
MATERIALS. TECHNOLOGIES. DESIGN

УДК 621.91.01
P.A.C.S. 89.20

DOI 10.54708/26587572_2025_742398

REDUCING THE UNCERTAINTY OF TECHNOLOGICAL INFORMATION THROUGH MULTI-STAGE DIAGNOSTICS OF THE CUTTING PROCESS

*Dmitriy Vadimovich Kraynev^a, Yuliy Lvovich Chigirinskiy^b,
Zhanna Sergeevna Tikhonova^c*

Volgograd State Technical University, Lenin ave. 28, 400005, Volgograd, Russia
^a krainevdv@mail.ru, ^b julio-tchigirinsky@yandex.ru, ^c tikhonovazhs@yandex.ru

ABSTRACT

The article presents the results of a study aimed at improving the efficiency of cutting process control through the development of monitoring tools, reducing the impact of uncertainty of technological information and the development of technological equipment to the level of intelligent technological machining systems. The article proposes a methodology for multi-stage monitoring based on multichannel diagnostics of the cutting process with a physical and informational justification for the choice of diagnostic channels. The methodology is based on the results of an analysis of the system of interrelationships between the properties of materials involved in the processing process, the technological conditions of processing and the properties of the treated surface, the physical patterns of wear and the relationship between the condition of the tool and the properties of the treated surface, as well as their comparison with the results of experimental studies using modern technological and laboratory equipment, cutting tools. Intelligent multi-stage monitoring of the machining process based on multi-channel diagnostics of the cutting process makes it possible to clarify the range of permissible modes in relation to the state of the elements of the technological system and perform parametric optimization in order to ensure that the specified requirements for the result of machining are met. The results of the conducted research are fully consistent with the theoretical concepts of the laws of the cutting process, the formation of the quality parameters of the treated surface, the wear of the cutting tool, as well as the principles of optimal cutting modes.

KEYWORDS

Multi-channel diagnostics of the cutting process; reduction of uncertainty of technological information; intelligent technological systems of mechanical processing.

СНИЖЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ МНОГОЭТАПНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

*Дмитрий Вадимович Крайнев^a, Юлий Львович Чигиринский^b,
Жанна Сергеевна Тихонова^c*

Волгоградский государственный технический университет, Россия, 400005, Волгоград, пр-т Ленина, 28
^a krainevdv@mail.ru, ^b julio-tchigirinsky@yandex.ru, ^c tikhonovazhs@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования направленные на повышение эффективности управления процессом резания за счет развития средств мониторинга, снижения влияния неопределенности технологической информации и развития технологического оборудования до уровня интеллектуальных технологических систем механической обработки. В статье предлагается методология многоэтапного мониторинга на основе многоканальной диагностики процесса резания с физическим и информационным обоснованием выбора диагностических каналов. Методология построена на результатах анализа системы взаимосвязей свойств материалов, участвующих в процессе обработки, технологических условий обработки и свойств обработанной поверхности, физических закономерностей изнашивания и взаимосвязей состояния инструмента со свойствами обработанной поверхности, а также их сопоставление с результатами экспериментальных исследований с применением современного технологического и лабораторного оборудования, режущего инструмента. Интеллектуальный многоэтапный мониторинг процесса обработки на основе многоканальной диагностики процесса резания позволяет уточнить область допустимых режимов применительно к состоянию элементов технологической системы и выполнить параметрическую оптимизацию с целью гарантированного обеспечения установленных требований к результату механической обработки. Результаты проведенных исследований в полной мере согласуются с теоретическими представлениями о закономерностях процесса резания, формирования параметров качества обработанной поверхности, износа режущего инструмента, а также принципами оптимальности режимов резания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многоканальная диагностика процесса резания; снижение неопределенности технологической информации; интеллектуальные технологические системы механической обработки.

Введение

В современных условиях конкурентоспособность продукции машиностроительной отрасли в первую очередь связана с обеспечением точности и эффективности обработки, что с ростом доли труднообрабатываемых материалов ведет к необходимости совершенствования производства, в частности, за счет внедрения интеллектуальных адаптивных технологических систем. В данном контексте такие цифровые инструменты как вычислительные компоненты (микроконтроллеры и промышленные компьютеры для анализа диагностической информации) и программные решения (нейросети и алгоритмы программного обучения для про-

гнозирования и адаптации режимов резания) должны рассматриваться в качестве их штатных составляющих подобных систем. Однако, фундаментальным элементом архитектуры интеллектуальной системы адаптивного управления на базе производственного оборудования с ЧПУ является система диагностики и мониторинга, которая позволяет оценить стабильность процесса обработки, отследить динамику износа инструмента и формирование качества обработанной поверхности, а также прогнозировать результаты обработки.

Существующие системы зачастую рассчитаны на узкий спектр материалов и диапазон режимов обработки. В добавок к тому не

обеспечивают достаточную достоверность результатов, что ведет к ошибкам в прогнозных оценках и препятствует оптимизации технологической операции. Причинами являются стохастическая природа процесса резания, неопределенность технологической информации, несовершенство измерительных систем и проблемы математического моделирования. Это определяет актуальность направления исследования и формирует необходимость разработки и внедрения научно обоснованной методологии построения интеллектуальных технологических систем управления стабильностью технологического процесса и качеством обработки резанием. Основными задачами являются: выявление и количественное описание взаимосвязей между технологическими условиями обработки, мгновенным (фактическим) состоянием режущего инструмента и параметрами качества обрабатываемой и обработанной поверхностей, с учетом вариативности свойств материалов контактной пары «инструмент–заготовка»; разработка методики перманентного мониторинга состояние элементов технологической системы, как основы построения адаптивных алгоритмов управления технологической операцией.

1. Материалы и методы исследования

Теоретические исследования основывались на фундаментальных положениях: технологии машиностроения, теории резания материалов, материаловедения, механики разрушения и физики твердого тела. Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивалась применением методики планирования эксперимента и статистическим анализом.

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарно-револьверном станке с ЧПУ OKUMA-Pumori

Genos L300-M, оснащенным системой ЧПУ OSP-P300L, а также датчиком привязки инструмента (Touch setter). Измерение силы резания производилось с помощью тензометрического токарного динамометра DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия). Измерение вибрационного сигнала в процессе резания производилась с помощью виброметра ZETLAB ZET 110, оснащенного акселерометром BC 110. Параметры микропрофилия обработанной поверхности и сменных многогранных пластин (СМП) регистрировались с помощью профилометров «Mahr» MarSurf M 300 и Mitutoyo surftest sj-210.

Аналитический инструментарий, примененный в работе: средства металлографические исследований, включая электронную микроскопию и энергодисперсионный анализ (Versa 3D Dual Beam); механические испытания (микротвердомер ПМТ-3М); теплофизические исследования (комплекс «Теплофон» КИТ-02Ц, универсальная система определения теплопроводности методом лазерной вспышки NETZSCH LFA 427); электрических свойств СМП с многослойными износостойкими покрытиями, в том числе, с наномодифицированной рабочей поверхностью использовались: многофункциональный цифровой измеритель MS8226 DMM, измеритель имmittанса E7-25, измерительная ячейка для исследования объемных электрических свойств.

2. Результаты и обсуждение

Резание представляет собой сложное физико-механическое взаимодействие между инструментом и обрабатываемой заготовкой, характер которого зависит от целого ряда факторов, включая: механических свойств материала заготовки, геометрии инструмента и состояния его рабочей поверхности, режимов резания и другие. Их совокупное влияние определяет интенсивность дефор-

мационных и тепловых явлений, как итог – напряженность и стабильность процесса обработки, интенсивность изнашивания инструмента и формирование параметров качества обработанной поверхности. Закономерности процесса резания, износа режущего инструмента достаточно полно описаны в научно-исследовательской литературе. Однако неопределенность технологической информации существенно снижает надежность прогнозных оценок и прикладное применение аналитических зависимостей [1–3].

Функцию ключевого направления стабилизации процесса резания в производственных условиях принимает на себя режущий инструмент. Формирование микроструктуры, распределение компонентов и качество покрытий на всех этапах производства современного инструмента определяется технологическими факторами, которые являются основным источником вариаций свойств. Металлографические исследования выявили различные внутренние дефекты в объеме сменной металлорежущей пластины в виде микротрещин и полостей между твердосплавной матрицей, износостойким покрытием и его отдельными слоями [4]. Измерение микропрофиля рабочей поверхности СМП выявили рассеивание показателя R_a до $\pm 47\%$ среднего значения на отдельной СМП и до $\pm 75\%$ среднего в пределах партии инструмента, что существенно влияет на результаты обработки. Оценка режущих свойств СМП исключительно на основе электро- и теплофизических свойств инструментального материала демонстрирует недостаточную достоверность результатов, поскольку динамика и результаты обработки формируются в процессе сложного взаимо-

действия и требует комплексного подхода [5, 6]. Доказано, что в качестве такого метода оценки, учитывающего свойства инструментального и конструкционного материалов может использоваться величина термо-ЭДС пробного рабочего хода, что позволяет снизить уровень неопределенности технологической информации, а также применять данный показатель в качестве проактивного критерия работоспособности режущего инструмента на стадии подготовки производства и для предварительной диагностики контактной пары «инструмент-заготовка» [7, 8].

Оперативный же мониторинг процесса резания требует расширения системы мониторинга за счет диагностических каналов оперативной диагностики, в частности тензометрических измерений силы резания. Информативность данного канала определяется его чувствительностью к вариативности теплофизических свойств режущего инструмента, уровню температурно-силовой напряженности, виду контактного взаимодействия и стабильности процесса резания. Изменение контактных напряжений и тепловых полей в зоне резания, например с увеличением скорости резания, отражается не только на величине и соотношении составляющих силы резания, но и угла наклона осцилограммы (рис. 1).

В данном случае изменение интенсивности тепловыделения при обработке нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т ведет к повышению пластичности обрабатываемого материала и увеличению зоны опережающей пластической деформации, что в большей степени отражается на величине осевой составляющей силы резания P_x .

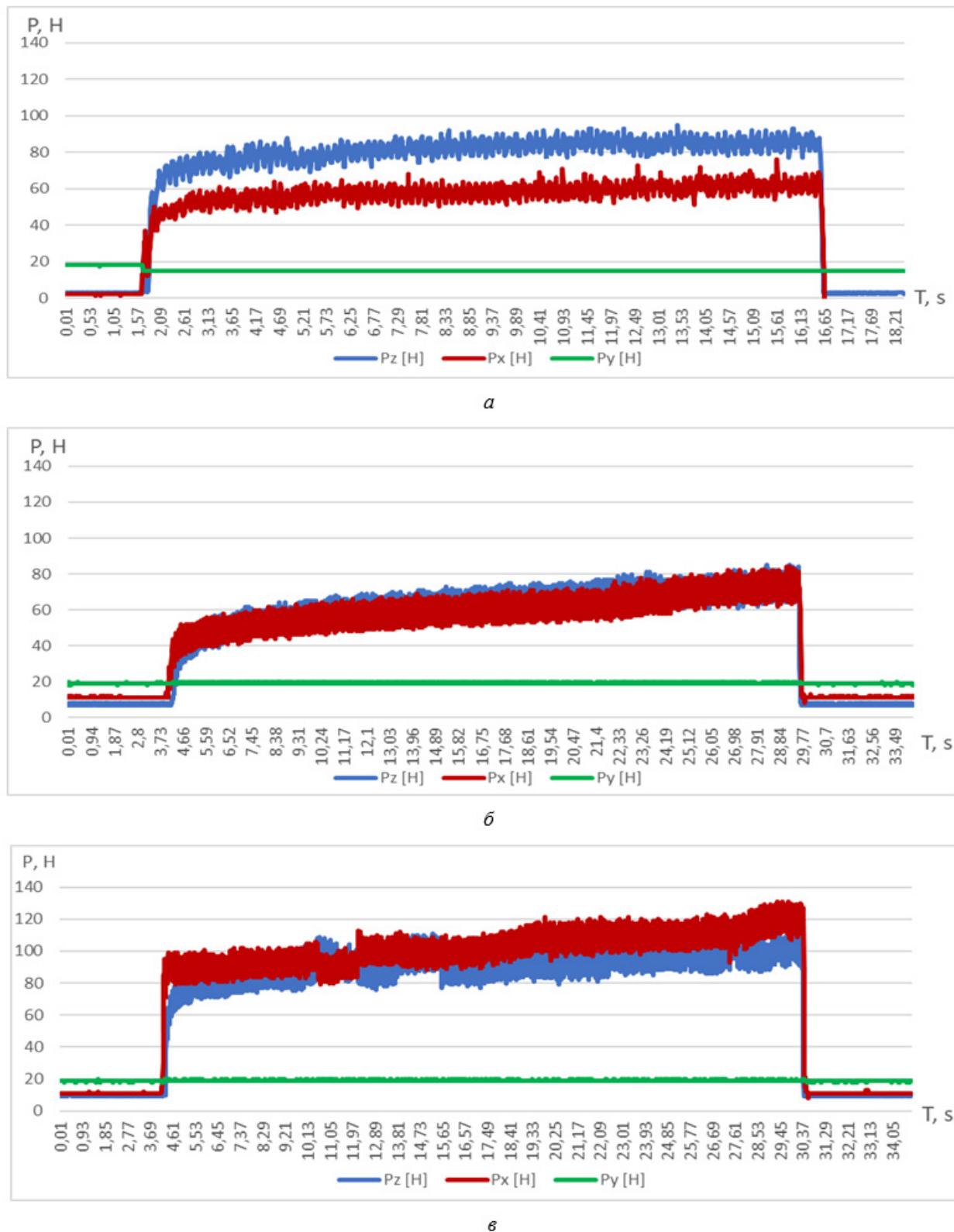


Рис. 1. Динамика изменения составляющих силы резания при точении стали 12Х18Н10Т (Korloy NC5330; Режимы резания: $a_p=0,5 \text{ мм}$, $f_n=0,05 \text{ мм/об}$): *a* – $V=90 \text{ м/min}$; *б* – $V=180 \text{ м/min}$; *в* – $V=270 \text{ м/min}$

Fig. 1. Dynamics of changes in the components of the cutting force when turning steel AISI 321 (Korloy NC5330; Cutting modes: $a_p=0.5 \text{ mm}$, $f_n=0.05 \text{ mm/rpm}$): *a* – $V=90 \text{ m/min}$; *б* – $V=180 \text{ m/min}$; *в* – $V=270 \text{ m/min}$

В результате проведенных исследований установлено, что изменение температурно-деформационной напряженности и динамики ее развития варьирующихся для различных обрабатываемых материалов (даже в рамках одной группы обрабатываемости), СМП и их сочетаний сопровождается соответствующими изменениями силовых диаграмм. Кроме того, на уровне и амплитуде колебаний силы резания при прочих равных условиях отражается и изменение характеристик поверхностного слоя обрабатываемой поверхности [9–11].

Тензометрический мониторинг также позволяет косвенно судить о виде контактного взаимодействия, неустойчивости процесса резания и формировании микропрофиля обработанной поверхности, что иллюстрируют диаграммы (рис. 2).

Потеря стабильности процесса [12] резания в зоне низких (по причине наростообразования на режущей кромке) и в зоне высоких скоростей (вследствие циклического стружкообразования) сопровождается ростом колебаний составляющих силы резания и отражается на величине среднего арифметического отклонения профиля R_a . С ростом подачи фиксируется увеличение влияния кинематического фактора и снижение доли влияния неустойчивости контактного взаимодействия.

Немаловажным моментом является фиксация соотношений между отдельными составляющими силы резания, что особенно проявляется при обработке нержавеющих сталей. Сочетание низкой теплопроводности обрабатываемого и инструментального материала, рост тепловой энергии в зоне контактного взаимодействия и результирующее развитие области опережающей деформации ведет изменению соотношения составляющих силы резания, что в первую очередь отражается на величине осевой составляющей силы резания P_x , которая в области малых подач достигает и в ряде случаев превышает уровень радиальной P_z . С увеличением пода-

чи и перераспределением тепловых потоков описанный эффект снижается.

Техническими ограничениями функциональности рассмотренного диагностического канала являются частотный диапазон и разрешающая способность экономически доступных и целесообразных к применению тензометрических систем. Кроме того, многоканальная и многоэтапная реализация системы мониторинга позволяет существенно нивелировать неопределенность технологической информации, повысить достоверность и надежность диагностики. Наиболее широкие возможности оценки неустойчивость процесса в реальном времени в широком диапазоне частот, также предиктивной аналитики имеет вибрационный мониторинг.

В качестве оценочного вибрационного параметра, характеризующего энергию неустойчивости процесса резания, была принята интегральная виброэнергия, определяемая как площадь спектрограммы вибрационного сигнала. Подход позволяет получить устойчивый параметр для численного сравнения, объективно оценивать текущее состояние инструмента, обнаруживать ранние признаки износа до его визуального проявления, прогнозировать остаточный ресурс.

В результате проведенных исследований установлено, что уровень и интенсивность роста вибрации зависит от обрабатываемого материала, применяемой СМП и режимов обработки. Однако стабильное развитие фаски износа по задней грани ведет к монотонному увеличению площади спектрограммы, в то время как образование дефектов режущей кромки таких как нарост сопровождается резким ростом площади спектрограммы. Так развитие величины 0,065 мм до 0,5 мм сопровождается увеличением площади спектрограммы не более 50% (рис. 3, *a, б*), а сформировавшийся на режущей кромке нарост кратно (более чем в 10 раз) увеличивает интегральную виброэнергию (рис. 3, *в, г*).

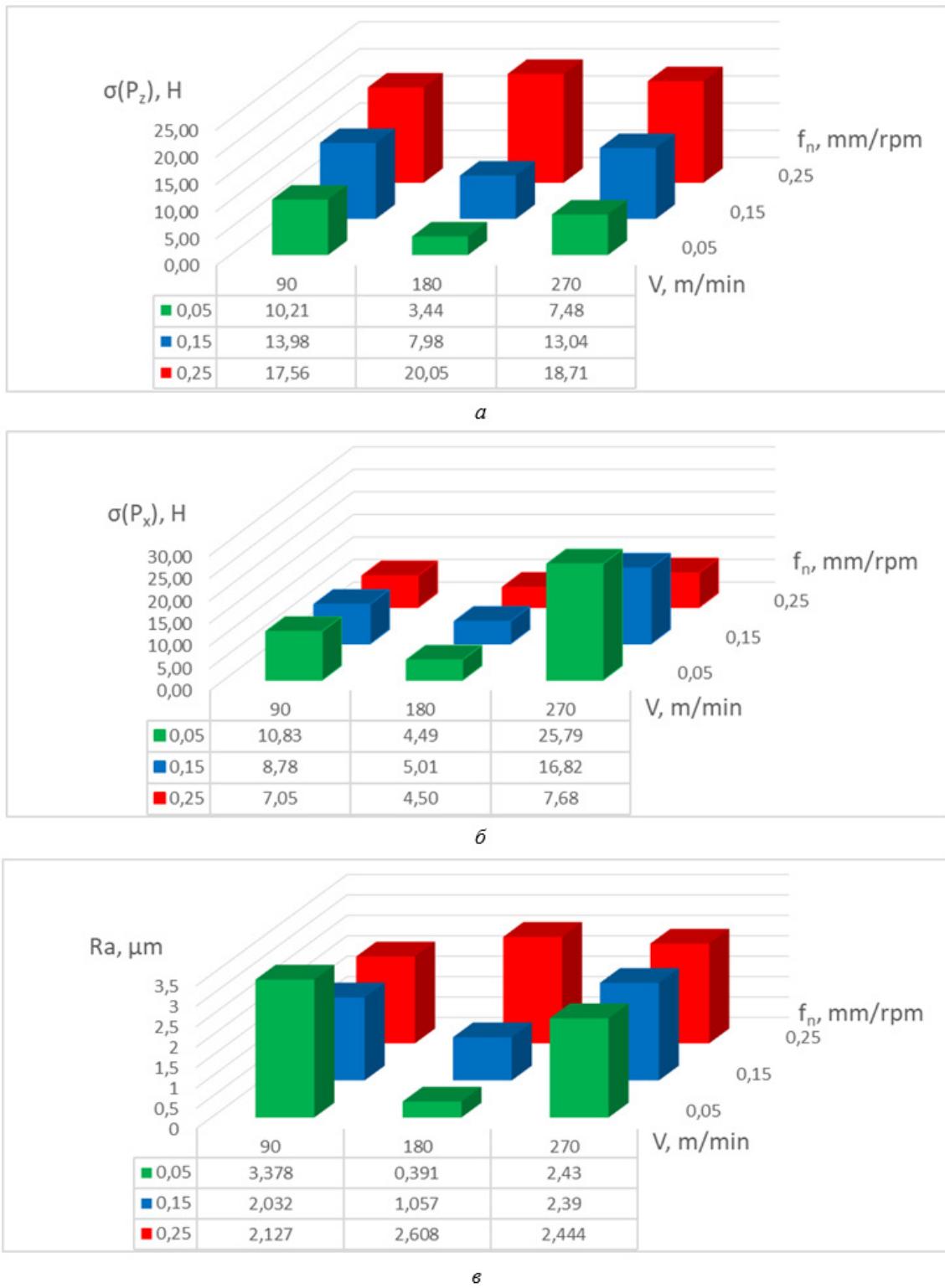


Рис. 2. Изменение величины стандартного отклонения составляющих силы резания P_z (а), P_x (б) и среднеарифметического отклонения профиля R_a (в) при точении стали 12Х18Н10Т твердосплавной пластиной Korloy NC5330 (глубина резания $a_p = 0,5$ мм)

Fig. 2. Change in the magnitude of the standard deviation of the components of the cutting force P_z (a), P_x (b) and the arithmetic mean deviation of the profile R_a (c) when turning steel AISI 321 with a Korloy NC5330 carbide plate (cutting depth $a_p = 0.5$ mm)

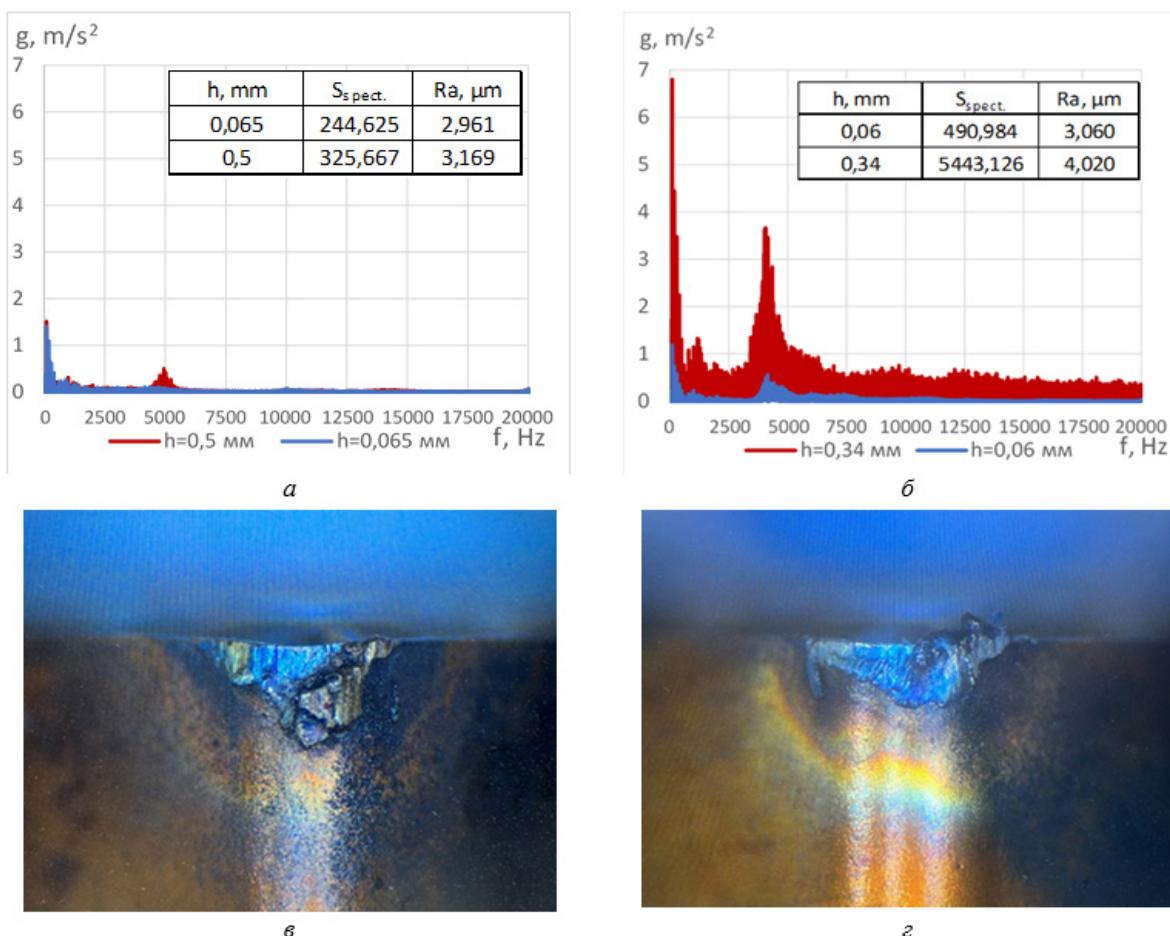


Рис. 3. Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности
(Сталь 40Х13 Режимы резания: $a_p=0,5$ мм, $V=280$ м/мин, $f_n=0,3$ мм/об)

Fig. 3. Relationship of vibration signal, tool wear and surface roughness
(AISI 420 Cutting modes: $t=0.5$ mm, $V=280$ m/min, $S=0.3$ mm/rpm)

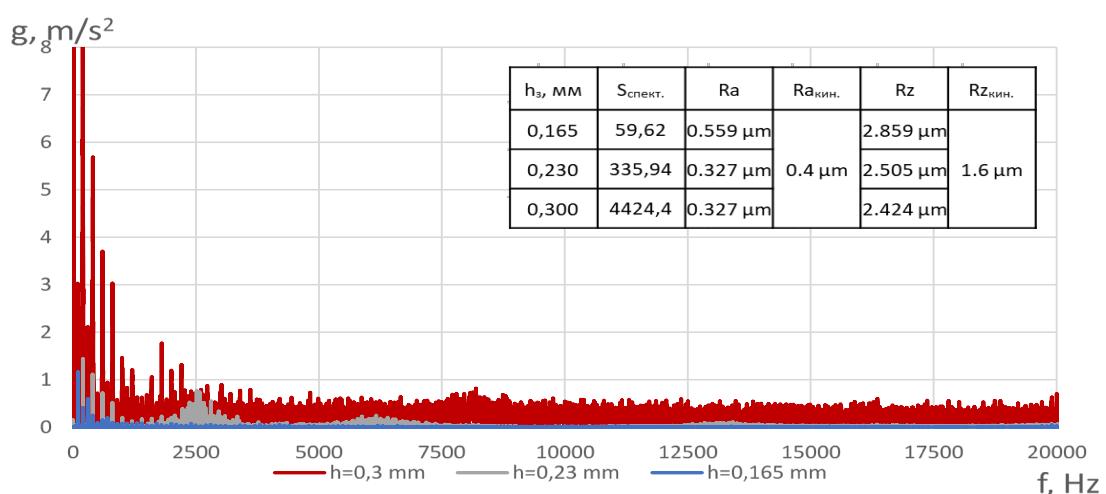


Рис. 4. Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности
(Сталь 08Х21Н6М2Т Режимы резания: $a_p=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $f_n=0,1$ мм/об)

Fig. 4. Relationship of vibration signal, tool wear and surface roughness
(Steel S32900 Cutting modes: $a_p=0.5$ mm, $V=100$ m/min, $f_n=0.1$ mm/rpm)

Вместе с тем, развитие износа СМП сопровождающееся ростом площади спектрограммы вибрационного сигнала (рис. 4) от-

ражается на характере профилограмм обработанной поверхности (рис. 5).

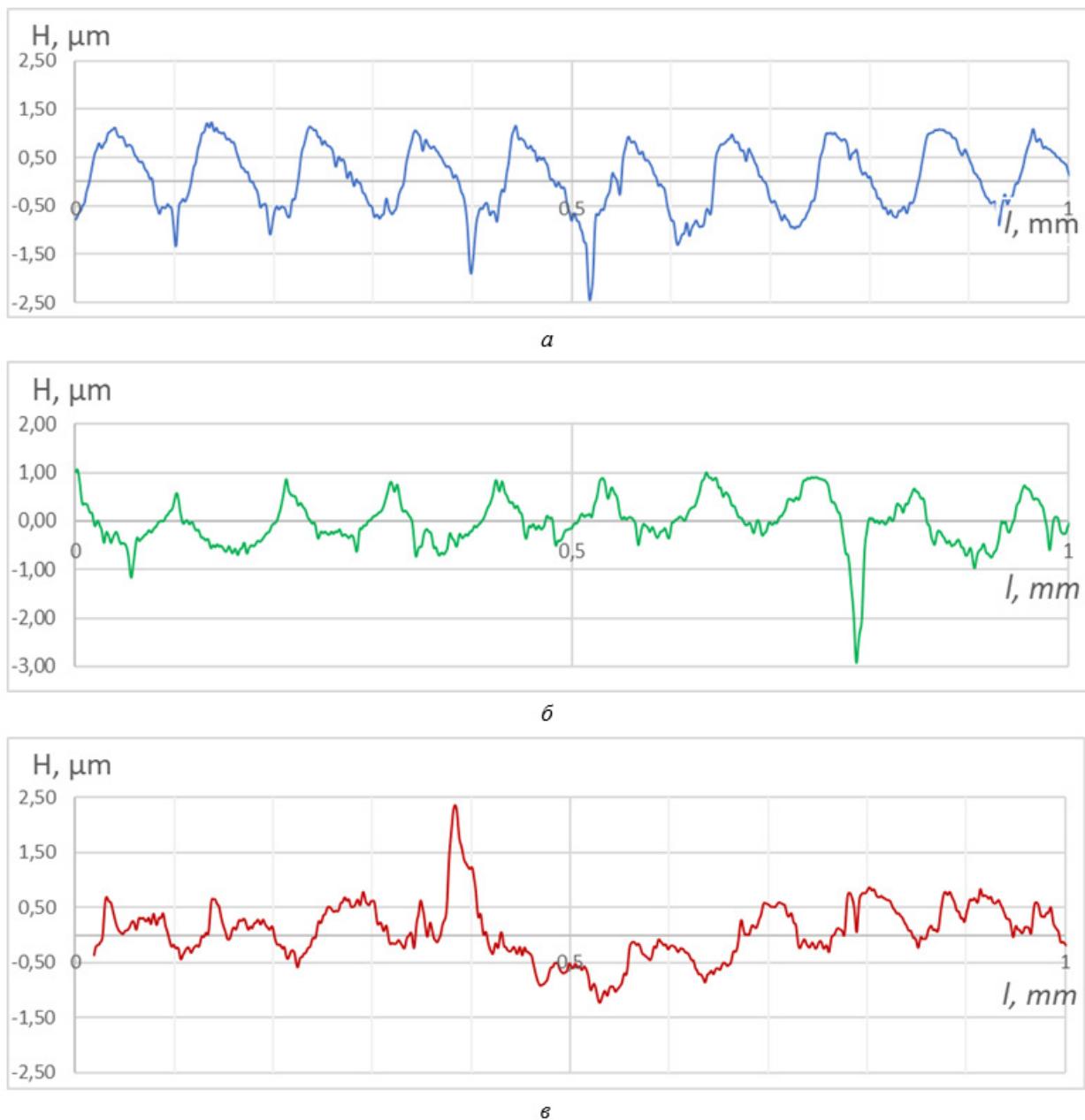


Рис. 5. Профилограммы обработанной поверхности при различной степени износа СМП:

$$a - h_b = 0,165 \text{ мм}; \quad \bar{b} - h_b = 0,23 \text{ мм}; \quad \bar{\delta} - h_b = 0,3 \text{ мм}$$

(Сталь 08Х21Н6М2Т Режимы резания: $a_p = 0,5 \text{ мм}, V=100 \text{ м/мин}, f_n = 0,1 \text{ мм/об}$)

Fig. 5. Profilograms of the treated surface with various degrees of wear of the replaceable cutting insert:

$$a - h_b = 0.165 \text{ mm}; \quad \bar{b} - h_b = 0.23 \text{ mm}; \quad \bar{\delta} - h_b = 0.3 \text{ mm}$$

(Steel S32900 Cutting modes: $a_p = 0.5 \text{ mm}, V=100 \text{ m/min}, f_n = 0.1 \text{ mm/rpm}$)

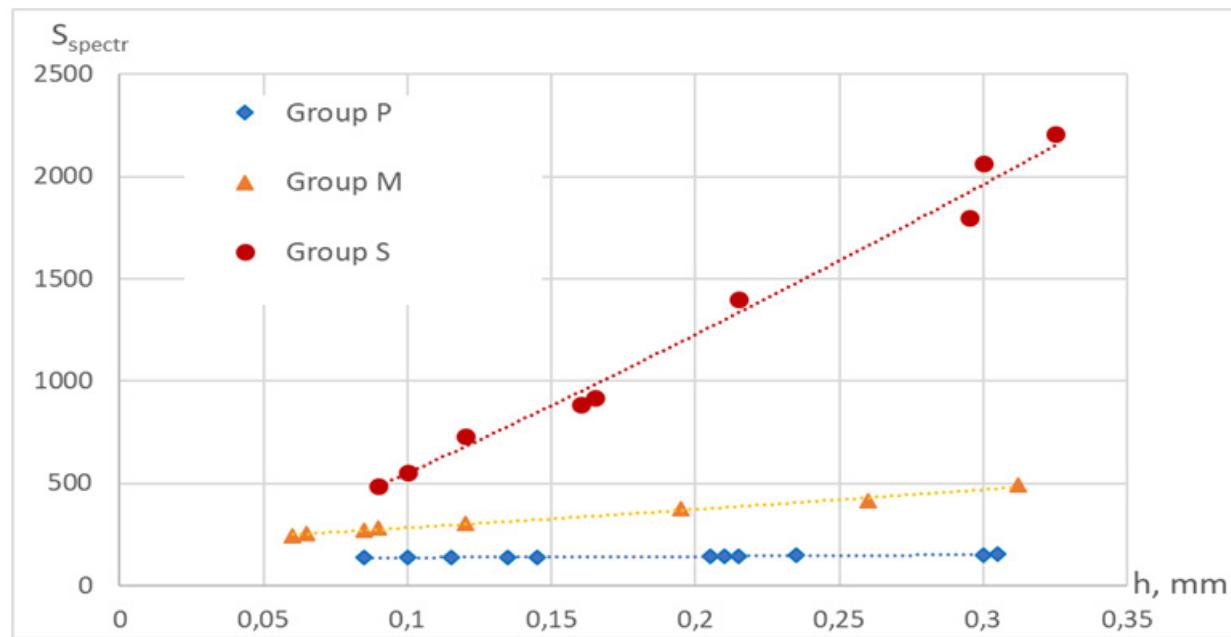


Рис. 6. Зависимость изменения величины интегральной виброзэнергии (площади спектrogramмы вибрационного сигнала) от величины фаски износа по задней грани СМП

Fig. 6. Dependence of the change in the magnitude of the integral vibration energy (the area of the vibration signal spectrogram) on the magnitude of the wear chamfer along the back face of the replaceable cutting insert

Развитие износа СМП сопровождается трансформацией характера микропрофиля обработанной поверхности. При начальном износе инструмента наблюдается минимальное искажение регулярного характера профиля поверхности, определяемого главным образом кинематической составляющей (то есть радиусом скругления при вершине СМП и величиной продольной подачи). Деградация геометрии режущего инструмента со временем ведет к искажению микропрофиля. Интенсифицируется влияние вибраций и деформационных процессов. При том первоначальное снижение высотных параметров шероховатости сопровождается потерей регулярности и завершается общей дестабилизацией микропрофиля. Динамика изменения иллюстрирует снижение достоверности и надежности прогнозных оценок, следовательно потерю управляемости процессом обработки.

Систематизация экспериментальных результатов позволяет выявить закономерно-

сти изменения площади спектrogramмы вибрационного сигнала с ростом фаски износа СМП (рис. 6), получить математические модели для прогнозной оценки остаточного ресурса режущего инструмента и формирования параметров качества обработанной поверхности. Существенное превышение уровня интегральной виброзэнергии в отсутствии резонансных явлений и негативном влиянии изношенности или неисправности оборудования и технологической оснастки сигнализирует об образовании дефектов режущей кромки СМП и потере контроля над процессом обработки, что требует соответствующих управляющих воздействий.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований в полной мере согласуются с теоретическими представлениями о закономерностях процесса резания, формирования параметров качества обработанной поверхности [13, 14], износа режущего инструмента

[15, 16], а также принципами оптимальности режимов резания, изложенными в работах [17–20]. Это подтверждает обоснованность предлагаемой концепции и методологии диагностики как базы построения интеллектуальных технологических систем механической обработки.

Повышение эффективности управления процессом механической обработки на основе интеллектуальных адаптивных систем требует многоэтапного мониторинга на основе многоканальной диагностики.

Измерение сигнала термо-ЭДС пробного прохода является эффективным инструментом предварительной диагностики, обеспечивающим снижение неопределенности технологической информации и оценку ресурса работоспособности СМП.

Оценка температурно-силовой напряженности и стабильности процесса, необходимость сопоставления текущей ситуации с теоретическими физическими моделями непосредственно в процессе обработки требует мониторинга составляющих силы резания.

Мониторинг процесса резания посредством оценки величины интегральной виброэнергии позволяет оценить стабильность обработки, текущее состояние и ресурс работоспособности режущего инструмента.

Многоэтапный мониторинг на основе многоканальной диагностики процесса резания позволяет уточнить область допустимых режимов применительно к состоянию элементов технологической системы и выполнить параметрическую оптимизацию с целью надежного обеспечения установленных требований к результату механической обработки.

Благодарности / Acknowledgments

Исследования выполнены в рамках выполнения НИР:

– «Научное обоснование и реализация цифровых технологий низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на поверхностях прецизионных

геометрически сложных металлических изделий», НИР № 19-19-00101. Российской научный фонд. 2020-2021, № 22-19-35026. Российской научный фонд. 2022.

– «Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с nanostructured поверхностью слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп», НИР № 101-01/2021 (26/365-21). Волгоградский государственный технический университет, 2021.

– «Изучение свойств nanostructured режущего инструмента и его контактных взаимодействий с обрабатываемым материалом», НИР № 101П-01/2022 (26/448-22). Волгоградский государственный технический университет, 2022; № 26/537-23. Волгоградский государственный технический университет, 2023.

The research was carried out as part of the research:

– «Scientific substantiation and implementation of digital technologies for low-temperature plasma formation of composite structures on the surfaces of precision geometrically complex metal products», Research and Development No. 19-19-00101. The Russian Science Foundation. 2020-2021, № 22-19-35026. Russian Science Foundation. 2022.

– «Determination of rational operating conditions for a carbide tool with a nanostructured surface layer of the working part according to the criterion of increasing durability when turning structural materials of various groups», Research № 101-01/2021 (26/365-21). Volgograd State Technical University, 2021.

– «Study of the properties of a nanostructured cutting tool and its contact interactions with the processed material», Research and Development No. 101P-01/2022 (26/448-22). Volgograd State Technical University, 2022; No. 26/537-23. Volgograd State Technical University, 2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsova E. M., Ovsyannikov V. E., Nekrasov R. Y., Putilova U. S. Development of an expert system for technological support of the required roughness when processing hardened steels on CNC machines // iPolytech Journal. Vol. 28 No 3 418-426 (2024). (In Russian) [Кузнецова Е. М., Овсянников В. Е., Некрасов Р. Ю., Путилова У. С. Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с ЧПУ. // iPolytech Journal. Т. 28 № 3 418-426 (2024)].
2. Unyanin A.N., Finageev P.R. Correction of the turning mode in conditions of uncertainty of technological information, taking into account changes in the parameters of the processing process // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 24 No. 3(107) 63-68 (2022). (In Russian) [Унягин А.Н., Финагеев П.Р. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса обработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук Т. 24 № 3(107) 63-68 (2022)].
3. Unyanin A.N., Finageev P.R. Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020). 022034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022034>.
4. Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V. Uncertainty management of technological information in digital production// Science intensive technologies in mechanical engineering. 7 (169) 23-31 (2025). (In Russian) [Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В. Управление неопределенностью технологической информацией в цифровом производстве // Наукоемкие технологии в машиностроении. 7 (169) 23-31 (2025)]. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31.
5. Kraynev D. V., Tikhonova Zh. S., Rogachev A.V. and others. The ability to evaluate the cutting properties of a coated carbide tool based on its thermophysical properties. // Modern high-tech technologies. 5(1) 64-70 (2024). (In Russian) [Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Рогачев А. В. и др. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по теплофизическими свойствам. // Современные наукоемкие технологии. 5(1) 64-70 (2024)]. DOI: 10.17513/snt.40006.
6. Kraynev D. V., Tikhonova Zh. S., Rogachev A.V. and others. The ability to evaluate the cutting properties of a coated carbide tool based on electrophysical properties. // Modern high-tech technologies. 6 30-36 (2024). (In Russian) [Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Рогачев А. В. и др. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по электрофизическими свойствам // Современные наукоемкие технологии. 6 30-36 (2024)]. DOI: 10.17513/snt.40060.
7. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-EMF as method for testing properties of replaceable contact pairs // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Springer International Publishing, Switzerland AG, 1097–1105 (2020). DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117.
8. Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Frolov E.M. Transformation of views on cutting theory during the transition to «digital». // Science intensive technologies in mechanical engineering. 6 (156) 3-12 (2024). (In Russian) [Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре». // Наукоемкие технологии в машиностроении. 6 (156) 3-12 (2024)]. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-6-3-12.
9. Krainev D. V., Polyanchikova M. Y., Bondarev A. A. Influence of the surface layer characteristics on the regularities of the cutting process. // MATEC Web of Conferences, Vol. 129 P. 01045 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/201712901045.
10. Chigirinskiy Yu. L., Kraynev D. V., Tikhonova Zh. S., Frolov E. M. Prospects of modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept // University proceeding. Volga region. Technical. 4 (68) 136-148 (2023). (In Russian) [Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М. Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции индустрия 4.0 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 4 (68) 136-148 (2023)]. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-4-13.
11. Kraynev D. V., Tikhonova Zh. S., Islamov A. M., Bondarev A. A. Assessment of the effect of instability of the cutting process on the roughness parameters of the treated surface // Izvestia Volgograd state technical university. 8 (279) 21–24 (2023). (In Russian) [Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Исламов А. М., Бондарев А. А. Оценка влияния нестабильности процесса резания на параметры шероховатости обработанной поверхности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 8 (279) 21–24 (2023)]. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-8-279-21-24.
12. Tchigirinsky, Ju. L., Chigirinskaya, N. V. and Evtyunin, A. V. Stability assessment methods of technological processes // MATEC Web of Conferences. Vol. 346, 6 p. (2021). DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603013>.
13. Suslov A. G. Engineering of the surface of parts. Moscow: “Mechanical engineering”, 2008.P.320.

(In Russian) [Суслов А. Г. Инженерия поверхности деталей. Москва: “Машиностроение”, 2008. 320 с.].

14. Suslov A. G. Technology of mechanical engineering. Moscow: “Mechanical engineering”, 2007.P.429. (In Russian) [Суслов А. Г. Технология машиностроения. Москва: Машиностроение, 2007. 429 с.].

15. Adaskin A. M., Vereshchaka A. A., Vereshchaka A. S. Study of wear mechanism of hard-alloy tools during machining of refractory alloys // Journal of Friction and Wear. Vol. 34, No. 3. 208-213 (2013). DOI: 10.3103/S1068366613030021.

16. Adaskin, A.M., Butrim, V. N., Vereshchaka, A. S. The effect of the properties of a hard alloy on the wear resistance of a coated carbide tool during processing of a heat-resistant chromium-based alloy. // Russian Engineering Research. 3 20-24 (2016). (In Russian) [Адаскин, А. М., Бутрим В. Н., Верещака А. С. Влияние свойств твердого сплава на износостойкость твердосплавного инструмента с покрытием при обработке жаропрочного сплава на основе хрома. // СТИН. 3 20-24 (2016)].

17. Astakhov V. P., Xiao X. A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system // Machining Science and Technology. Vol. 12 325–347 (2008).

18. Astakhov V. P., Outeiro J. Importance of temperature in metal cutting and its proper measurement/modelling // Measurement in Machining and Tribology, 2019. – Ch. 1. – P. 1–47.

19. Bezylazyniy V. F. Justification of the expediency of processing at the optimal cutting temperature set by A.D. Makarov // Vestnik UGATU. Vol. 12, 4 10-13 (2009) (In Russian) [Безъязычный В. Ф. Обоснование целесообразности обработки при оптимальной температуре резания, установленной А. Д. Макаровым // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Vol. 12, 4 10-13 (2009)].

20. Makarov A.D. Wear and durability of cutting tools. Moscow: “Mechanical Engineering», 1978.P.264 (In Russian) [Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М: “Машиностроение”, 1978. С.264.].