

Научная статья

УДК 621.91.01; 621.9.011

doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-3-12

Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре»

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Дмитрий Вадимович Крайнев², к.т.н.

Евгений Михайлович Фролов³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² krainevdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

³ e_frolov@vstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-5910>

Аннотация. Рассмотрены основные задачи теории резания металлов в традиционном представлении науки о механизмах и закономерностях изнашивания инструмента в процессе лезвийной обработки. Показано, что необходимость постоянного расширения области интересов специалистов продиктована совершенствованием конструктивных и инструментальных материалов и конструктивной структуры лезвийного инструмента – расширяющимся пространством твердосплавных инструментов с многослойными износостойкими покрытиями, конструктивных материалов с повышенными физико-механическими и специальными эксплуатационными характеристиками. Повышенные требования к стабильности процессов механической обработки определяются увеличением удельного веса дорогостоящего оборудования с ЧПУ в общей массе средств оснащения механообрабатывающих производств. Кастомизация машиностроительного производства и ужесточение функциональных требований к производимой продукции требует повышения надежности обеспечения результатов механической обработки. Фактором, определяющим изменение «вектора внимания» науки о резании металлов, следует считать расширение области влияния информационных технологий и, в частности, развитие систем искусственного интеллекта. Показано, что существующие средства цифровизации позволяют значительно повысить эффективность механообрабатывающего производства за счет развитых средств математического моделирования и прогнозирования результатов обработки. Дополнительным механизмом обеспечения стабильности и надежности металлообработки следует считать переход от систем мониторинга состояния элементов технологической системы к системам адаптивного управления с обратной связью. Обоснована возможность адаптации условий резания к «мгновенному» состоянию элементов технологической системы с учетом стохастического характера и варибельности свойств контактной пары «инструмент – заготовка». Таким образом, цифровизация и интеллектуализация производства определяют трансформацию взглядов на предмет и методы науки о резании.

Ключевые слова: теория резания, работоспособность инструмента, механизм изнашивания, качество поверхности, стабильность процесса, надежность производства, искусственный интеллект, адаптивное управление, информационный канал

Благодарности: при подготовке статьи использованы материалы исследований, выполненных за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре» // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-12

Transformation of narratives of the cutting operation theory in passing to the «digit»

Yuliy L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Dmitry V. Krainev², Ph.D. Eng.

Evgeny M. Frolov³, Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² krainevdv@mail.ru

³ e_frolov@vstu.ru

Abstract. The main tasks of the theory of metal cutting in the traditional scientific view of the mechanisms and patterns of tool wear in the operation of edge cutting machining are viewed. It is shown that the need for continuous expansion of the field of interests of specialists is derived from the improvement of construction and tool materials as well as blade tools structure. It is caused by the expanding spread of hard-alloy tools having multilayer wear-resistant coatings, structural materials with increased physical, mechanical and special operation characteristics. Exclusive standards for the stability of machining operations resulted from the gain in specific weight of expensive CNC equipment in the total mass of production tooling for machining industries. The customization of machine-building production and functional requirement toughening for the manufactured products specifies reliability growth for the results of machining. The factor determining the «vector of attention» change regarding metal cutting science should take into account the expansion of information technologies influence and, in particular, the development of artificial intelligence systems. It is shown that the existing means of digitalization can significantly increase the efficiency of machining production due to the developed means of mathematical modeling and forecasting of processing results. An additional mechanism for ensuring the stability and reliability of metalworking should be considered as the transition from monitoring systems of the technological system element state to adaptive control systems with a feedback. The possibility of adapting cutting conditions to the «instantaneous» state of the elements of the technological system is proved, taking into account the stochastic nature and a variability of the properties of the contact pair «tool – material blank». Thus, digitalization and intellectualization of production determine the transformation of views on the subject as well as metal cutting techniques.

Keywords: cutting theory, tool operability, wear mechanism, surface quality, process stability, production reliability, artificial intelligence, adaptive control, information channel

Acknowledgements: in the preparation of this article, the materials of research carried out were used at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-00101.

For citation: Chigirinsky Yu. L., Krainev D.V., Frolov E.M. Transformation of narratives of the cutting operation theory in passing to the «digit» / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-12

Введение

Развитие науки и технический прогресс расширяют возможности производства и открывают доступ к более совершенным кастомизированным продуктам, техническим средствам, машинам и устройствам. В машиностроении это инициирует рост уровня автоматизации как отдельных внутренних производственных процессов, так и технологических операций. Закономерно увеличивается доля применения станков с ЧПУ, а также их сложность и уровень автономности, что ведет к повышению стоимости производственного оборудования. Продуктивное время работы станка становится одним из ключевых

показателей финансовой эффективности. При этом, порядка 10 % общего времени работы станочного оборудования составляют затраты времени на выявление и ликвидацию отказов режущего инструмента. Эксперты [1] отмечают (рис. 1), что выход из строя инструмента (рис. 2) вызывает, помимо названных затрат времени, дополнительные потери в виде повышенного выхода производственного брака и увеличения интенсивности износа оборудования.

Непрогнозируемый (рис. 2) выход инструмента из строя приводит к необходимости преждевременной замены инструмента. В результате, возрастают расходы на инструмент, который, в ряде случаев [3],

вырабатывает не более 65 % ресурса. О существенности влияния стабильности и управляемости процессов изнашивания режущего инструмента на качество продукции и, в конечном итоге, на экономическую эффективность машиностроительного производства говорят эксперты – К. Zhu и Y. Zhang, X. Wu, J. Li, Y. Jin и S. Zheng, P. Wang и R. X. Gao, и др., – в области организации современного многономенклатурного машиностроительного производства. Оценка износа и прогнозирование срока службы инструмента необходима для достижения устойчивого производства, поскольку они обеспечивают научную основу для принятия важных решений, таких как планирование технического обслуживания и управление запасами.

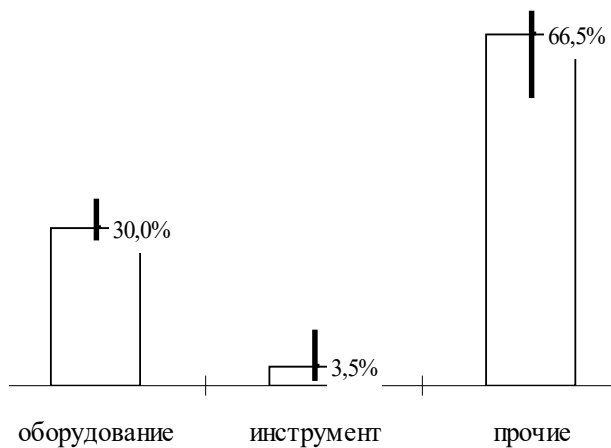


Рис. 1 Укрупненная структура затрат [1]

Fig. 1 Enlarged cost structure [1]

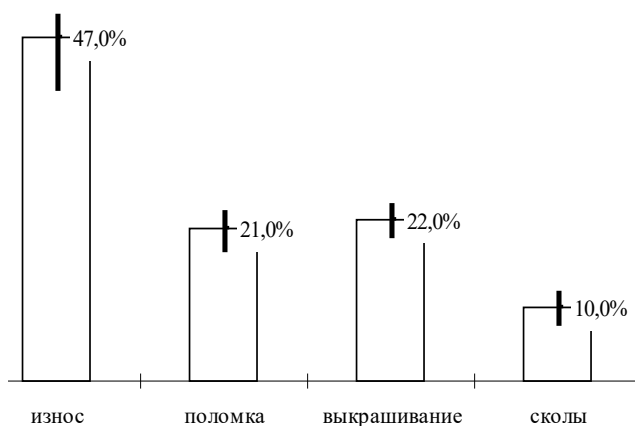


Рис. 2 Отказы инструмента [2]

Fig. 2 Tool failures [2]

Стабильность технологической операции обеспечивается определенным комплексом свойств инструмента. В зависимости от области применения, к функциональным свойствам инструмента относят высокую твердость, сопротивление истиранию, красностойкость и устойчивость к химическому (диффузионному) изнашиванию, высокую вязкость – для работы в условиях ударных нагрузок и др. Прогнозируемый, стабильный процесс изнашивания инструмента предоставляет возможность обоснованного прогнозирования ресурса времени работы инструмента до критической величины. Образование сколов и выкрашивание режущей кромки имеет вероятностный характер, который проблематично спрогнозировать, следовательно, и результаты прогнозирования в отношении результатов технологической операции, также будут неоднозначными.

Отметим что, до определенного момента времени, основной интерес специалистов в области науки о резании металлов – научные школы Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова, Л.В. Худобина и др., – был направлен именно на изучение физико-химических процессов, определяющих работоспособность режущего инструмента и на поиск направлений повышения его работоспособности.

Необходимость повышения ресурса работоспособности инструмента и производительности обработки привели к практически повсеместному применению режущих твердосплавных пластин с многослойными износостойкими покрытиями [4, 5], доля которых в общей массе режущего инструмента достигает до 90 %. Износостойкие покрытия (рис. 3 а, б) позволяют повысить срок службы инструмента, стойкость к нагрузкам в 2 – 6 раз, термостойкость и скорость обработки свыше 25 %, а также снизить расход инструмента и СОЖ.

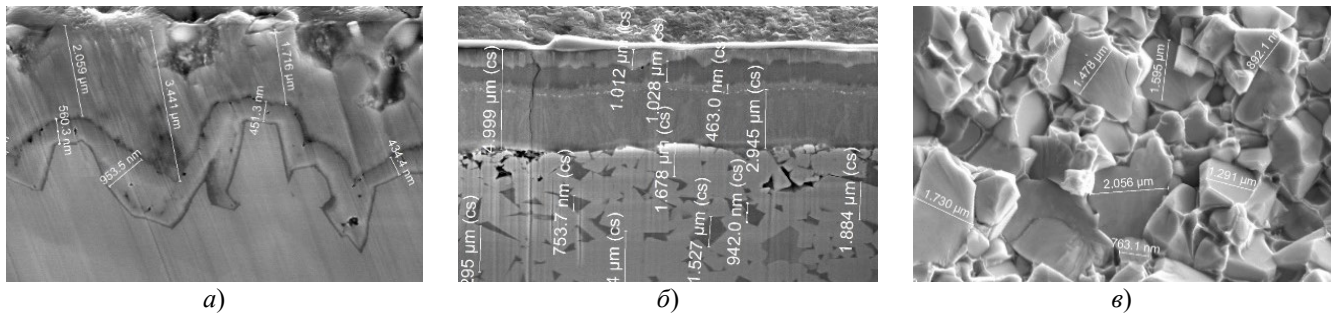


Рис. 3. Непостоянство и неоднородность размеров элементов структуры твердосплавного инструмента с износостойким многослойным покрытием [15]:

а – многослойное покрытие; *б* – приповерхностный слой твердосплавной матрицы с покрытием; *в* – твердосплавная матрица

Fig. 3. Variability and heterogeneity of structural elements sizes for carbide tools having a wear-resistant multilayer coating [15]:

a – multilayer coating; *b* – surface layer of a coated carbide matrix; *c* – carbide matrix

Повышение износостойкости инструмента обеспечивается за счет функциональности отдельных слоев покрытия, обеспечивающих снижения интенсивности окислительных и диффузионных процессов, адгезии, формирование термоизоляции, и т. д. Стабильность свойств твердосплавного инструмента с покрытиями и, следовательно, стабильность процессов лезвийной обработки следует считать недостаточной, поскольку физико-механические [7] свойства твердосплавных пластин варьируются (рис. 3 *а*, *в*) в достаточно широких интервалах.

Влияние структурных элементов современного режущего инструмента на контактные процессы при резании

Особо остро вопросы прогнозирования периода стойкости и мониторинга состояния режущего инструмента стоят в автоматизированном производстве, оснащённом оборудованием с программным управлением – такое производство, при должной организации, уже можно условно считать «цифровым». Применение дорогостоящего оборудования диктует необходимость повышения эффективности производства – и в части производительности обработки, и в отношении работоспособности инструмента, и в отношении обеспечения стабильного обеспечения технических требований к изготавливаемой продукции.

На работоспособность инструмента оказывают влияние: геометрические параметры инструмента; режимы резания; СОТС;

состояние оборудования и вспомогательного инструмента; жёсткость технологической системы. Режущие свойства сменных пластин определяются не только геометрическими параметрами [4], но и характеристиками износостойких покрытий, твердосплавной матрицы и др. Количественная оценка данных параметров достаточно трудоёмка и, как правило, требует разрушающих методов контроля.

Форма, характер износа, а также диапазон режимов резания зависят от физико-механических свойств и химического состава материалов контактной пары. Указанные характеристики напрямую определяют интенсивность отдельных составляющих разрушения инструмента: адгезия, диффузия и другие [8]. Одним из главных факторов, интенсифицирующих износ инструмента с ростом скорости резания, является температурное воздействие [9]. Следует отметить отсутствие однозначности в определении значимости и характера влияния технологических и конструктивных параметров обработки на ее результат. Например, ряд исследователей [4, 9] утверждают, что при обработке на низких скоростях резания, то есть при относительно невысоких контактных температурах, преобладают адгезионно-усталостный и абразивный виды изнашивания. По другим данным [8], как адгезионно-усталостный, так и диффузионный механизмы изнашивания могут существовать в широком диапазоне скоростей. Интенсификация данных механизмов износа в диапазоне высоких скоростей резания в значительной степени определяется

химическим составом материалов контактной пары и характерна для обработки материалов склонных к циклическому стружкообразованию.

Применение износостойких многослойных покрытий (табл. 1) оказывает существенное влияние на характер контактного взаимодействия при резании

1. Область применения покрытий

1. Coatings applicable scope

Основной материал	Характерное свойство	Основное назначение	Ограничения
TiN	Химическая пассивность	Снижение интенсивности наростообразования, силовой и температурной напряженности	Низкая эффективность при обработке вязких алюминиевых, титановых и хромоникелевых сплавов
Al ₂ O ₃	Низкая теплопроводность, жаропрочность	Создание барьера для диффузионного износа в диапазоне температур 600...1000 °С [9, 10]	Хрупкость, отсутствие сопротивления ударным и знакопеременным нагрузкам
TiC, TiCN, TiAlN	Высокая прочность, стойкость к абразивному воздействию, жаропрочность, химическая стойкость	Повышение твердости поверхности, создание теплового барьера на контактных поверхностях инструмента [13]	

Происходит перераспределение тепловых потоков, а также уменьшаются силы трения по передней поверхности инструмента и нормальные силы. Закономерно уменьшается степень пластической деформации в зоне стружкообразования. Вместе с тем, отмечается существенная зависимость эффективности покрытий от технологии (CVD / PVD) их нанесения и определенная противоречивость [4] в оценке области применения и ограничений с учетом технологии нанесения

Кроме того, температурно-силовое воздействие на инструмент приводит к упругопластической деформации режущего клина, что дополнительно изменяет физическую картину взаимодействия инструмента с заготовкой. На участке пластического контакта образуются поперечные трещины, расположенные вдоль режущей кромки, перпендикулярно направлению схода стружки. Интенсивность разрушения износостойких покрытий различается в зависимости от состава режущей пластины и назначенных режимов резания, однако имеет общий качественный характер [4].

Таким образом, отдельные элементы многослойных износостойких покрытий и твердосплавной матрицы при качественном

сохранении общей динамики контактного взаимодействия влияют на интенсивность отдельных процессов и явлений. Это выражается в количественном изменении величины износа инструмента и результатов обработки.

Экспериментальная оценка свойств режущего инструмента – методика

Изучение контактных процессов и режущих свойств инструмента выполнялось при точении предварительно обработанных заготовок из конструкционной легированной стали 40X (5135, 5140) – группа обрабатываемости *P* по ГОСТ 19042-80 (ИСО 1832-85), хромистой нержавеющей стали 40X13 (AISI420) – группа обрабатываемости *M*, и жаропрочной стали марки 08X21H6M2T (ЭП54, 329) – группа обрабатываемости *S*.

Инструментальный материал – твердосплавные пластины типоразмера WNMG 08 04 08 для чистовой и получистовой обработки с многослойным Ti(CN) / Al₂O₃ / TiN CVD покрытием. Состав экспериментального оборудования и методы исследования инструмента показаны в табл. 2.

2. Оборудование и методы исследований

2. Equipment and research methods

Характеристика	Метод исследования	Оборудование
Работоспособность	Стойкостные испытания	Станок токарно-револьверный с ЧПУ OKUMA Genos L-300 M
Контактные процессы	Металлографические исследования и спектральный анализ –FIB (Focused ion beam) микроскопия	Растровый двухлучевой электронный микроскоп VERSA 3D FEI
Температуропроводность и теплопроводность	Метод лазерной вспышки	LFA 467
Поверхностная электропроводность	Измерения на постоянном токе	Многофункциональный цифровой измеритель MS8226 DMM
Объемная электропроводность	Измерения на постоянном и переменном токе	Измеритель иммитанса E7-25
Микропрофиль рабочих поверхностей		Профилометр Mitutoyo surfest sj-210
ТермоЭДС пробного рабочего хода	Естественная термопара «инструмент – заготовка»	Цифровой осциллограф Velleman PCS500

Экспериментальная оценка свойств режущего инструмента – обсуждение

Измерения микропрофиля поверхности сменных режущих пластин выявили существенный разброс значений шероховатости. Диапазон колебаний значений среднеарифметического отклонения профиля Ra превысил 140 %. Фактическое значение параметра превысило заявленное производителем (Ra 0,4 мкм) более чем в 2 раза. Установлено, что морфология поверхности режущих пластин не позволяет в полной мере компенсировать разброс количественных значений параметров шероховатости, в том числе и при дополнительном плазменном воздействии на поверхность пластины [6].

Исследование динамики изменения температуры α и теплопроводности λ режущих пластин (рис. 4) выявило существенную вариабельность (~ 20 %) значений. Проведенные исследования относятся к разрушающим методам контроля [10].

Электрическое сопротивление промежуточного слоя оксида алюминия, как при обычных условиях, так и при температурах, соответствующих чистой и получистой обработке, существенно превышает удельное сопротивление материалов внешнего (TiN) и внутреннего (Ti[CN]) слоев износостойкого покрытия. Существенная неоднородность результатов измерения (варьирование превышает кратность два) и

значительная величина относительной погрешности (до 90 % для пластин группы обрабатываемости M и до 35 % для группы обрабатываемости S) не позволяют использовать данную характеристику для надежной оценки свойств режущих пластин.

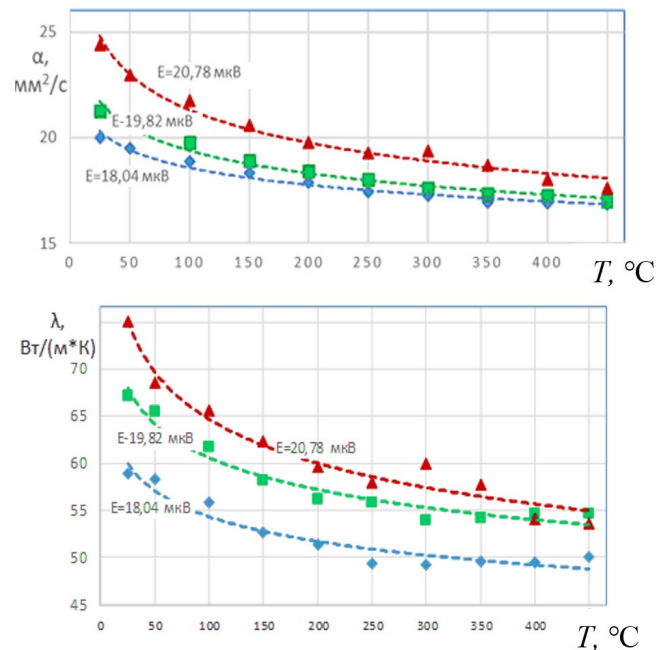


Рис. 4. Зависимость теплофизических характеристик твердосплавного инструмента с покрытием от температуры и термоЭДС пробного рабочего хода

Fig. 4. Dependence of the thermal and physical characteristics of a coated carbide tool on the temperature and thermal EMF of the test stroke

В результате стойкостных испытаний выявлена достаточно сильная корреляция (рис. 5) между периодом стойкости и величиной термоЭДС, генерируемого естественной термопарой «инструмент – заготовка» в режиме пробного рабочего хода.

Металлографические исследования поверхностного слоя (см. рис. 3) твердосплавных пластин выявили неоднородность и непостоянство размеров износостойких покрытий, структуры твердосплавной матрицы, а также наличие внутренних дефектов в ее объеме в виде микротрещин и полостей между твердосплавной матрицей, износостойким покрытием и его отдельными слоями.

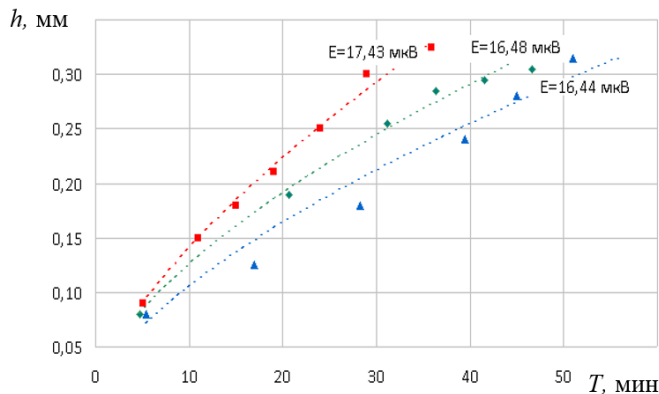


Рис. 5. Интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента: группа обрабатываемости S ; режимы: $t = 0,5$ мм; $s = 0,3$ мм/об; $v = 80$ м/мин

Fig. 5. The wear rate of the carbide tool: machinability group S ; modes: $t = 0,5$ mm; $s = 0,3$ mm/rpm; $v = 80$ m/min

Выявленные дефекты относятся к несовершенству технологии изготовления режущего инструмента, являются причиной разброса физико-механических характеристик, напрямую влияют на режущие способности инструмента, что подтверждается существенным разбросом периода стойкости, установленного в результате стойкостных испытаний [15]. Сложное многофакторное взаимодействие в процессе резания ограничивает надежность и достоверность прогнозирования стойкости инструмента.

Управление процессами обработки в современном производстве

Как уже отмечалось ранее, при технологической подготовке во внимание принимаются не только стойкость режущего инструмента, определяющая длительность его работы и объем произведенных изделий, но и надежность обеспечения заданных технических требований. Повышение эффективности обработки требует внесения определенных корректировок как на этапе технологической подготовки, так и непосредственно при выполнении технологической операции, что определяет актуальность и практическую значимость задачи диагностики и мониторинга состояния, режущего инструмента.

В условиях автоматизированного производства с высокой долей технологического оборудования с ЧПУ широко применяются различные системы контроля геометрических параметров режущего инструмента, облегчающие точную настройку оборудования, такие как Renishaw™ или Hexagon™. Подобные системы позволяют фиксировать изменение размеров инструмента в результате износа, учитывать соответствующие коррекции в ЧПУ, а при наличии циклов автоматического измерения и подключения реляционной базы данных расширяют возможности адаптации оборудования. Однако следует отметить, что, в данном случае, фиксируется изменение только геометрических параметров, без учета физико-механических характеристик инструмента и закономерностей процесса резания, но, тем не менее, такой подход может рассматриваться как определенное приближение к «цифре». Стохастическая вариабельность фактических характеристик режущего инструмента (рис. 3) вызывает необходимость именно оперативной диагностики технологической системы [11].

Наиболее популярными информационными каналами диагностики и мониторинга состояния режущего инструмента являются тензометрические измерения составляющих силы резания, эффективной мощности резания и мощности по отдельным приводам, измерения вибраций, акустическая эмиссия.

Подобные системы интегрированы в станочные ЧПУ, но предназначены только для сигнализации и предотвращения аварийных ситуаций, и не реализуют полноценного адаптивного управления. Некоторые [3, 12] реализованы в качестве лабораторных стендов или прототипов, но не нашли широкого применения в производственных условиях.

Основными барьерами промышленной реализации подобных систем являются стохастическая природа математических моделей, положенных в основу алгоритмов управления, необходимость наработки значительного объема баз данных, а также сам характер процесса резания, ограничивающий возможность полноценной работы измерительных систем в зоне обработки.

В качестве одного из направлений повышения точности и надежности прогнозирования в условиях цифрового производства рассматривается применение нейронных сетей, которые призваны дополнить результаты регрессионного анализа, преодолеть физическую несогласованность в традиционных подходах к прогнозированию работоспособности инструмента [13]. Отметим, что применение нейронных сетей сопровождается серьезными проблемами. В первую очередь это зависимость от программного и аппаратного обеспечения. Необходимость обработки больших объемов информации требует высокого быстродействия и, следовательно, существенных вычислительных мощностей. Во-вторых, требуются сложные рекурсивные алгоритмы, длительные процедуры подбора рациональной структуры нейросети и большое время обучения. Генерация результатов на основе некоторого опыта в режиме «черного ящика» на практике затрудняет оценку достоверности и внесение изменений. Результаты расчетов с использованием AI (искусственный интеллект и нейросети обычно рассматриваются как синонимы), также, как и традиционные методы прогнозирования, имеют вероятностный характер, а значит, не избавлены от недостатков статистического анализа. Добавим, что результаты нейросетевого прогнозирования чрезвычайно

чувствительны к достоверности исходной информации. В то же время, надежность исходной информации чаще всего рассматривается специалистами в области искусственного интеллекта, как понятие, производное от релевантности (частоты упоминаний) [14], что не может считаться корректной оценкой достоверности и значимости. Таким образом, технология нейросетей не отменяет необходимости анализа сложного взаимодействия в процессе резания, выявления степени влияния отдельных факторов и мониторинга процесса. И, отметим, расширяет информационное поле науки о резании.

Выводы

Проблема прогнозирования работоспособности и мониторинга состояния режущего инструмента имеют высокую актуальность в условиях перехода к цифровому производству.

Цифровизация машиностроительной отрасли создает возможности повышения эффективности металлообрабатывающего производства, но требует внедрения системы оценки входных параметров и мониторинга хода технологической операции. Это предполагает интеграцию теоретических знаний, лабораторных методов выборочного контроля, информационных каналов сбора информации о ходе технологических процессов, а также программно-аппаратных средств цифрового анализа и адаптивного управления.

Вариабельность свойств режущего инструмента, определяемая сложностью и неоднозначностью технологии его изготовления, отражается на результатах процесса лезвийной обработки. Математические методы прогнозирования характеризуются существенной погрешностью и могут эффективно применяться в цифровом производстве только в сочетании с системами оперативного контроля состояния элементов технологической системы и адаптивного управления процессами обработки.

Реализация перехода к полноценному цифровому производству возможна на

основе синтеза знаний о закономерностях изнашивания инструмента и формирования свойств обработанной поверхности с современными математическими методами и технологиями искусственного интеллекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Износ** – нет // Промышленные страницы Сибири. 2020. № 3 (147).
2. **Ивашенко А.П.** Методы и средства контроля состояния режущего инструмента // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-3. С. 393–396.
3. **Martinov G.M., Grigor'ev A.S.** Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. Russ. Engin. Res. 33, 433–437 (2013). DOI: 10.3103/S1068798X13070137.
4. **Табак В.П., Худобин Л.В.** Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 9 (165). С. 414–418. EDN XZBNNR.
5. **Локтев Д., Ямашкин Е.** Основные виды износостойких покрытий // Наноиндустрия. 2007. № 5. С. 24–31. EDN NXPGVV.
6. **Azikov N.S., Brzhozovskii B.M., Krainev D.V. [et al.]** The Influence of Low-Temperature Plasma Modification on Contact Interactions of Cutting Tools // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 307–312. DOI 10.3103/S1052618823040040. EDN NIFAEM.
7. **Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Пleshакова Е.С.** Оценивание качества поверхностного слоя рабочей части режущего инструмента по параметру микротвердости // Металлообработка. 2015. № 2 (86). С. 15–21. EDN UAVUNZ.
8. **Липатов А.А., Агапов С.И.** Влияние размера карбидных зерен на режущие свойства вольфрамкобальтовых твердых сплавов при точении стали 12X18H10T // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 18–19. EDN НТКТАJ.
9. **Постнов В.В., Хадиуллин С.Х., Малахов Е.Н., Старовойтов С.В.** Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 8(53). С. 118–125. EDN PXALAF.
10. **Chigirinskii, Yu.L., Tikhonova Zh.S., Krainev D.V.** Method for assessing the thermophysical

properties of the contact pair tool - steel workpiece // Journal of Physics: Conference Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021), Gelendzhik, 31 мая-06 июня 2021. Vol. 2131. Gelendzhik: IOP Publishing, 2021. P. 052012. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052012.URL. EDN ННКТКИ.

11. **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): Conference proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P. 1097–1105. DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117. EDN YEAGZO.

12. **Jr A., Morales-Menendez R., Rodriguez C., Sucar L.** (2006). Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center. 3706–3713. 10.1109/IJCNN.2006.247386.

13. **Mohse S. & Behrooz A.** Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. Journal of New Technology and Materials, 2022. fhal-03888252.

14. **Черепанов Н.В., Буслаев С.П.** Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 175–179. EDN GDPPMK.

REFERENCES

1. No wear // Industrial pages of Siberia. 2020, no. 3 (147).
2. Ivashchenko A.P. Methods and means of cutting tool state control // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015, no. 12-3, pp. 393–396.
3. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. Russ. Engin. Res. 33, 433–437 (2013). DOI: 10.3103/S1068798X13070137
4. Tabakov V.P., Khudobin L.V. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of the mechanical properties of layers of a multilayer coating, taking into account the functional parameters of the cutting process // Hardening technologies and coatings. 2018, vol. 14, no. 9 (165), pp. 414–418. EDN XZBNNR.
5. Loktev D., Yamashkin E. The main types of wear-resistant coatings // Nanoindustria. 2007, no. 5. pp. 24–31. EDN NXPGVV.
6. Azikov N.S., Brzhozovskii B.M., Krainev D.V. [et al.] The Influence of Low-Temperature Plasma Modification on Contact Interactions of Cutting Tools // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 307–312. DOI 10.3103/S1052618823040040. EDN NIFAEM.
7. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V., Pleshakova E.S. Quality assessment of the working part surface layer in a cutting tool according to the micro-confirmation parameter // Metalloobrabotka. 2015, no. 2 (86), pp. 15–21. EDN UAVUNZ.

8. Lipatov A.A., Agapov S.I. Influence of the size of carbide grains on the cutting properties of tungsten-cobalt hard alloys when turning steel 12X18H10T // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2004, no. 9, pp. 18–19. EDN HTKTAJ.

9. Postnov V.V., Khadiullin S.H., Malakhov E.N., Starovoitov S.V. Analysis of the key parameters of the cutting properties of instrumental hard alloys during treatment of hard materials // Vestnik Ufa State Aviation Technical University. 2012, vol. 16, no. 8(53), pp. 118–125. EDN PALAIS.

10. Chigirinskii, Yu.L., Tikhonova Zh.S., Krainev D.V. Method for assessing the thermal and physical properties of the contact pair tool - steel workpiece // Journal of Physics: Conference Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021), Gelendzhik, 31 мая-06 июня 2021. Vol. 2131. Gelendzhik: IOP Publishing, 2021. P. 052012. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052012.-URL. EDN ННКТКИ.

11. 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): Conference proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P. 1097–1105. DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117. EDN YEAGZO.

12. Jr A., Morales-Menendez R., Rodriguez C. & Sucar L. (2006). Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center. 3706–3713. 10.1109/IJCNN.2006.247386.

13. Mohse S. & Behrooz A. Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. Journal of New Technology and Materials, 2022. fihal-03888252.

14. Cherepanov N.V., Buslaev S.P. Problems and tasks of artificial intelligence development at a machine-building enterprise // Innovations and investments. 2021, no. 7, pp. 175–179. EDN GDPPMK.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.

The article was submitted 12.04.2024; approved after reviewing 16.04.2024; asseped for publication 22.04.2024.

