различных сочетаниях величины подачи и скорости обработки с использованием ряда экспериментальных триботехнических параметров. Были построены кривые температурного распределения на передней поверхности режущей пластины для таких квазистатических моментов в эволюции системы резания, при которых соблюдается равенство длины контакта по задней поверхности. При анализе влияния теплового состояния передней поверхности на процесс изнашивания инструмента и среднюю температуру в зоне резания это позволило минимизировать погрешность от разницы в геометрических параметрах пятна контакта на задней грани.

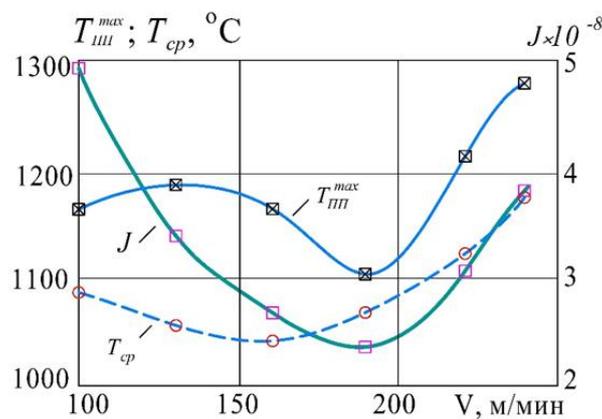


Рисунок 4 – Зависимости интенсивности изнашивания  $J$ , средней температуры резания  $T_{cp}$  и максимальной температуры передней поверхности от скорости резания  $V$  при постоянной подаче  $S = 0,26$  мм/об

По результатам экспериментальных данных и моделируемых показателей установлено, что зависимость средней и максимальной температуры в зоне обработки, а также износа пластин от скорости резания в исследованном диапазоне режимов носят экстремальный характер. При этом наиболее низкие значения интенсивности изнашивания пластин наблюдаются в том случае, когда температура передней поверхности минимальна. В этом диапазоне скоростей резания формируется такой комплекс трибологических и деформационных показателей процесса обработки, определяющих входные параметры объемно распределённого источника тепловыделения в пластически деформируемом поверхностном микрообъёме стружки, при которых значения мгновенных температур нагрева поверхности тяжёлонагруженного трибоконтакта «передняя грань инструмента – стружка» значительно ниже в сравнении с другими скоростными режимами. Такой режим функционирования трибосистемы трибоконтакта «передняя грань инструмента – стружка» способствует снижению градиента температур в режущем клине, что сопровождается повышением износостойкости инструмента.

#### Список литературы

- 1 Рьжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: монография // Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2019. – 289 с.
- 2 Алиев, М.М. Влияние износостойких покрытий на теплофизические процессы в контактной зоне при резании конструкционных материалов / М.М. Алиев, А.В. Фоменко, Е.В. Фоминов, К.Г. Шуцев, А.Е. Мироненко // Вестник машиностроения, 2023. – №7. – С. 596–600.

- 3 Фоминов, Е.В. Влияние покрытий на основе нитридов циркония и титана на трибодетформационные процессы трения в условиях резания твердосплавными пластинами / Е.В. Фоминов, М.М. Алиев, А.В. Фоменко, К.Г. Шучев // Трение и износ, 2024. – С. 29–37.
- 4 Гвинджилия В.Е. Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА / В.Е. Гвинджилия, Е. В. Фоминов, А.А. Марченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2025. – Т. 27, № 3. – С. 23-26.
- 5 Фоминов, Е.В. Влияние периодических флуктуаций параметров режимов резания на температуру передней поверхности токарного резца / Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, К.Г. Шучев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don), 2025. – Т. 25, № 1. – С. 32–42.
- 6 Заковоротный, В.Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В.Л. Заковоротный // Вестник Донского государственного технического университета, 2017. – №17. – С. 14–26.
- 7 Фоминов Е.В. Оценка трибодетформационных и термоэлектрических характеристик процесса трения при точении гибридной детали со сварным швом / Е.В. Фоминов, М.М. Алиев, К.Г. Шучев, Т.В. Лавренова // Трение и износ, 2025. – Т. 46, № 2. – С. 127-135.
- 8 Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity / F.Veiga, M. Arizmendi, A. Jiménez, A. G. D. Val // International Journal of Mechanical Sciences, 2021; 204: 106524.
- 9 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.
- 10 Ślusarczyk, Ł.; Twardowska, A. Method for Determining Contact Temperature of Tool Rake Face During Orthogonal Turning of Ti-6Al-4V Alloy / Ł. Ślusarczyk, A. Twardowska // Materials, 2025, 18, 2980. <https://doi.org/10.3390/ma18132980>
- 11 Binali R. Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology // Metals, 2023; 13:1088.
- 12 Mane, S. Analysis of Thermal Aspect in Hard Turning of AISI 52100 Alloy Steel Under Minimal Cutting Fluid Environment Using FEM / S. Mane, R.B. Patil, M.L. Kolhe, A. Roy, A.G. Kamble, A. Chaudhari // Appl. Mech. 2025, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/applmech6020026>
- 13 Резников А. Н. Теплофизика резания // М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
- 14 Талантов Н. В. Влияние скорости резания на закономерности контактных процессов и износ инструмента // Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – С. 77–83.
- 15 Чичинадзе А.В. Температурный режим при трении инструментальных материалов с учётом объёмности источника тепловыделения / А.В. Чичинадзе, К.Г. Шучев, А.А. Рыжкин, А.И. Филипчук, М. М. Климов // Трение и износ, 1986. – №7. – С. 43–51.

## References

- 1 Ryzhkin A. A. Synergetics of Wear of Tool Materials in Bladed Processing: Monograph // Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2019. P. 289.
- 2 Aliev M.M. Influence of Wear-Resistant Coatings on Thermophysical Processes in the Contact Zone during Machining of Structural Materials / M.M. Aliev, A.V. Fomenko, E.V. Fominov, K.G. Shuchev, A.E. Mironenko // Bulletin of Mechanical Engineering, 2023, No. 7. – P. 596–600.
- 3 Fominov E.V. Influence of Zirconium and Titanium Nitride-Based Coatings on Tribo-Deformation Processes of Friction in Conditions of Cutting with Carbide Inserts / E.V. Fominov, M.M. Aliev, A.V. Fomenko, K.G. Shuchev // Friction and Wear, 2024. – P. 29–37.
- 4 Gvindzhilia V.E. Influence of Cutting Speed on Pulsed Temperature Changes of the Tool's Front Surface During Turning of Heat-Resistant Steel 15Kh2NMFA / V.E. Gvindzhilia, E.V. Fominov, A.A. Marchenko // Metalworking (Technology, Equipment, Tools), 2025. – Vol. 27, No. 3. – P. 23-26.
- 5 Fominov E.V. Influence of Periodic Fluctuations of Cutting Mode Parameters on the Temperature of the Lathe Tool's Front Surface / E.V. Fominov, A.A. Marchenko, K.G. Shuchev // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don), 2025. – Vol. 25, No. 1. – P. 32–42.
- 6 Zakovorotny V.L. Influence of Heat Generation on the Dynamics of the Cutting Process / V.L. Zakovorotny // Bulletin of Don State Technical University, 2017. – No. 17. – P. 14–26.
- 7 Fominov E.V. Assessment of tribo-deformation and thermoelectric characteristics of the friction process during turning of a hybrid part with a welded seam / E.V. Fominov, M.M. Aliev, K.G. Shuchev, T.V. Lavrenova // Friction and Wear, 2025. – Vol. 46, No. 2. – P. 127-135.

8 Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity / F. Veiga, M. Arizmendi, A. Jiménez, A.G.D. Val // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021; 204: 106524.

9 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.

10 Ślusarczyk, Ł.; Twardowska, A. Method for Determining the Contact Temperature of the Tool Rake Face During Orthogonal Turning of Ti-6Al-4V Alloy / Ł. Ślusarczyk, A. Twardowska // *Materials*, 2025, 18, 2980. <https://doi.org/10.3390/ma18132980>

11 Binali R. Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology // *Metals*, 2023; 13:1088.

12 Mane, S. Analysis of the Thermal Aspect in Hard Turning of AISI 52100 Alloy Steel Under Minimal Cutting Fluid Environment Using FEM / S. Mane, R.B. Patil, M.L. Kolhe, A. Roy, A.G. Kamble, A. Chaudhari // *Appl. Mech.* 2025, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/applmech6020026>

13 Reznikov A. N. *Heat Physics of Cutting* // Moscow: Mashinostroenie, 1969. – P. 288.

14 Talantov N. V. Influence of Cutting Speed on Patterns of Contact Processes and Tool Wear // *Prospects for the Development of Cutting of Structural Materials*. – Moscow, 1980. – P. 77–83.

15 Chichinadze A.V. Temperature Regime during Friction of Tool Materials Considering the Heat Source Volume / A.V. Chichinadze, K.G. Shuchev, A.A. Ryzhkin, A.I. Filipchuk, M. M. Klimov // *Friction and Wear*, 1986. - No. 7. – P. 43–51.

© Марченко А. А., 2025