

УДК 62-52; 621.09.06; 621.09.08; 621.09
doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции Индустрия 4.0

Ю. Л. Чигиринский¹, Д. В. Крайнев², Ж. С. Тихонова³, Е. М. Фролов⁴

^{1,2,3,4}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград Россия

¹julio-tchigirinsky@yandex.ru, ²krainevdv@mail.ru,

³tikhonovazhs@yandex.ru, ⁴e_frolov@vstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цифровая трансформация создает возможности перехода промышленности на новый уровень производства, но требует модернизации технологического оборудования до цифровой технологической системы. Это предполагает рост уровня автоматизации и автономности производственной позиции в результате повышения эффективности производства, что и является целью работы. *Материалы и методы.* Экспериментальные исследования процесса резания проводились на станке с числовым программным управлением Okuma Genos L300-M с применением обычных и наномодифицированных твердосплавных пластин с многослойным покрытием фирмы Sandvik Coromant и CVD и фирмы Korloy. Морфологические и металлографические исследования выполнялись с использованием FIB микроскопа FEI VERSA 3D. *Результаты.* Подтверждена взаимосвязь стойкости режущих пластин с многослойным износостойким покрытием и величиной термоЭДС пробного прохода, а также уровня сил резания и их колебаний с параметрами шероховатости обработанной поверхности. Предложен способ интеграции устройств числового программного управления со сторонними приложениями и измерительными устройствами для управления процессом резания в режиме реального времени. Предлагается способ повышения эффективности обработки за счет внедрения методов предварительной и оперативной диагностики. *Выводы.* Предложен способ повышения автономности и уровня автоматизации технологического оборудования.

Ключевые слова: интеллектуальная технологическая система, адаптивное управление, диагностика процесса резания, технологический интеллект

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Для цитирования: 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. 2023. № 4. С. 136–148. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Prospects for modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept

Yu.L. Chigirinskiy¹, D.V. Kraynev², Zh.S. Tikhonova³, E.M. Frolov⁴

^{1,2,3,5}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹julio-tchigirinsky@yandex.ru, ²krainevdv@mail.ru,

³tikhonovazhs@yandex.ru, ⁴e_frolov@vstu.ru

Abstract. *Background.* Digital transformation creates opportunities for the transition of industry to a new level of production, but requires the modernization of technological

© Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

equipment to a digital technological system. This implies an increase in the level of automation and autonomy of the production position and, as a result, an increase in production efficiency, which is the purpose of the work. *Materials and methods.* Experimental studies of the cutting process were carried out on an Okuma Genos L300-M CNC machine using conventional and nanomodified carbide plates with a multilayer coating from Sandvik Coromant and CVD and Korloy. Morphological and metallographic studies were performed using the FEI VERSA 3D FIB microscope. *Results.* The relationship between the durability of cutting plates with a multilayer wear-resistant coating and the value of the thermal EMF of the test pass, as well as the level of cutting forces and their fluctuations with the roughness parameters of the treated surface is confirmed. A method for integrating the CNC with third-party applications and measuring devices for controlling the cutting process in real time is proposed. Proposed method increases the efficiency of processing through the introduction of methods of preliminary and operational diagnostics. *Conclusion.* A method of increasing the autonomy and automation level of technological equipment is proposed.

Keywords: intelligent technological system; adaptive control; diagnostics of the cutting process; technological intelligence

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-001.

For citation: Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M. Prospects for modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):136–148. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Введение

Общая направленность технического прогресса на повышение уровня жизни в условиях ограниченных ресурсов ведет к необходимости поиска путей повышения эффективности промышленного производства. На достижение указанной цели направлена концепция Индустрия 4.0, предполагающая повышение уровня проникновения информационных технологий в производственные процессы машиностроения и переосмысление принципов организации производства.

Суть предлагаемой цифровой трансформации заключается в создании многоуровневой интегрированной ИТ-инфраструктуры, автоматизации процессов, переводе информационных потоков в цифровую среду с большей доступностью и в общей оптимизации операционной деятельности.

В качестве основных преимуществ подобной трансформации выделяют: повышение производительности при общем сокращении затрат; повышение гибкости и кастомизация производства; повышение оперативности и надежности производства за счет роста уровня автоматизации; повышение безопасности производства за счет непрерывного контроля [1, 2].

Описанная трансформация предполагает целый комплекс цифровых технологий: промышленные платформы IoT; большие данные и аналитика; облачные вычисления; аддитивное производство; дополненная реальность; цифровые двойники; машинное обучение. Все они находятся на разном уровне реализации и практического применения, но с точки зрения реального производства уже сейчас позволяют автоматизировать некоторые производственные процессы [3].

Если же сконцентрироваться непосредственно на уровне механического цеха и направлении создания «умного / безлюдного производства» с пере-

дачей определенного функционала от человека к машине – в данном случае к технологической системе (оборудованию с числовым программным управлением), то возникает вопрос о наделении ее технологическим интеллектом, позволяющим решать текущие технологические задачи: обеспечение заданного качества производимой продукции, поддержание стабильности процесса обработки, нивелирование неблагоприятных внешних воздействий, превентивное определение момента времени смены инструмента и т.д. Практическая реализация осуществима при использовании идеологии цифровых технологических систем [4, 5] (в терминах Industry 4.0 – киберфизических систем). Такая система представляет собой совокупность физических и компьютерных компонентов, которые интегрированы друг с другом для безопасного и эффективного управления технологической операцией [6], например процессом резания.

Современное технологическое оборудование, оснащенное системами числового программного управления (ЧПУ), представляет собой достаточно технологичные и наукоемкие машины, снабженные целым рядом систем контроля и диагностики. Это системы компенсации тепловых деформаций, активный контроль вибраций, контроль усилий на приводах, контроль эффективной мощности резания и др. В данном контексте слово «контроль» не является смысловым аналогом английского *control* (управление), а подразумевает полноценный мониторинг с возможностью корректировки условий и, следовательно, результатов процесса. Следует заметить, что названные системы, как правило, используются только для оценки работоспособности станка – в качестве индикаторов аварийных ситуаций и минимизации поломок, – и не реализуют полный потенциал своих возможностей [7].

Целью работы является повышение эффективности процесса обработки посредством модернизации станков с ЧПУ до уровня цифровой технологической системы, что позволит не только повысить уровень автоматизации и автономности производственной позиции, но и обеспечить частичный перенос задач технологической подготовки (в частности, назначение режимов резания) непосредственно в производство [4].

Достижение указанной цели на первом этапе требует решения следующих задач:

- разработка универсального инструмента мониторинга процесса резания, учитывающего наиболее значимые факторы, оказывающие существенное влияние на закономерности процесса резания и формирования качества обработанной поверхности, применимые в производственных условиях и не требующие глубокой модернизации технологического оборудования;

- разработка механизма интеграции модулей мониторинга процесса резания и адаптивного регулирования режимов обработки, обеспечивающих поддержание параметров процесса резания в допустимых границах формирования требуемых параметров качества обработки.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарном обрабатывающем центре Okuma Genos L300-M. В процессе исследований проводились стойкостные испытания обычных и модифицированных твердосплавных пластин с многослойным CVD-покрытием фирмы

Sandvik Coromant (Швеция) и CVD- и PVD-покрытиями фирмы Korloy (Республика Корея) при точении материалов групп обрабатываемости «Р» и «М» с различными сочетаниями скорости резания и подачи. Перед испытаниями была проведена оценка режущих свойств пластин измерением термоЭДС пробного рабочего хода E , которая является комплексным показателем электро- и теплофизических свойств различных материалов [8].

Для измерения составляющих силы резания использовался токарный динамометр DKM 2010 фирмы TeLC (Германия). Конструкция динамометра и измерительная схема обеспечивали повышенную точность измерения составляющих силы резания (погрешность измерения 0,1 %).

Морфологические исследования рабочих поверхностей пластин, а также химико-спектральный анализ поперечных срезов режущего клина, полученных методом локального жесткого ионно-лучевого травления, проводились с использованием FIB микроскопа FEI VERSA 3D.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований стойкости режущего инструмента проведена по методике регрессионного моделирования полного факторного эксперимента [9, 10].

Результаты

Процесс резания – это синергичная совокупность множества элементарных физических и химических явлений: деформационных, термических, диффузионных и т.д. Стохастический характер этой сложной системы определяется существенной неоднозначностью химического состава, теплофизических и механических свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки.

Разброс химического состава, а также физико-механических свойств определяется воздействием различных факторов в процессе производства, регламентируется требованиями стандартов или технических условий и в настоящее время неустраним. Вследствие этого возникает необходимость учета фактических характеристик контактной пары инструмент-заготовка.

Режущие свойства инструмента определяются не только геометрическими параметрами, но также и физико-механическими, теплофизическими, электрическими свойствами инструментального материала, которые в свою очередь зависят от ряда факторов [11, 12]. Они же определяют форму и характер износа инструмента, а также уровень оптимальных режимов резания. Немаловажное значение в данном контексте имеет температурная составляющая [13].

В результате исследований [9, 14], были выявлены неоднородность и непостоянство толщин износостойких покрытий (рис. 1) в пределах одной партии инструмента, структуры твердосплавной матрицы (рис. 2), а также наличие внутренних дефектов матрицы – микротрещин (рис. 3), оказывающих влияние на режущую способность сменных многогранных пластин. Режущая способность инструмента оценивается периодом стойкости инструмента – временем работы до образования на задней поверхности пластины фаски износа заданной ширины.

Установлено, что результирующая режущая способность инструмента определяется совокупностью факторов, включающих параметры многослойных износостойких покрытий (в том числе непостоянство размеров, неравномерность распределения слоев и их взаимосвязь), свойствами твердосплавной

матрицы (структура, зернистость и др.), а также наличием внутренних дефектов (микротрещин и пр.).

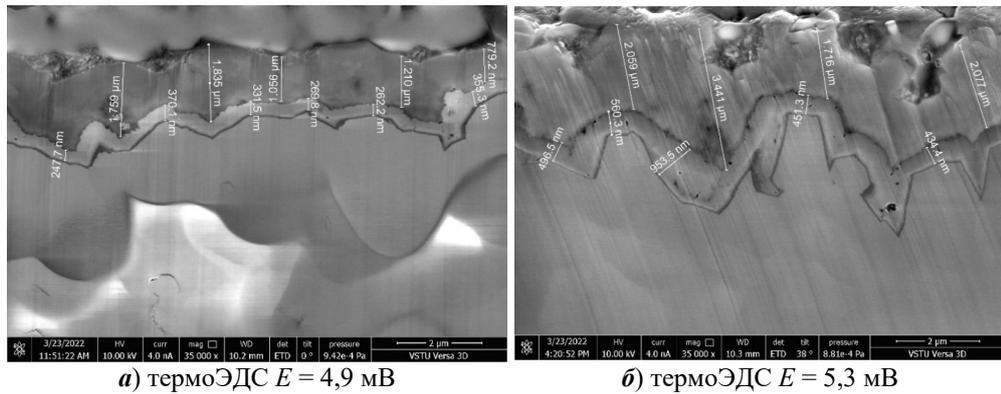


Рис. 1. Непостоянство размеров износостойких покрытий наномодифицированной пластины

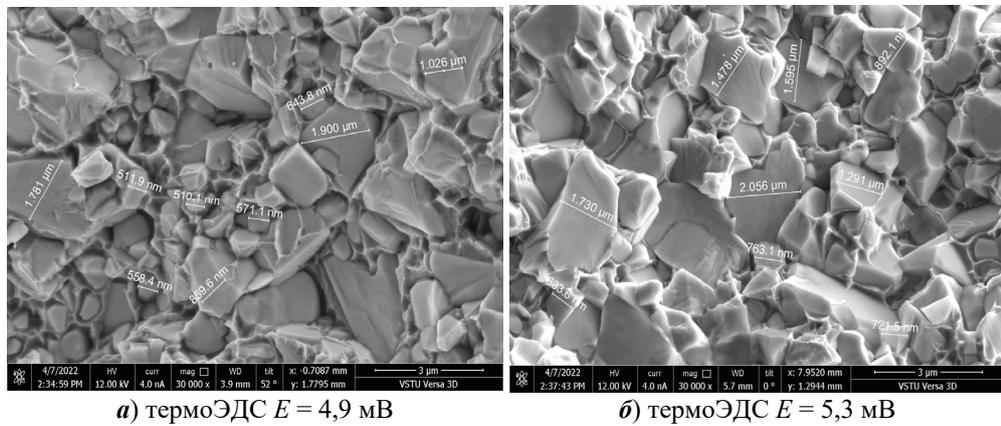


Рис. 2. Внутренняя структура твердосплавной матрицы

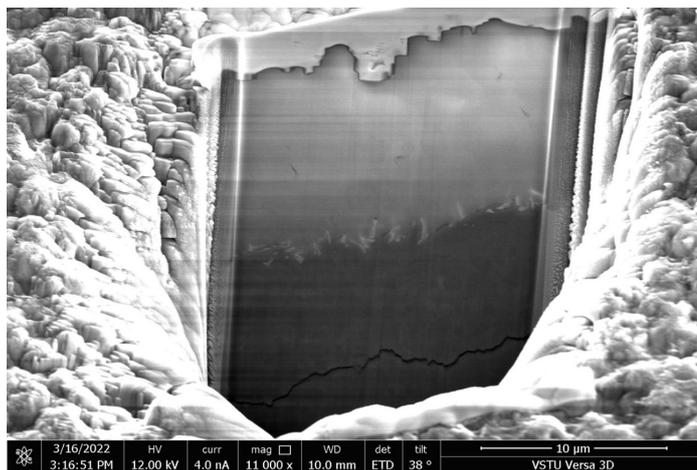


Рис. 3. Микротрещина в объеме твердосплавной матрицы инструмента, обнаруженная методом FIB-микроскопии

В результате проведенных исследований была подтверждена взаимосвязь периода стойкости сменных многогранных пластин с многослойным износостойким покрытием и величиной термоЭДС пробного прохода. Так, оценка значимости технологических факторов в регрессионных моделях при обработке сталей группы Р (рис. 4) и группы обрабатываемости М (рис. 5) иллюстрирует существенную взаимосвязь величины термоЭДС и периода стойкости как при работе режущими пластинами без модификации, так и подвергнутыми наномодификации. Кроме того, термоЭДС контактной пары «инструмент-заготовка», измеряемая на определенных режимах резания, обеспечивает хорошую повторяемость и, следовательно, статистически однородные результаты.

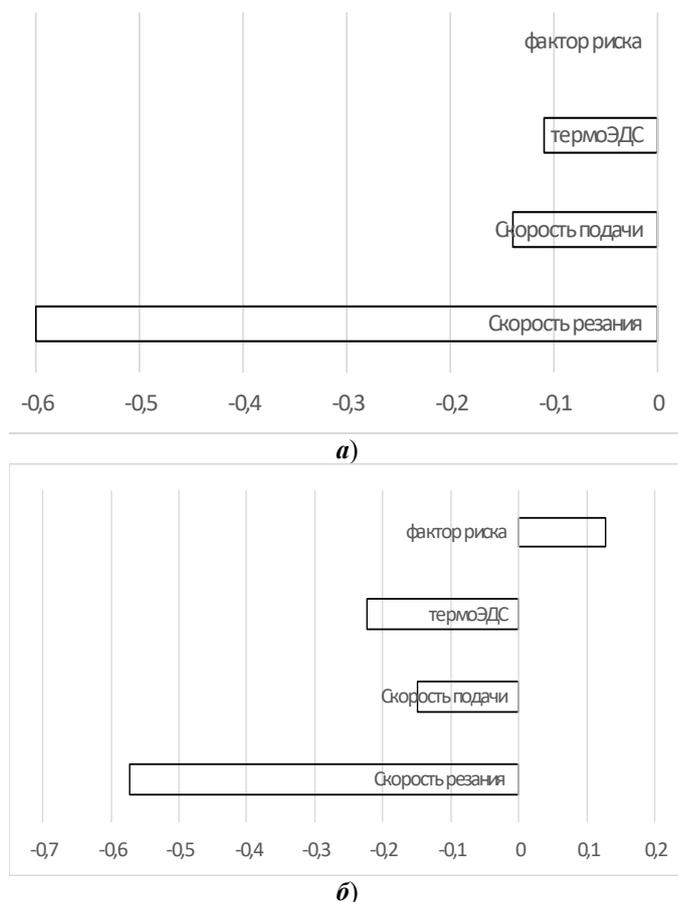


Рис. 4. Оценка значимости технологических факторов на период стойкости сменных твердосплавных пластин Sandvik при обработке стали группы Р:
a – пластины без модификации; *б* – наномодифицированные пластины

Установлена существенная взаимосвязь уровня составляющих сил резания, их колебаний (оценка по величине стандартного отклонения) с параметрами шероховатости обработанной поверхности (рис. 6).

Помимо того, установлено, что наличие упроченного поверхностного слоя при прочих равных условиях вызывает изменение не только уровня, но и амплитуды колебания сил резания (рис. 7).

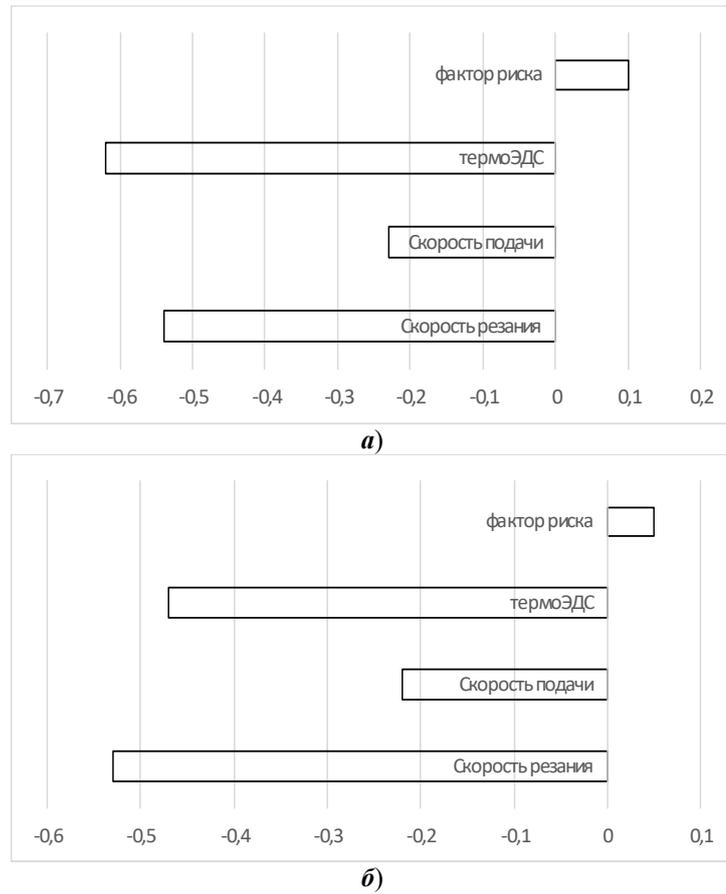


Рис. 5. Оценка значимости технологических факторов на период стойкости сменных твердосплавных пластин Sandvik при обработке стали группы М: **а** – пластины без модификации; **б** – наномодифицированные пластины

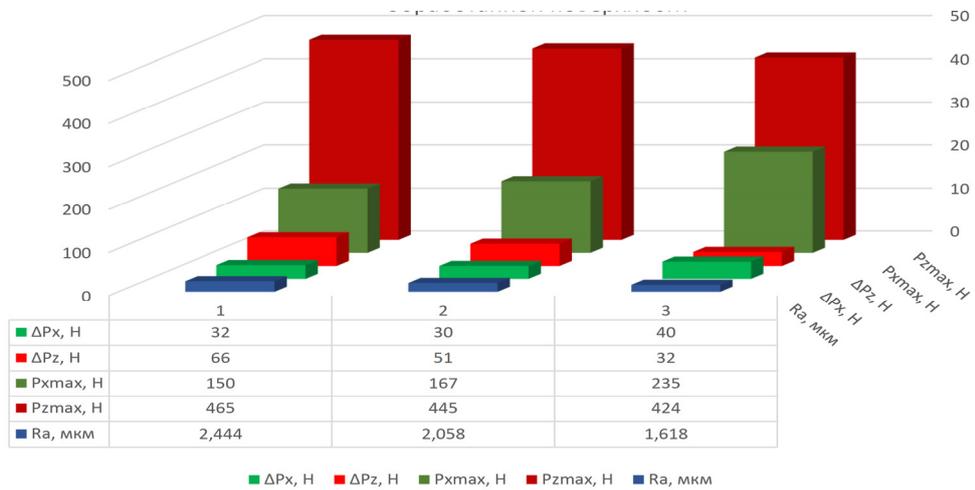


Рис. 6. Влияние величины и амплитуды колебания составляющих силы резания на шероховатость обработанной поверхности (сталь 12X18H10T – сплав Korloy NC5330; $t = 0,5$ мм; $V = 270$ м/мин; $S = 0,25$ мм/об)

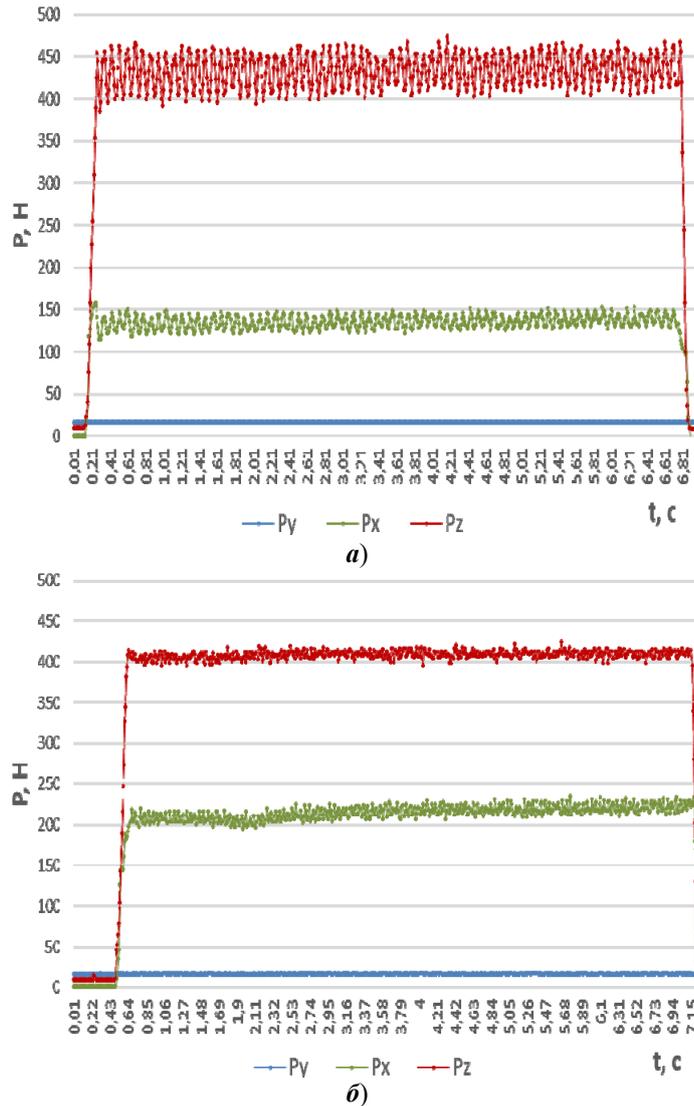


Рис. 7. Динамика составляющих силы резания при точении (сталь 12Х18Н10Т – сплав Korloy NC5330; $t = 0,5$ мм; $V = 270$ м/мин; $S = 0,25$ мм/об):
a – без упрочненного слоя; **б** – упрочненный слой глубиной 1,2 мм

Интеграцию модуля корректировки режимов резания на основании диагностического сигнала из зоны резания предлагается реализовать посредством интерфейса RS-232C, который позволяет осуществлять информационный обмен со сторонним программным обеспечением и измерительными датчиками, записывая необходимую информацию в системные переменные блока ЧПУ, как это было осуществлено на базе токарного обрабатывающего центра Okuma Genos L300-M (рис. 8).

Данный способ интеграции ядра устройств ЧПУ со сторонними приложениями и измерительными устройствами представляется наиболее удобным для управления процессом резания в режиме реального времени, использует стандартизованный открытый интерфейс информационного обмена и не требует значительной модернизации технологического оборудования [4, 15].

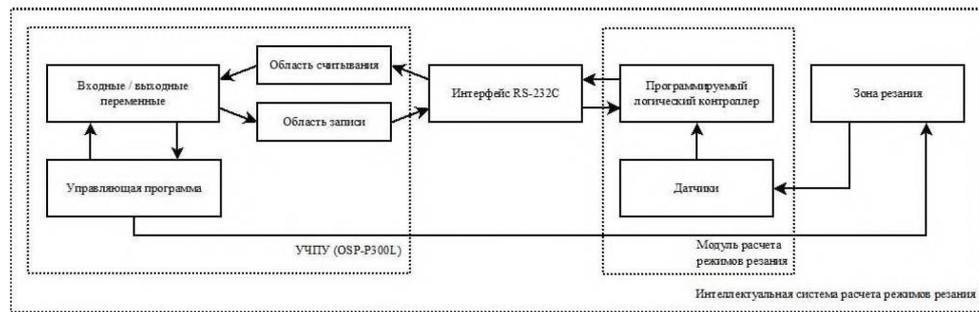


Рис. 8. Принципиальная схема интеллектуальной технологической системы на базе устройств ЧПУ Okuma OSP-P300L [4, 15]

Обсуждение

Практическая реализация концепции Industry 4.0 и цифровая трансформация производства вызывают необходимость совершенствования технологического оборудования, в частности станков с ЧПУ, за счет увеличения уровня автоматизации существующих и формирования новых функциональных возможностей. И в данном случае рост автономности и адаптивности не может быть осуществлен без развития систем обратной связи. Развитие инструментального производства позволяет повысить надежность производства, но не способно полностью исключить вариативность рассогласующих факторов, и лишь определяет области допустимых режимов обработки. Корректировка требует нахождения фактических количественных значений отдельных показателей, которые возможно найти с помощью разрушающих методов исследования. Это может быть осуществлено в лабораторных условиях, но для производства является излишне трудоемким и практически неприменимым процессом [7, 13].

В данном случае задача может быть решена за счет сочетания методов предварительной и оперативной диагностики. Так, в качестве достоверного информационного канала, позволяющего осуществлять предварительную диагностику фактических свойств контактной пары, инструмент-деталь предлагается использовать термоЭДС пробного рабочего прохода. Если сигнал термоЭДС позволяет судить о физико-механических свойствах контактной пары, то силы резания являются чувствительными не только к свойствам поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, но и позволяют динамически отслеживать ход процесса резания. Кроме того, дублирование каналов обратной связи позволяет повысить не только информативность, но и надежность управления процессом обработки. Это также позволяет выполнять часть задач технологической подготовки непосредственно на этапе производства [4].

Модульная реализация диагностическо-адаптивной компоненты системы ЧПУ позволяет произвести модернизацию оборудования на основе станочной оснастки без существенного изменения и вмешательства в конструкцию станка с ЧПУ.

Заключение

Таким образом, в работе предложен инструментарий повышения эффективности операций механической обработки на станках с ЧПУ. Предло-

жены принципы и метод модернизации оборудования за счет повышения автономности и уровня автоматизации.

Существенное повышение эффективности процессов механической обработки может быть получено за счет полного использования ресурсов цифровых технологических систем, в качестве прототипов которых можно рассматривать современные станки с ЧПУ, оснащенные достаточно функциональным набором сенсоров. Следует признать, что функциональные возможности таких сенсоров на современном этапе развития станочных систем используются не в полной мере – преимущественно для мониторинга состояния отдельных элементов технологической системы и сигнализации о наступлении аварийной ситуации. Интеграция математических моделей физических процессов формирования качества изготавливаемой продукции и изнашивания режущего инструмента в программное обеспечение систем ЧПУ позволит сформировать «технологический интеллект» цифровой технологической системы и полноценно использовать идеи концепции Industry 4.0.

Список литературы

1. Цифровизация промышленности: задачи, преимущества внедрения. 2023. URL: <https://adeptik.com/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti/?ysclid=lhkdv9l0sq181533403>
2. Сонных М. В. Индустрия 4.0 – реализация цифровой трансформации производств. 2019. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/industriya-4-0-realizaciya-cifrovoj-transformacii-proizvodstv?ysclid=lhkg4o7488871835533>
3. Сабитов О. 7 ключевых технологий Индустрии 4.0: от машинного обучения до 3D-печати. 2020. URL: <https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>
4. Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Фролов Е. М. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Технические науки*. 2022. № 8 (134). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48 EDN: PFVKOK.
5. Ингеманссон А. Р. Цифровая производственная система для механообрабатывающего производства: структура, функционирование, программный производственно-технологический комплекс и анализ технико-экономической эффективности // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Технические науки*. 2020. № 11 (113). С. 30–39.
6. Tiwari D. D., Naskar S., Sai A. S., Palleti V. R. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems / ed. by Metin Türkay, Rafiqul Gani // *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2021. Vol. 50. P. 1259–1264. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50194-7
7. Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Капустин М. В., Палкин Д. А. Перспективы технологической подготовки в условиях современного производства // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2023. № 1 (272). С. 16–19. doi: 10.35211/1990-5297-2023-1-272-16-19 EDN: MAJJAC.
8. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // *Conference proceedings ICIE 2019 (Sochi, Russia, 25–29 march 2019)*. Switzerland, AG : Springer International Publishing, 2020. P. 1097–1105. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_117 EDN: YEAGZO
9. Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп : заключительный отчет о НИР № 101-01/2021 (26/365-21) ; ВолгГТУ, ИМАШ РАН, 2021.
10. Чигиринская Н. В., Чигиринский Ю. Л., Горобцов А. С. Моделирование неперiodических стохастических процессов : учеб. пособие. Волгоград : ВолгГТУ, 2020. 107 с.

11. Лоладзе Т. Н. Основы создания эффективных инструментальных материалов для обработки жаропрочных сплавов и специальных сталей : конспект лекций. Тбилиси : Грузинск. политехн. ин-т, 1976. 44 с.
12. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
13. 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
14. Изучение свойств наноструктурированного режущего инструмента и его контактных взаимодействий с обрабатываемым материалом : заключительный отчет о НИР № 101П-01/2022 (26/448-22) ; ВолгГТУ, ИМАШ РАН, 2022.
15. Frolov E. M., Krainev D. V., Tikhonova Zh. S. Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment // Proceedings at 2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter. [Publisher: IEEE Xplore], 2018. 4 p. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684

References

1. *Tsifrovizatsiya promyshlennosti: zadachi, preimushchestva vnedreniya = Digitalization of industry: challenges, advantages of implementation*. 2023. (In Russ.). Available at: <https://adeptik.com/blog/cifrovizatsiya-promyshlennosti/?ysclid=lhkdv9l0sq181533403>
2. Sonnykh M.V. *Industriya 4.0 – realizatsiya tsifrovoy transformatsii proizvodstv = Industry 4.0 – implementation of digital transformation of production*. 2019. (In Russ.). Available at: <https://www.secuteck.ru/articles/industriya-4-0-realizatsiya-cifrovoy-transformatsii-proizvodstv?ysclid=lhkg4o7488871835533>
3. Sabitov O. *7 klyuchevykh tekhnologiy Industrii 4.0: ot mashinnogo obucheniya do 3D-pechati = 7 key technologies of Industry 4.0: from machine learning to 3D printing*. 2020. (In Russ.). Available at: <https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>
4. Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Frolov E.M. Digitalization of mechanical engineering production: technological preparation, production, tracking. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High technology in mechanical engineering*. 2022;(8):39–48. (In Russ.). doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48 EDN: PFVKOK
5. Ingemansson A.R. Digital production system for machining production: structure, operation, software production and technological complex and analysis of technical and economic efficiency. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High technology in mechanical engineering*. 2020;(11):30–39. (In Russ.)
6. Tiwari D.D., Naskar S., Sai A.S., Palleti V.R. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems / ed. by Metin Türkay, Rafiqul Gani. *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2021;50:1259–1264. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50194-7
7. Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S., Kapustin M.V., Palkin D.A. Prospects for technological training in modern production conditions. *Izvestiya Volgo-gradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2023;(1):16–19. (In Russ.). doi: 10.35211/1990-5297-2023-1-272-16-19 EDN: MAJJAC
8. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs. *Conference proceedings ICIE 2019 (Sochi, Russia, 25–29 march 2019)*. Switzerland, AG: Springer International Publishing, 2020:1097–1105. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_117 EDN: YEAGZO
9. Determination of rational operating conditions for carbide tools with a nanostructured surface layer of the working part according to the criterion of increasing durability when

- turning structural materials of various groups: final research report No. 101-01/2021 (26/365-21); VolgGTU, IMASh RAN, 2021.
10. Chigirinskaya N.V., Chigirinskiy Yu.L., Gorobtsov A.S. *Modelirovanie neprerodicheskikh stokhasticheskikh protsessov: ucheb. posobie = Modeling of non-periodic stochastic processes: textbook*. Volgograd: VolgGTU, 2020:107. (In Russ.)
 11. Loladze T.N. *Osnovy sozdaniya effektivnykh instrumental'nykh materialov dlya obrabotki zharoprochnykh splavov i spetsial'nykh staley: konspekt lektsiy = Fundamentals of creating effective tool materials for processing heat-resistant alloys and special steels: lecture notes*. Tbilisi: Gruzinsk. politekhn. in-t, 1976:44. (In Russ.)
 12. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya = Optimization of cutting processes*. Moscow: Mashinostroenie, 1976:278. (In Russ.)
 13. Postnov V.V., Khadiullin S.Kh., Malakhov E.N., Starovoytov S.V. Study of indicators that determine the cutting properties of tool hard alloys when processing difficult-to-cut materials. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2012;16(8):118–125. (In Russ.). EDN: PXALAF
 14. Study of the properties of a nanostructured cutting tool and its contact interactions with the material being processed: final research report No. 101P-01/2022 (26/448-22) ; VolgGTU, IMASh RAN, 2022.
 15. Frolov E.M., Krainev D.V., Tikhonova Zh.S. Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment. *Proceedings at 2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter*. [Publisher: IEEE Xplore], 2018:4. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684

Информация об авторах / Information about the authors

Юлий Львович Чигиринский

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28)

E-mail: Julio-Tchigirinsky@yandex.ru

Yuliy L. Chigirinskiy

Doctor of engineering sciences, professor, head of the sub-department of machinery technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Дмитрий Владимирович Крайнев

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28)

E-mail: krainevdv@mail.ru

Dmitriy V. Kraynev

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of machinery technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Жанна Сергеевна Тихонова

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Волгоградский государственный технический университет (Россия, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28)

E-mail: tikhonovazhs@gmail.com

Zhanna S. Tikhonova

Candidate of engineering sciences, associate professor of the sub-department of machinery technology, Volgograd State Technical University (28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Евгений Михайлович Фролов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-т Ленина, 28)

E-mail: eltar1983@yandex.ru

Evgeniy M. Frolov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of machinery
technology, Volgograd State
Technical University (28 Lenina
avenue, Volgograd, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 26.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 07.07.2023

Принята к публикации / Accepted 10.10.2023