



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА

Валерия Гвинджилия^{a, *}, Евгений Фоминов^b, Андрей Марченко^c,
Татьяна Лавренова^d, Светлана Дебеева^e

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vvgvindjiliya@donstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>,  fominoff83@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>,  tobago13@yandex.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-8283-7730>,  bys_ka87@mail.ru;
^e  <https://orcid.org/0000-0002-2796-2424>,  sve_tchk@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06

История статьи:

Поступила: 13 апреля 2025
 Рецензирование: 25 апреля 2025
 Принята к печати: 21 мая 2025
 Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Продольное точение
 Жаропрочная сталь
 Кинематические возмущения
 Температура передней поверхности

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена оценке влияния периодических флуктуаций параметров режимов обработки на изменение максимальной температуры передней поверхности резца. **Предмет.** Как флуктуации параметров режимов резания рассматриваются колебания их значений относительно номинального, вследствие чего возникают периодические изменения площади срезаемого слоя и условий взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента, которые влияют на изменение температуры в зоне резания. **Цель работы:** оценить влияние периодических флуктуаций параметров режимов обработки для различных скоростей резания на изменение максимальной величины температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА на станке с большим сроком эксплуатации без применения охлаждения. **Метод и методология.** Исследован процесс чистового продольного точения жаропрочной стали 15X2НМФА на станке с большим сроком эксплуатации без применения охлаждения. В ходе обработки произведено измерение вибраций инструмента по трём координатным осям при варьировании скорости резания для постоянной глубины резания и подачи. При помощи цифрового имитационного моделирования с использованием входных данных, полученных из натуральных экспериментов, выявлены моменты в динамике системы, когда каждый из режимов резания в результате флуктуаций принимает экстремальные значения, а затем определены соответствующие им отклонения максимальной расчётной температуры от номинальной величины. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что при вариации скорости обработки происходит изменение дестабилизирующих тепловое состояние факторов: на низких скоростях в исследованной системе резания основными источниками температурных отклонений являются моменты выхода на экстремальные значения глубины и скорости резания, на более же высоких оборотах максимальный эффект оказывают колебания глубины резания и подачи. Выявлено, что при достижении параметров режимов обработки экстремального значения в большинстве случаев происходит рост мгновенной температуры, при этом обнаружено наличие скоростей резания, для которых такие отклонения минимальны.

Для цитирования: Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА / В.Е. Гвинджилия, Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, Т.В. Лавренова, С.А. Дебеева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 23–36. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-23-36.

Введение

Одним из главных факторов, определяющих износостойкость инструментального режущего материала, является температура в зоне обработки. Исследованиям, связанным с оценкой и прогнозированием максимальных температур на

поверхности режущего инструмента, за последние десятилетия посвящено значительное количество научных работ. Предложены экспериментальные методы определения данного параметра путем контактного измерения и анализа теплового излучения [1–3], представлены различные аналитические зависимости для прогнозирования температуры [4–7]. Актуальным направлением также является оценка влияния технологических режимов обработки на температуру в зоне резания. Представленные работы в этой области в большинстве случаев посвящены из-

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, к.т.н., старший преподаватель
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1,
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

учению изменения средней температуры при вариации одного из параметров режимов резания, но воздействие вибраций, генерируемых самой системой при определённых режимах обработки, на характер тепловыделения в контактной зоне не анализируется [8–12]. При этом проводимые исследования показывают, что вибрации режущего инструмента и температура в зоне резания обладают высокой степенью корреляционной связи. Например, в работах Songyuan Li и др. показаны результаты влияния вибраций инструмента на температуру для различных стадий износа инструмента [13]. Qiu Yu и др. также констатируют значительное влияние режимов резания и вибраций инструмента на тепловое состояние в зоне обработки, при этом отмечая, что эта связь характеризуется нелинейными свойствами и зависит от параметров функционирования системы резания [14].

Температура в зоне резания достигает наибольшей величины на конечной границе участка *вторичных пластических деформаций* (ВПД) передней грани резца. Сопряжение «передняя поверхность инструмента – стружка» представляет собой тяжело нагруженную трибосистему, нагрев рабочей грани резца в которой происходит вследствие вязкой диссипации энергии трения в поверхностном деформируемом микрообъёме стружки. За счёт применения гидродинамических аналогий к оценке деформационных процессов в слое ВПД А.В. Чичинадзе и К.Г. Шучевым получена аналитическая зависимость, описывающая температурное распределение вдоль передней поверхности и позволяющая определить максимальную температуру на этой грани [15]. Параметры функционирования объёмного источника тепловыделения в стружке определяются заданными режимами резания. При этом в результате различных вибрационных возмущений в системе резания одновременно один или несколько из начально заданных параметров обработки (скорость, подача, глубина резания) периодически отклоняются от своих номинальных величин, изменяя комплекс трибодформационных показателей, которые определяют максимальную мгновенную температуру контакта. В результате переменного характера функционирования источников тепловыделения на передней грани будут иметь место периодически повторяющиеся импульсные изменения

мгновенной температуры, связанные с механическими колебаниями исполнительных элементов станка. Конкретное отклонение данного показателя от номинальной величины определяется комплексом значений, которые принимает каждый из параметров режимов обработки в момент флуктуаций. Увеличение амплитуды переменной составляющей температуры приводит к росту градиента температур в режущем клине в целом и усилению нежелательных термотоков. Колебания температуры в участках, прилегающих к зоне первичных пластических деформаций, изменяют характеристики обрабатываемого материала и оказывают влияние на силы резания.

Нестабильное тепловое состояние зоны резания и переменный характер теплового нагружения поверхностей резца являются причиной интенсификации окислительного и диффузионного видов изнашивания рабочих граней инструмента [17–19]. При этом термодинамические процессы на передней грани инструмента во многом определяют тепловое состояние и процессы изнашивания на его задней поверхности [20, 21]. Особенно остро негативные температурные эффекты проявляются при сухом резании жаропрочных материалов с низким уровнем теплопроводности [22–24]. Дополнительным фактором, способствующим усилению вибраций резца и росту температуры в зоне обработки, будет служить применение оборудования с длительным сроком эксплуатации, для которого характерны значительные кинематические возмущения со стороны приводов подач и привода главного движения в процессе обработки.

Цель работы: оценить влияние периодических флуктуаций параметров режимов обработки, возникающих при различных скоростях резания, на изменение максимальной величины температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА на станке с большим сроком эксплуатации без применения охлаждения.

Методы

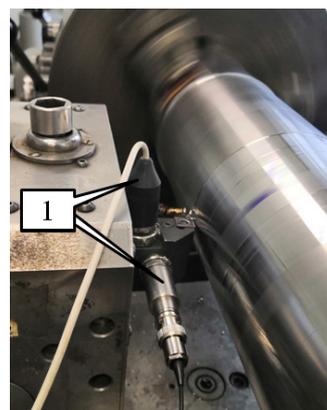
Натурные испытания проводились в производственных условиях (завод «Атоммаш», г. Волгодонск) на универсальном токарном станке ДИП-300. Наружное продольное точение заготовок диаметром 109 мм и длиной 400 мм из

стали 15X2НМФА выполнялось твёрдосплавными пластинами Т15К6 со следующей геометрией режущей части: передний угол $\gamma = 6^\circ$, задний угол $\alpha = 6^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 95^\circ$, радиус при вершине пластины $r = 0,5$ мм. Точение осуществлялось при подаче $s = 0,198$ мм/об, глубина резания составляла $t = 0,5$ мм на сторону, обороты шпинделя $n = 630 \dots 1000$ об/мин (скорость резания $V = 215,5 \dots 343,6$ м/мин). Заготовки были центрированы и предварительно проточены. Для повышения жесткости подсистемы заготовки использовался усиленный прецизионный вращающийся задний центр BISON 8814-5 NC PRECISION 20/30.

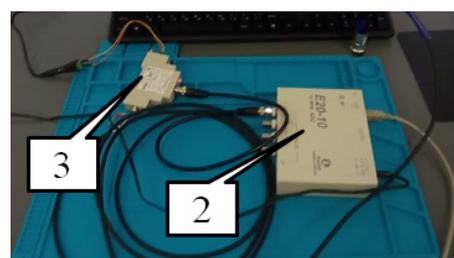
В качестве основных информационных каналов о динамике процесса резания были выбраны вибрации инструмента, измеренные в направлениях его подвижности, так как они в большей степени влияют на флуктуации технологических режимов. Для снятия вибраций инструмента использовался стенд, состоящий из трех акселерометров модели А603С01, аналогово-цифрового преобразователя LCard E20-10 с частотой дискретизации входящего сигнала до 10 МГц, ИСР-преобразователь ВТК-2-010 для усиления и пропорционального преобразования сигналов виброускорений в переменное напряжение с частотным диапазоном $0,1 \dots 50\,000$ Гц (рис. 1). Частота дискретизации сигнала – 10 кГц на канал. Запись сигналов производилась с помощью программного обеспечения L-Graph II, обработка экспериментальных данных и идентификация параметров цифровой модели процесса резания осуществлялась с применением программного обеспечения Matlab и Simulink.

Модель динамической системы резания представлена в виде совокупности трех взаимосвязанных подсистем. Первая из них обеспечивает движение резца относительно заготовки, т. е. задает технологические режимы резания, а также инерционно-диссипативные свойства системы. Вторая подсистема задает упругие деформации и силы резания, действующие на инструмент. Третья подсистема реализует блок формирования неуправляемых возмущений, источником которых являются кинематические возмущения со стороны приводной системы станка и биения шпиндельного узла [25].

При моделировании динамики процесса обработки формирование значений параметров



а



б

Рис. 1. Общий вид оборудования для исследования:

а – виброакселерометры (1); б – система непрерывного вибрационного контроля инструмента: АЦП E20-10 (2) и ИСР-преобразователь ВТК-2-010 (3)

Fig. 1. General view of the equipment for the study:

а – vibration accelerometers (1); б – continuous vibration monitoring system of the tool: ADC E20-10 (2) and ICP transducer VTK-2-010 (3)

скорости резания V , подачи s и глубины резания t осуществлялось следующим образом. Для каждого из параметров они определялись суммой значения, заданного системой управления (V_0, s_0, t_0) , деформационных смещений $H = \{H_X, H_Y, H_Z\}$, мм, скоростей деформационных смещений $\eta = dH / d\tau = \{\eta_X, \eta_Y, \eta_Z\}$, мм/с, а также вибрационных возмущений $\Delta = \{\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z\}$, мм. Вибрационные возмущения по своей структуре являются периодическими функциями времени и могут быть представлены в виде

$$\Delta_i(\tau) = \sum_{n=1}^k A_n \sin(\omega_n \tau);$$

$$v_i^\Delta(\tau) = d\Delta_i / d\tau = \sum_{n=1}^k A_n \omega_n \cos(\omega_n \tau),$$
(1)

где A_n, ω_n – соответственно амплитуды и частоты осцилляторов, возмущающих движение инструмента в направлениях движения инструмента $i = \{X, Y, Z\}$, определяемые экспериментальным путем.

Итоговое представление технологических режимов резания моделировалось в следующем виде:

$$\begin{aligned} V &= V_0 - \eta_Z + v_Z^A; \\ s &= \int_{\tau-\tau_0}^{\tau} (V_x - \eta_X + v_X^A) d\tau; \\ t &= t_0 - H_Y + \Delta_Y, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tau_0 = 1/\Omega$ – время одного оборота детали, с; Ω – частота оборота детали, Гц; V_x – скорость движения подачи, $V_x = s_0\Omega$, мм/с.

Расчёт максимальной температуры контакта на передней поверхности для каждого из сочетаний значений параметров V, s и t , которые они принимают в моменты флуктуаций из-за вибраций инструмента, осуществлялось по аналитической зависимости Чичинадзе – Шучева [15]

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\omega_{01}}{k_1 + m_1} + \frac{\omega_{02}}{V_C} \times \right. \\ &\times \left. \left(\frac{l_1}{V_C} k_2^3 a_2 + 1 - 2k_2 \sqrt{a_2} \frac{l_1}{V_C} \frac{1}{\pi} - \exp\left(\frac{l_1}{V_C} k_2^2 a_2\right) \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \operatorname{erfc}\left(k_2 \sqrt{a_2} \frac{l_1}{V_C}\right) \right) \right) \left(\lambda_1 m_1 + \frac{2\lambda_2}{\pi a_2} \frac{l_1}{V_C} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_{01} – максимальная объемная плотность источника тепловыделения от сил трения в теле инструмента, Вт/м³; $\omega_{02} = \frac{q_0 k t_H}{t_{пл} h \left(1 - \exp\left(-k \frac{T_H}{T_{пл}}\right) \right)}$ –

начальная плотность источника тепловыделения в обрабатываемом материале, Вт/м³; q_0 – удельная мощность трения для передней поверхности, Вт/м²; k_1, k_2 – коэффициенты локализации источника теплопоглощения для инструментального и обрабатываемого материала соответственно, м⁻¹; a_2 – коэффициент температуропроводности заготовки, м²/с; λ_1, λ_2 – коэффициенты

теплопроводности твёрдого сплава и материала заготовки соответственно, Вт/м·°С; V_c – скорость движения стружки по передней поверхности, м/с; $T_{пл}$ – температура плавления материала заготовки, °С; k – температурный коэффициент, °С, $k = 7,143 \cdot 10^{-4} T_{пл}$; h – средняя толщина пластически деформированного слоя в стружке, м; T_H – разница температур внутри пластически деформированного слоя, °С; l_1 – длина участка

ВПД на передней поверхности, м; $m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_1 \left(\frac{A_1}{P_1} \right)}}$;

A_1 – площадь трибоконтакта на участке ВПД, м²; P_1 – периметр трибоконтакта на участке ВПД, м; α_1 – коэффициент теплоотдачи инструментального материала, м²/°С.

Для определения средней толщины зоны ВПД применялась эмпирическая зависимость [26]:

$$h = \frac{\tau_k l_1}{\lambda_2 T_{пл}}. \quad (4)$$

Для учета влияния изменения сил резания в моменты флуктуаций на величину параметров τ_k и h средние касательные напряжения на передней поверхности определялись как $\tau_k = F_{XY}/A_k$, Па, где F_{XY} – результирующая сила резания для продольного (X) и радиального (Y) направлений; A_k – общая площадь контакта стружки с передней поверхностью, $A_k = 2l_1 b$. Значения длины контакта l_1 и ширины срезаемого слоя b определялись по методикам [27] и [28] соответственно.

Результаты и их обсуждение

Проведены анализ и обработка данных колебательных ускорений, записанных с помощью вибродатчиков. Вычислены колебательная скорость и смещение инструмента относительно детали. На рис. 2 представлена вибрационная характеристика процесса резания в продольном направлении, отвечающем за вариации площади срезаемого слоя. По спектральным характеристикам данных измерительного комплекса установлены доминирующие частотные составляющие системы и кинематических возмущений.

Вибрационные характеристики на примере суппортной группы представляют собой широкополосный сигнал. Анализ низкочастотного

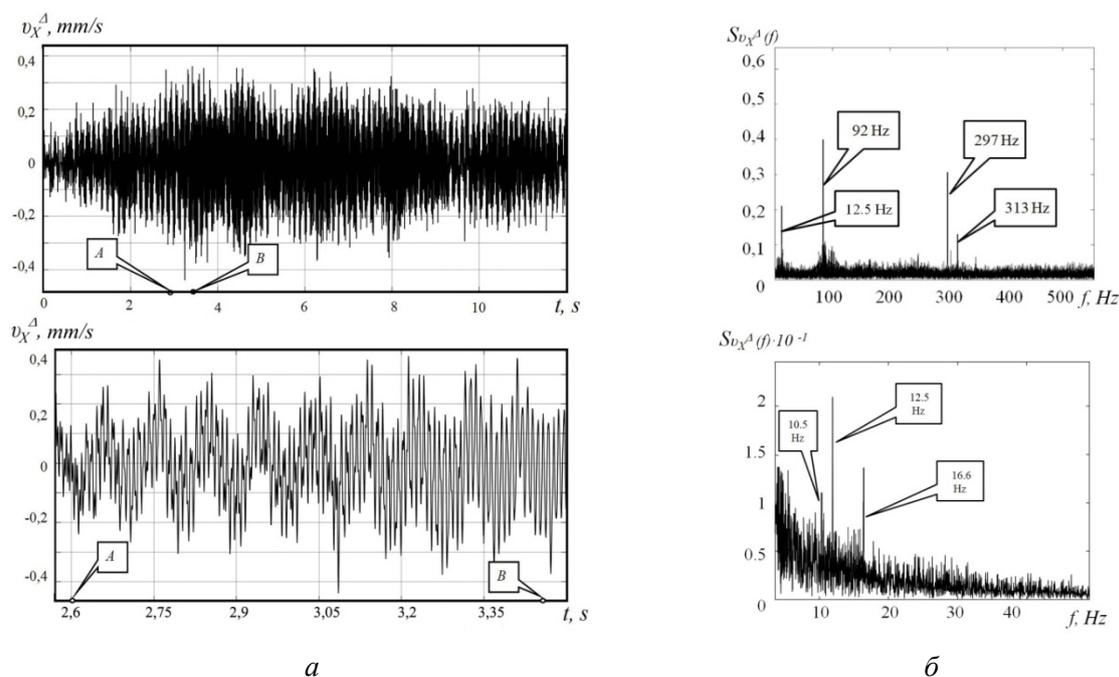


Рис. 2. Пример обработанных данных для колебательной скорости инструмента в продольном направлении:

a – временная реализация; *б* – амплитудный спектр колебательной скорости в среднечастотном и низкочастотном диапазоне

Fig. 2. Example of processed data for tool oscillatory velocity in the longitudinal direction:

a – time-domain signal; *б* – amplitude spectrum of oscillatory velocity in mid-frequency and low-frequency range

диапазона показывает, что в спектре колебаний суппортной группы можно выделить три основные частоты. Первая из них совпадает с частотой биений шпиндельной группы. Остальные, в том числе и в среднечастотном диапазоне, являются составляющими кинематических возмущений.

На основе полученных данных произведено моделирование динамики процесса резания с учетом влияния вибрационных возмущений (1) [29]. Примеры динамики сил резания для различных скоростей резания изображены на рис. 3. Диапазон включает в себя как скорости, используемые в натурных опытах на станке ($V = 216$ м/мин, $V = 270$ м/мин, $V = 343$ м/мин), так и промежуточные значения, полученные имитационным цифровым моделированием.

С точки зрения динамики силовых показателей процесса резания верхней границей оптимального диапазона частоты оборота детали будут значения ниже первой частотной составляющей кинематических возмущений (12,5 Гц (рис. 2)), т. е. $n < 700$ об/мин или $V < 252$ м/мин. Частоты $n = 800$ об/мин ($V = 270$ м/мин) и $n = 930$ об/мин ($V = 318$ м/мин) могут быть ис-

пользованы в качестве режимов обработки с условием постоянства частоты оборотов детали, так как вариации частоты вращения заготовки в 1 Гц могут привести к значительному ухудшению динамики процесса резания (рис. 3). В этом случае малым вариациям технологических режимов резания в зоне квазиустойчивых параметров ($V = 343$ м/мин) соответствуют значительные вариации сил резания, в 1,6...2 раза превышающие вариации аналогичных параметров при $V = 216$ м/мин и $V = 270$ м/мин.

Результаты моделирования вариаций трех параметров режимов резания на примере скорости обработки внутри оптимального с точки зрения минимизации вариаций площади срезаемого слоя диапазоне (216,5 м/мин) и за его пределами (343,6 м/мин) представлены на рис. 4, *a*, *б*. Стоит отметить, что при $V = 343,6$ м/мин сигналы по скорости и глубине резания приобретают вид практически гармонических колебаний. В данном случае происходит наложение частотных составляющих возмущений с несоизмеримыми амплитудами, при этом наблюдается наиболее мощный сигнал. Кинематические возмущения

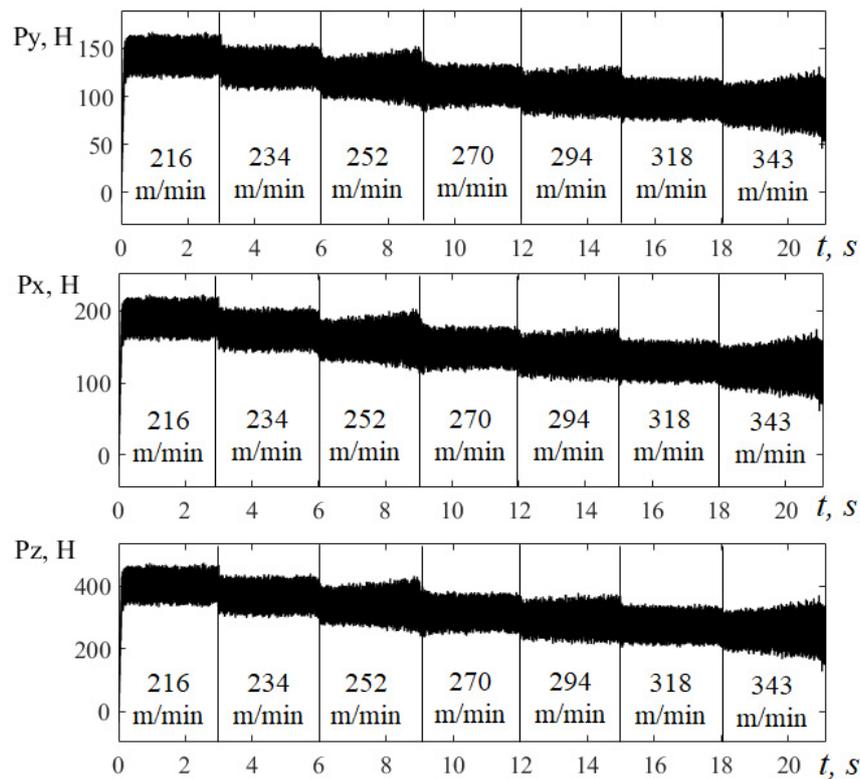


Рис. 3. Моделирование сил резания по направлениям X , Y , Z для $s = 0,198$ мм/об, $t = 0,5$ мм для диапазона оборотов шпинделя $V = 216 \dots 343$ м/мин

Fig. 3. Modeling of cutting forces along X , Y , Z directions for $s = 0.198$ rpm, $t = 0.5$ mm over the spindle speed range $V = 216\text{--}343$ m/min

со стороны суппортной группы продолжают возмущать траекторию движения инструмента в продольном направлении, что приводит к вариациям площади срезаемого слоя.

Периодическое изменение площади срезаемого слоя вследствие колебаний режимов резания (V , s , t) относительно своего номинального значения вызывают периодические вариации сил резания, что приводит к периодическим изменениям давления стружки на переднюю грань инструмента. Фактически происходит периодическая перестройка процесса функционирования трибосистемы «стружка – передняя поверхность», характеристики которой непосредственно влияют на изменение температуры в зоне резания. В этом случае формируется сложная связь между механическими и термодинамическими процессами, она определяется уже не только характеристиками взаимодействующих подсистем механической части, но и трибофизическими явлениями, влияющими на свойства среды в зоне резания. Образование этих связей хоть

и вызвано внешними возмущениями, идущими от механических систем станка, но большее влияние на термодинамическое состояние контактной зоны оказывают уже физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов, определяющие особенности протекания упруго-пластических деформаций. Деформационные процессы на участках контакта стружки с передней гранью инструмента являются как следствием динамики процесса резания, так и источником новых нелинейных преобразований в зоне обработки, в том числе влияющих на износ инструмента и качество обработанной поверхности. Этим и обусловлена необходимость анализа взаимного влияния механических и термодинамических характеристик динамики процесса резания на основе параметров, доступных для измерения в системе.

Для оценки изменения температуры на передней грани резца за счет вариаций режимов и сил резания, характерных для

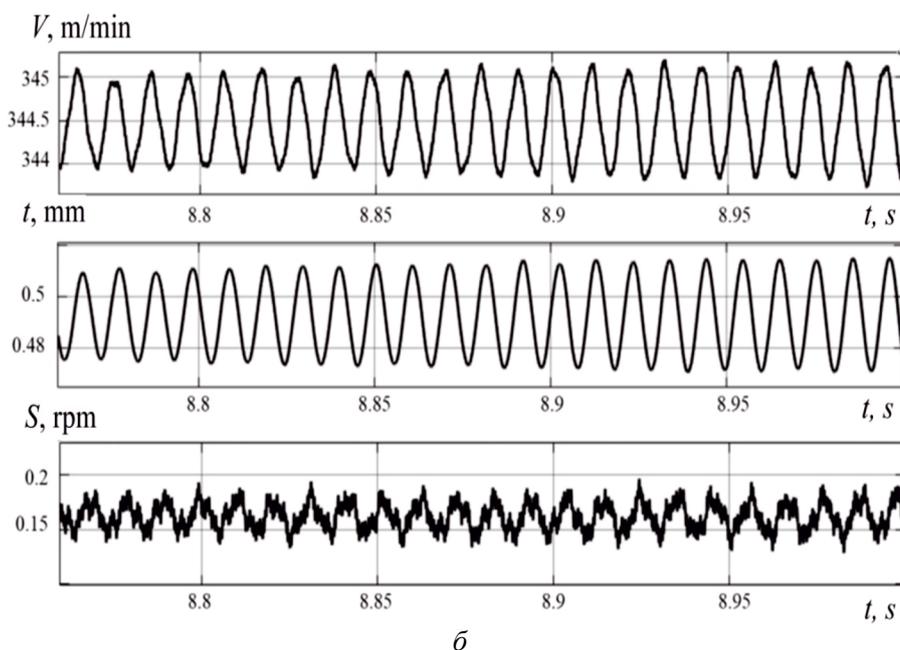
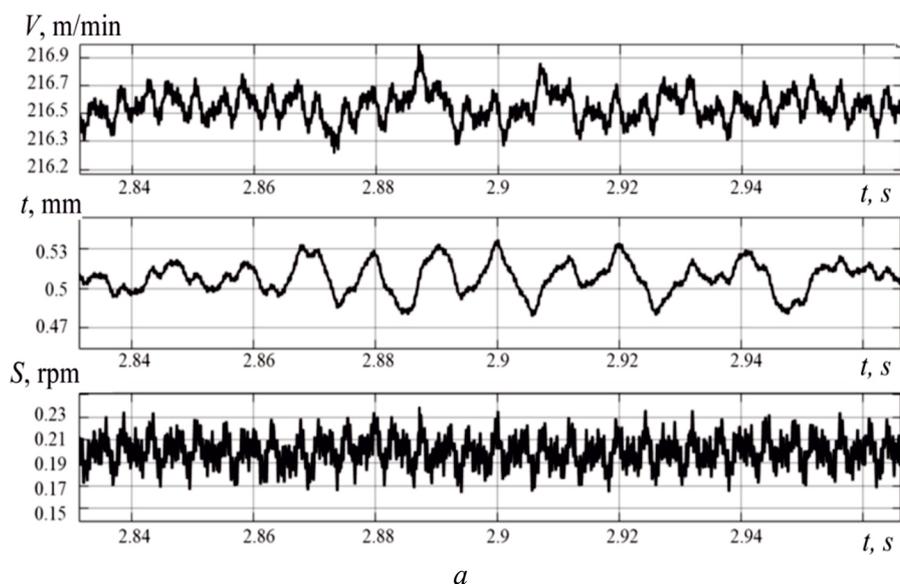


Рис. 4. Флуктуации технологических режимов:

$V = 216,5$ м/мин (*a*); $V = 343,6$ м/мин (*б*)

Fig. 4. Fluctuations of technological modes:

$V = 216.5$ m/min (*a*); $V = 343.6$ m/min (*б*)

каждой из частот оборотов шпинделя, выделим такие квазистатические моменты в динамике системы, когда скорость, подача и глубина резания в результате флуктуаций принимают свои экстремальные значения. Для каждой из этих временных точек определим величины остальных двух параметров режимов обработки и значения результирующих сил резания F_{XY} в этот момент (табл. 1, 2, ст. 2–5). На основании полученных данных произведён расчёт основных трибопоказателей по формуле (3), определяющих максимальную температуру

передней грани T_{\max} в моменты экстремальных значений параметров V , s и t (табл. 1, 2, ст. 6–10). Представлены также отклонения максимальной температуры поверхности от номинальной величины ΔT и амплитуда ее изменения в моменты флуктуаций A_T (табл. 1, 2, ст. 11–12).

По результатам моделирования при $n = 630$ об/мин наибольший рост мгновенной температуры происходит при выходе глубины резания на минимальное значение. При этом в моменты флуктуаций имеют место такие сочетания параметров V , s и t , при которых комплекс

Таблица 1

Table 1

Вариации технологических режимов, силы резания и основных трибопоказателей для $V = 216,5$ м/мин
Variations of technological modes, cutting forces and main tribological parameters for $V = 216.5$ m/min

Состояние параметра в момент флуктуации / Parameter state at the moment of fluctuation	V , м/мин / V , m/min	s , мм/об / s , mm/rev	t , мм / t , mm	F_{XY} , Н / F_{XY} , N	l_1 , мм / l_1 , mm	h , мкм / h , μ m	$\tau_{кс}$, МПа / $\tau_{кс}$, MPa	K_a	T_{max} , °C	ΔT , °C	A_T , °C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Номинальное / Nominal	216,5	0,198	0,5	228	0,24	23	508	2,005	1139,2	0	–
$V \rightarrow \max$	217	0,234	0,51	257	0,28	25	471	1,998	1134,5	–4,7	26,8
$V \rightarrow \min$	216,2	0,173	0,48	230	0,21	24	619	2,013	1161,2	+22,1	
$s \rightarrow \max$	216,8	0,242	0,49	271	0,29	27	498	1,998	1149,7	+10,6	10,6
$s \rightarrow \min$	216,3	0,157	0,47	218	0,19	21	576	2,703	1142,6	+3,4	
$t \rightarrow \max$	216,8	0,225	0,53	247	0,28	24	460	1,998	1133,1	–6,1	35,9
$t \rightarrow \min$	216,3	0,176	0,46	235	0,20	25	651	2,014	1168,9	+29,8	

Таблица 2

Table 2

Вариации технологических режимов, силы резания и основных трибопоказателей для $V = 343,6$ м/мин
Variations of technological modes, cutting forces and main tribological parameters for $V = 343.6$ m/min

Состояние параметра в момент флуктуации / Parameter state at the moment of fluctuation	V , м/мин / V , m/min	s , мм/об / s , mm/rev	t , мм / t , mm	F_{XY} , Н / F_{XY} , N	l_1 , мм / l_1 , mm	h , мкм / h , μ m	$\tau_{кс}$, па / $\tau_{кс}$, MPa	K_a	T_{max} , °C	ΔT , °C	A_T , °C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Номинальное / Nominal	343,6	0,198	0,5	142	0,24	14	319	1,962	1092,2	0	–
$V \rightarrow \max$	345,4	0,17	0,507	149	0,21	15	386	1,967	1117,9	+25,8	32,8
$V \rightarrow \min$	343,5	0,158	0,47	139	0,19	15	423	1,974	1124,9	+32,8	
$s \rightarrow \max$	344,2	0,207	0,509	205	0,25	20	430	1,959	1152,8	+60,7	60,7
$s \rightarrow \min$	344,5	0,151	0,47	119	0,17	13	382	1,975	1101,3	+9,1	
$t \rightarrow \max$	344,7	0,168	0,519	194	0,21	19	496	1,966	1162,5	+70,3	70,3
$t \rightarrow \min$	343,8	0,157	0,45	139	0,18	15	447	1,976	1132,6	+40,4	

их значений практически нивелирует изменение мгновенных температур (при $V \rightarrow \max$; $s \rightarrow \min$). Следует также отметить, что в результате вибраций в данных условиях обработки возможны снижения максимальной мгновенной температуры относительно номинального значения (при $V \rightarrow \max$; $t \rightarrow \max$). При повышении скорости резания отрицательные отклонения температуры в моменты флуктуаций проявляются в меньшей степени или далее полностью прекращаются. Так, при точении со скоростью $V = 343,6$ м/мин при любых сочетаниях параметров режимов резания изменение мгновенной температуры происходит лишь в сторону увеличения (табл. 2, ст. 11).

Амплитуды температурных всплесков с увеличением числа оборотов шпинделя в целом повышаются, при этом также изменяются и факторы, способствующие генерации положительных температурных всплесков. Если при $V = 216,5$ м/мин основными источниками тем-

пературных всплесков с максимальной амплитудой являются моменты выхода на экстремальные значения параметров t и V , то на более высоких оборотах значительный эффект оказывают колебания глубины резания и подачи. Так, при точении на скорости $V = 343,6$ м/мин чаще повторяются флуктуации с нагревом поверхности резца на дополнительные 61...70 °C, что обусловлено значительными вариациями площади срезаемого слоя за счёт вибраций, характерных для данного режима обработки.

В табл. 3 представлены амплитуды периодических изменений температуры для различной частоты оборотов шпинделя n . Наибольшие значения параметра A_T при каждой скорости обработки выделены подчёркиванием, тем самым отмечены параметры режимов резания, флуктуации которых вносят наибольший вклад в нестабильность теплового состояния зоны резания при каждом значении n .



Расчетные амплитуды периодических изменений температуры A_T в моменты выхода параметров V , s и t на экстремальные значения

Calculated amplitudes of periodic temperature variations ΔT at moments when parameters V , s , and t reach extreme values

Параметр режима / Mode parameter	Амплитуда A_T , °C					
	216,5 м/мин / 216.5 m/min	252 м/мин / 252 m/min	270 м/мин / 270 m/min	294 м/мин / 294 m/min	318 м/мин / 318 m/min	343,6 м/мин / 343.6 m/min
V	<u>26,8</u>	<u>31,1</u>	<u>17,8</u>	21,2	24,8	32,8
s	14,1	18,1	12,5	<u>36,1</u>	<u>42,5</u>	<u>60,8</u>
t	<u>35,9</u>	<u>43,2</u>	<u>26,4</u>	<u>41,6</u>	<u>51,4</u>	<u>70,3</u>

Исследованный диапазон скоростей имеет выраженный локальный минимум, соответствующий скорости 270 м/мин, для которой достигаются наименьшие значения параметра A_T при всех экстремальных значениях режимов точения. Повышение оборотов шпинделя выше данной величины приводит к изменению характера генерации температурных всплесков (источники V , t сменяются на s , t) и росту амплитуд A_T .

Заключение

Произведен анализ влияния вибрационных возмущений в системе резания на изменение максимальной температуры передней поверхности токарного резца. По результатам цифрового имитационного моделирования с использованием данных натуральных опытов определялись отклонения температуры контакта от номинального значения для моментов, когда один из режимов резания в результате флуктуаций принимает экстремальное значение. Установлено, что сочетание параметров обработки в такие моменты в общем случае приводит к мгновенному росту максимальной температуры на передней грани инструмента, характеризуемой понятием тепловой вспышки, но при этом для некоторых вариантов комбинаций возможно незначительное снижение величины указанного показателя.

В исследованном диапазоне режимов выявлена оптимальная скорость резания, при которой выход всех трёх параметров обработки на экстремальные значения приводит к минимальному изменению температуры на передней поверхности. Установлено также, что данная скорость обработки является границей, разделившей из-

ученный скоростной диапазон на два интервала, которые отличаются по факторам, дестабилизирующим тепловое состояние контактной зоны. При точении заготовки с частотой оборотов ниже данной границы наибольшие температурные отклонения происходят при выходе на экстремальные значения глубины и скорости резания. При повышении скорости обработки сверх оптимального значения основными источниками изменений температуры контакта становятся уже глубина резания и подача. Таким образом, ограничивающим производительность процесса обработки фактором по критерию минимизации температурных флуктуаций являются вариации площади срезаемого слоя вследствие кинематических возмущений, характерных для исследованной системы резания на более высоких скоростях точения.

Приведенные в настоящей работе результаты исследований могут быть использованы при выборе рациональных режимов обработки с учётом кинематических возмущений суппортной группы станка и термодинамического состояния контактной зоны, зависящей от их проявлений. Методика позволяет оценить и выбрать технологические режимы, при которых флуктуации сил минимизируют возможные импульсные изменения температуры передней поверхности резца в случае точения без применения охлаждения. Анализ влияния охлаждающей жидкости на импульсные изменения параметров функционирования источника тепловыделения является перспективным направлением для дальнейших исследований. В первую очередь представленная методика будет актуальна для предприятий со средней и высокой степенью износа оборудо-

вания. Её использование позволит, не прибегая к длительным стойкостным испытаниям, определять или корректировать режимы точения при изменении конфигурации системы резания (например, в случае поставок инструмента другого производителя) с учётом фактического состояния станков.

Применение в системах мониторинга и компенсации вибраций амплитуды температурных колебаний, вызванных кинематическими погрешностями, в качестве дополнительного параметра оценки оптимальности режимов резания может улучшить стабильность процесса и снизить общую температуру в зоне резания. Учёт температурных изменений, вычисленных по сигналу вибрационной активности инструмента, особенно актуален для металлорежущих станков с длительным сроком эксплуатации, для которых характерны значительные периодические возмущения системы резания со стороны приводов подач и привода главного движения.

Список литературы

1. Komanduri R., Hou Z.B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology // *Tribology International*. – 2001. – Vol. 34 (10). – P. 653–682. – DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.
2. Grzesik W. Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – Vol. 39 (3). – P. 355–369. – DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.
3. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining / G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (7). – P. 671–678. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00037-3.
4. An improved analytical model of cutting temperature in orthogonal cutting of Ti6Al4V / C. Shan, X. Zhang, B. Shen, D. Zhang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2019. – Vol. 32 (3). – P. 759–769. – DOI: 10.1016/j.cja.2018.12.001.
5. Barzegar Z., Ozlu E. Analytical prediction of cutting tool temperature distribution in orthogonal cutting including third deformation zone // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 67. – P. 325–344. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.003.
6. Analytical and experimental investigations of rake face temperature considering temperature-dependent thermal properties / J. Weng, J. Saelzer, S. Berger, K. Zhuang, A. Bagherzadeh, E. Budak, D. Biermann // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2023. – Vol. 314. – P. 117905. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.117905.
7. Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г. Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.
8. Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling / X.J. Ren, Q.X. Yang, R.D. James, L. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 147 (1). – P. 38–44. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.013.
9. Sulaiman S., Roshan A., Borazjani S. Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 903. – P. 21–26. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.903.21.
10. Kikuchi M. The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys // *Acta Biomaterialia*. – 2009. – Vol. 5 (2). – P. 770–775. – DOI: 10.1016/j.actbio.2008.08.016.
11. Karaguzel U., Budak E. Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – Vol. 262. – P. 532–540. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.07.024.
12. Cutting tool temperature prediction method using analytical model for end milling / Wu Baohai, C. Di, H. Xiaodong, Z. Dinghua, T. Kai // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2016. – Vol. 29 (6). – P. 1788–1794. – DOI: 10.1016/j.cja.2016.03.011.
13. Experimental study on coupling characteristics of cutting temperature rise and cutting vibration under different tool wear states / S. Li, Sh. Li, Y. Hu, E. Popov // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 118. – P. 907–919. – DOI: 10.1007/s00170-021-07948-w.
14. Experimental study on correlation between turning temperature rise and turning vibration in dry turning on aluminum alloy / Q. Yu, Sh. Li, X. Zhang, M. Shao // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 453–469. – DOI: 10.1007/s00170-019-03506-7.
15. 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.
16. Термоэлектрические характеристики процесса точения стальных заготовок твердосплавными пластинами с комбинированными покрытиями



ями / В.А. Лебедев, М.М. Алиев, Е.В. Фоминов, А.В. Фоменко, А.А. Марченко, А.Е. Мироненко // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 2. – С. 114–121. – DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-114-121.

17. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2019. – 289 с.

18. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Износостойкость режущего инструмента с многослойными покрытиями // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 304–307.

19. Влияние периодических флуктуаций параметров режимов резания на температуру передней поверхности токарного резца / Е.В. Фоминов, В.Е. Гвинджилия, А.А. Марченко, К.Г. Шучев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 32–42. – DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-1-32-42.

20. Даниелян А.М., Бобрик П.И., Гуревич Я.Л. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов. – М.: Машиностроение, 1965. – 308 с.

21. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

22. Multi-objective optimization of performance indicators in turning of AISI 1045 under dry cutting conditions / A.T. Abbas, A.A. Al-Abduljabbar, M.M. El Rayes, F. Benyahia, I.H. Abdelgaliel, A. Elkaseer // Metals. – 2023. – Vol. 13 (1). – P. 96. – DOI: 10.3390/met13010096.

23. Özbek O. Evaluation of nano fluids with minimum quantity lubrication in turning of Ni-base superal-

loy UDIMET 720 // Lubricants. – 2023. – Vol. 11 (4). – P. 159. – DOI: 10.3390/lubricants11040159.

24. Experimental investigation of turning process parameter under several cutting conditions for duplex steels for minimization of cutting temperature / K.K. Arun, V.R. Navaneeth, S. Prabhu, M. Ramesh Kumar, M. Giriraj // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62 (4). – P. 1917–1920. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.447.

25. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние вибраций на траектории формообразующих движений инструмента при точении // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 42–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-42-58.

26. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2005. – 311 с.

27. Бобров В.Ф. Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.

28. Силин С.С. Методы подбора при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

29. Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке / В.Е. Гвинджилия, Е.В. Фоминов, Д.В. Моисеев, Е.И. Гамалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 143–157. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Influence of cutting speed on pulse changes in the temperature of the front cutter surface during turning of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V

Valery Gvindjiliya ^{a,*}, Evgeny Fominov ^b, Andrey Marchenko ^c,
Tatiana Lavrenova ^d, Svetlana Debeeva ^e

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vvgvindjiliya@donstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>,  fominoff83@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>,  tobago13@yandex.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-8283-7730>,  bys_ka87@mail.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-2796-2424>,  sve_tchk@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 April 2025

Revised: 25 April 2025

Accepted: 21 May 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

Longitudinal turning

Heat-resistant steel

Kinematic disturbance

Front surface temperature

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the evaluation of the influence of periodic fluctuations of machining mode parameters on the change of the maximum temperature of the front surface of the cutter. **Subject of research.** Fluctuations of cutting mode parameters are considered as deviations of their values relative to the nominal ones, resulting in periodic changes in the cross-sectional area of the cut layer and the interaction conditions between the chip and the tool's front surface, which affect temperature changes in the cutting zone. **The purpose of this work** is to evaluate the influence of periodic fluctuations of machining mode parameters at different cutting speeds on the variation of the maximum temperature of the cutting tool's front surface during turning of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V on a long-life machine without cooling. **Method and methodology.** The finishing longitudinal turning process of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V on a long-life machine without cooling was investigated. During machining, tool vibrations were measured along three coordinate axes while varying the cutting speed at constant depth of cut and feed. Using digital simulation modeling based on input data obtained from in-situ experiments, the moments in the system dynamics when each cutting mode parameter reaches extreme values due to fluctuations were identified. Deviations of the maximum design temperature from the corresponding nominal value were then determined. **Results and discussion.** It is established that variations in machining speed change the factors destabilizing the thermal state: at low speeds, the main sources of temperature deviations in the investigated cutting system are moments when extreme values of cutting depth and speed are reached; at higher speeds, fluctuations of cutting depth and feed have the greatest effect. It is revealed that when machining parameters reach extreme values, instantaneous temperature generally increases, and cutting speeds at which such deviations are minimal are identified.

For citation: Gvindjiliya V.E., Fominov E.V., Marchenko A.A., Lavrenova T.V., Debeeva S.A. Influence of cutting speed on pulse changes in the temperature of the front cutter surface during turning of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 23–36. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-23-36. (In Russian).

References

1. Komanduri R., Hou Z.B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International*, 2001, vol. 34 (10), pp. 653–682. DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.
2. Grzesik W. Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39 (3), pp. 355–369. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
 Tel.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

3. Sutter G., Faure L., Molinari A., Ranc N., Pina V. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (7), pp. 671–678. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00037-3.
4. Shan C., Zhang X., Shen B., Zhang D. An improved analytical model of cutting temperature in orthogonal cutting of Ti6Al4V. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, vol. 32 (3), pp. 759–769. DOI: 10.1016/j.cja.2018.12.001.
5. Barzegar Z., Ozlu E. Analytical prediction of cutting tool temperature distribution in orthogonal cutting including third deformation zone. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 67, pp. 325–344. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.003.
6. Weng J., Saelzer J., Berger S., Zhuang K., Bagherzadeh A., Budak E., Biermann D. Analytical and experimental investigations of rake face temperature considering temperature-dependent thermal properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, vol. 314, p. 117905. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.117905.
7. Kulkarni A.P., Chinchankar S., Sargade V.G. Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 47–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.
8. Ren X.J., Yang Q.X., James R.D., Wang L. Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 147 (1), pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.013.
9. Sulaiman S., Roshan A., Borazjani S. Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 903, pp. 21–26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.903.21.
10. Kikuchi M. The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys. *Acta Biomaterialia*, 2009, vol. 5 (2), pp. 770–775. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.08.016.
11. Karaguzel U., Budak E. Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 262, pp. 532–540. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.07.024.
12. Baohai W., Di C., Xiaodong H., Dinghua Z., Kai T. Cutting tool temperature prediction method using analytical model for end milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29 (6), pp. 1788–1794. DOI: 10.1016/j.cja.2016.03.011.
13. Li S., Li Sh., Hu Y., Popov E. Experimental study on coupling characteristics of cutting temperature rise and cutting vibration under different tool wear states. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 118, pp. 907–919. DOI: 10.1007/s00170-021-07948-w.
14. Yu Q., Li Sh., Zhang X., Shao M. Experimental study on correlation between turning temperature rise and turning vibration in dry turning on aluminum alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 453–469. DOI: 10.1007/s00170-019-03506-7.
15. Chichinadze A.V., Shuchev K.G., Ryzhkin A.A., Filipchuk A.I., Klimov M.M. Temperaturnyi rezhim pri trenii instrumental'nykh materialov s uchetom ob'emnosti istochnika teplovydeleniya [Temperature regime during friction of tool materials taking into account the volume of heat source]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 1986, no. 7, pp. 43–51.
16. Lebedev V.A., Aliev M.M., Fominov E.V., Fomenko A.V., Marchenko A.A., Mironenko A.E. Termoelektricheskie kharakteristiki protsessa tocheniya stal'nykh zagotovok tverdosplavnymi plastinami s kombinirovannymi pokrytiyami [Thermoelectric characteristics of the process of turning steel billets by carbide inserts with combined coatings]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2023, vol. 44, no. 2, pp. 114–121. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-114-121.
17. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool materials wear during blade machining]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2019. 289 p.
18. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. *Iznosostoikost' rezhushchego instrumenta s mnogoslainymi pokrytiyami* [Wear resistance of cutting tools with multilayer coatings]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 304–307.
19. Fominov E.V., Gvindjilia V.E., Marchenko A.A., Shuchev K.G. Effect of periodic fluctuations of cutting mode parameters on the temperature of the front face of a turning tool. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2025, vol. 25 (1), pp. 32–42. DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-1-32-42.
20. Danielyan A.M., Bobrik P.I., Gurevich Ya.L. *Obrabotka rezaniem zharoprochnykh stalei, splavov i tugoplavkikh metallov* [Cutting treatment of heat-resistant steels, alloys and refractory metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 308 p.

21. Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Thermophysics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 288 p.
22. Abbas A.T., Al-Abduljabbar A.A., El Rayes M.M., Benyahia F., Abdelgalil I.H., Elkaseer A. Multi-objective optimization of performance indicators in turning of AISI 1045 under dry cutting conditions. *Metals*, 2023, vol. 13 (1), p. 96. DOI: 10.3390/met13010096.
23. Özbek O. Evaluation of nano fluids with minimum quantity lubrication in turning of Ni-base superalloy UDI-MET 720. *Lubricants*, 2023, vol. 11 (4), p. 159. DOI: 10.3390/lubricants11040159.
24. Arun K.K., Navaneeth V.R., Prabhu S., Ramesh Kumar M., Giriraj M. Experimental investigation of turning process parameter under several cutting conditions for duplex steels for minimization of cutting temperature. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62 (4), pp. 1917–1920. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.447.
25. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. The influence of the vibration on the tool shape-generating trajectories when turning. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 42–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-42-58.
26. Ryzhkin A.A. *Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumental'nykh rezhushchikh materialov* [Thermophysical processes at wear of tool cutting materials]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2005. 311 p.
27. Bobrov V.F. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [Development of science of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 416 p.
28. Silin S.S. *Metody podobiya pri rezanii materialov* [Similarity methods in cutting of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 152 p.
29. Gvindjiliya V.E., Fominov E.V., Moiseev D.V., Gamaleeva E.I. Influence of dynamic characteristics of the turning process on the workpiece surface roughness. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 143–157. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).