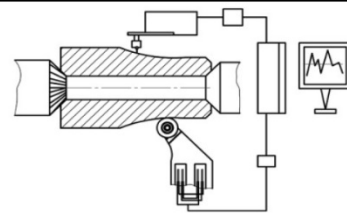


Автоматизированные подготовка и управление технологическими процессами



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 23-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 23-31.

Научная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31

Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Дмитрий Вадимович Крайнев², к.т.н.

^{1,2} 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>

Аннотация. На основе содержательного анализа понятия «неопределенность» и базовых понятий, и задач технологического проектирования и обеспечения машиностроительного производства построена классификация видов технологической информации в соответствии с видами и родами неопределенности. Определены виды технологической информации, наиболее значимо влияющие на формирование неопределенности различного рода. Обоснованы возможности и описаны информационные каналы, обеспечивающие эффективное управление неопределенностью технологической информации. Показано, что управляемое снижение неопределенности I, II и IV рода, применительно к процессу и результатам металлообрабатывающего производства, позволяет существенно снизить уровень неопределенности III рода – последствия принятых решений, что равнозначно повышению стабильности результатов производства. Эффективное управление неопределенностью II, IV и, частично, I рода, в цифровом производстве может быть реализовано за счет применения интеллектуальных технологических систем с адаптивным управлением, в том числе, самообучающихся.

Ключевые слова: неопределенность, информация, цифровое производство, технологическая подготовка, технологическое обеспечение, система адаптивного управления, интеллектуальная технологическая система

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В. Управление неопределенностью технологической информацией в цифровом производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 23–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31

Control of technological information ambiguity in digital production

Yuliy L. Chigirinsky¹, D.Eng.

Dmitry V. Krainev², PhD Eng.

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

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² krainevdv@mail.ru

Abstract. Based on a meaningful analysis of the concept of "ambiguity" and basic concepts, as well as the tasks of technological design and support of machine-building production, a classification of types of technological information is constructed in accordance with the types and varieties of ambiguity. The types of technological information that most significantly

affect the formation of ambiguity of various kinds are identified. The possibilities are substantiated and the information channels providing effective ambiguity control of technological information are described. It is shown that the controlled reduction of ambiguity of the I-st, II-nd and IV-th, in relation to the process and results of metalworking production, can significantly reduce the level of ambiguity of the III-rd kind, these are implications of the decisions, and all this can be described as an equisignificant way to increase the stability of production results.

Keywords: ambiguity, information, digital production, process design, engineering support, adaptive control system, intelligent process systems

For citation: Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V. Control of technological information ambiguity in digital production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 23–31. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-23-31

Базовые понятия.

Неопределённость – гносеологическое понятие [1], выражающее взаимное несоответствие: между применяемым, «устоявшимся», понятийным аппаратом и новыми сущностями – «онтологическая» или «объективная» неопределённость; между некоторыми свойствами объекта и способами их субъективного отражения – «субъективная» неопределённость – определяется невозможностью объективной количественной оценки характерных свойств объекта исследования.

В зависимости от решаемых задач, неопределённость может рассматриваться: как оценка «качества» информации (достоверность, полнота и др.) или как мера информации о состоянии исследуемой системы относительно некоторых «идеальных» условий – в данном контексте «идеальность условий» соответствует полностью детерминированному знанию о функционировании технической системы – в реальных условиях, с учетом стохастического характера процессов, количественной оценкой неопределённости является вероятность получения ожидаемого результата; как отражение вариативности выбора из множества альтернатив; как источник и, в определенной степени, количественная мера риска; как ограничитель управляемости и стабильности технической системы.

Различают неопределённость среды (I рода), неопределённость принятия решений (II рода), неопределённость последствий принятых решений (III рода) и вариационную

неопределённость (IV рода). Именно неопределённость IV рода связана с постоянным изменением параметров и условий функционирования технических (и, в частности, технологических) систем. Традиционно, в задачах технологического проектирования чаще всего рассматривают именно неопределённость IV рода. Вместе с тем, на начальных стадиях технологической подготовки производства следует учитывать неопределённость II рода (неоднородность справочных данных [4]). При решении задач маршрутного проектирования и выбора последовательности перемены баз может возникать неопределённость III рода.

Технологическая информация [2] включает различные виды данных, которые связаны с технологическими процессами изготовления деталей и сборки машин. Основные виды технологической информации:

1. Базовая – данные, которые содержатся в конструкторской документации на изделие;
2. Руководящая – требования отраслевых стандартов к технологическим процессам и методам управления ими, а также стандарты к оборудованию и оснастке;
3. Справочная – материалы по выбору технологических нормативов (режимы обработки, припуски, нормы расхода материалов), технологическая документация опытного производства, описания прогрессивных методов изготовления и т.д.

Сопоставляя виды технологической информации с базовыми понятиями и видами неопределённости, можно сделать следующее (рис. 1) заключение.

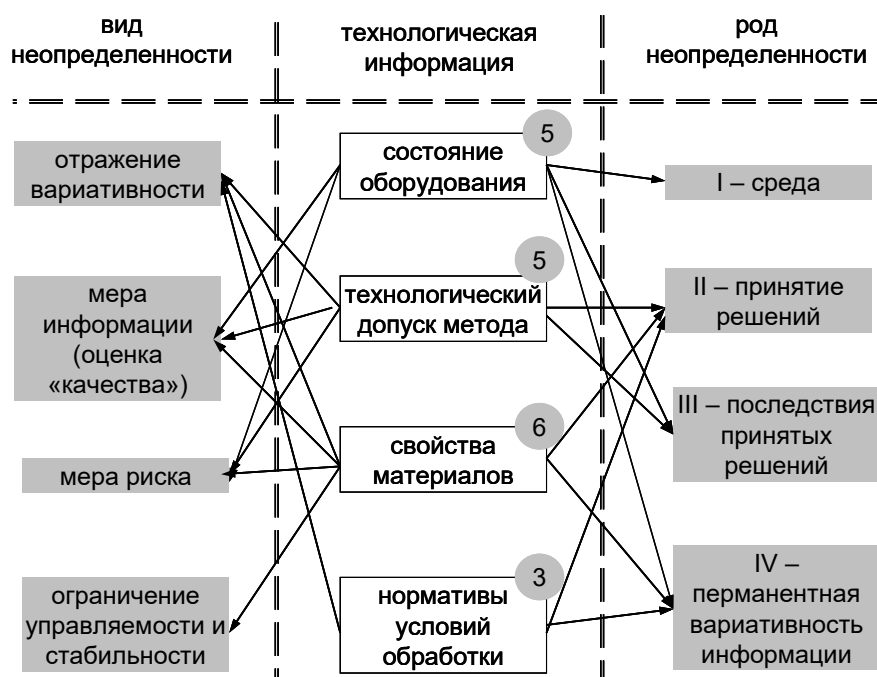


Рис. 1. Субъективная неопределенность технологической информации

Fig. 1. Subjective ambiguity of technological information

Числами на схеме (рис. 1) отмечено количество связей между элементами технологической информации и характеристиками понятия «неопределенность» [1]. Примем, что количество связей (по аналогии со «степенью» или «валентностью» вершины графа) определяет значимость элемента технологической информации. Тогда, наиболее значимыми, с точки зрения возможных рисков для производства, элементами технологической информации следует считать данные о характерных свойствах инструментальных и конструкционных материалов, сведения о состоянии оборудования и технологических возможностях методов обработки. Здесь же отметим, что неопределенность, применительно к информации и задачам технологической подготовки и обеспечения производства, носит субъективный характер, поскольку базовые понятия технологии являются устоявшимися.

Цифровое производство в машиностроении – это концепция подготовки, планирования и реализации производственных процессов, предполагающая использование единой информационной среды [3, 4]. Концепция цифрового производства подразумевает использование современных информационных технологий, в частности:

1. Цифрового моделирования – обработка процессов изготовления продукции на виртуальных моделях, включающих цифровые копии изделий, оборудования, технологических процессов;

2. Дополненной реальности [5] – наложение отображаемой компьютером информации на реальные объекты в процессе сборочного производства и логистических операций;

3. Промышленных интернет вещей [3];

4. Интеллектуальные технологические системы [6] – сбор, анализ и предоставление информации о состоянии технологических систем и процессах производства в режиме реального времени.

В числе преимуществ цифровизации машиностроительного производства называют:

1. Повышение уровня производительности труда и качества продукции;

2. Прогнозируемость результатов процессов производства и управления – снижение уровня неопределенности первого и третьего рода;

3. Снижение вероятных рисков за счет раннего обнаружения и своевременного устранения на этапе моделирования – снижение уровня неопределенности первого и третьего рода;

4. Снижение вероятных рисков за счет оперативного управления процессами на этапе производства – снижение уровня неопределенности второго и четвертого рода.

О неопределенности в технологии машиностроительного производства

Проблемы гарантированного обеспечения требуемого качества и точности изделий при обеспечении достаточной производительности обработки и работоспособности режущего инструмента являются важными для специалистов машиностроительного производства на протяжении всей истории науки об обработке металлов. Тематике назначения рациональных условий обработки посвящены исследования научных технологических школ, начиная от профессоров И.А. Тиме и К.А. Зворыкина и до настоящего времени [7 – 9]. Можно уверенно сказать, что существующие методы позволяют в той или иной мере приблизиться к рациональным или, иногда, оптимальным, условиям работы инструмента, но гарантированно

обеспечить эти условия при рассчитанных фиксированных режимах невозможно, поскольку сам процесс удаления стружки и формирования комплекса функциональных свойств поверхностного слоя изделия является нестационарным и имеет явно выраженный стохастический [10] характер. Решение задачи рационального назначения режимов условий обработки осложняется существенной вариативностью физико-механических, теплофизических свойств конструкционного и инструментального материалов [11]. Неопределённость является причиной того, что различие между расчетными и фактическими значениями выходных параметров достигает 20...30 % и более. Исследования, выполненные специалистами Волгоградской технологической научной школы [12] позволяет возможными причинами такой неопределенности считать особенности технологии производства материалов, используемых в производстве – несовершенства (рис. 2) и дефекты (рис. 3), возникающие при изготовлении, например, твердосплавного инструмента.

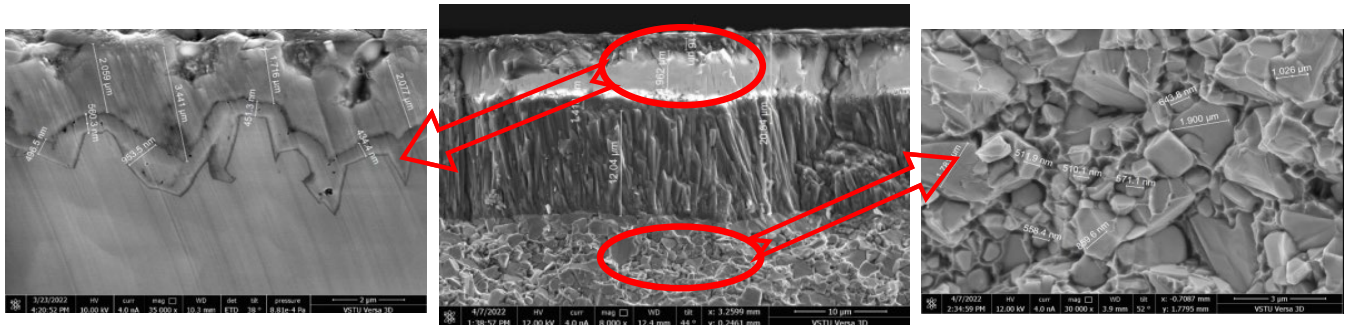


Рис. 2. Структура поверхностного слоя и матрицы твердосплавной многогранной пластины

Fig. 2. Structure of the surface layer and matrix of a carbide indexible insert

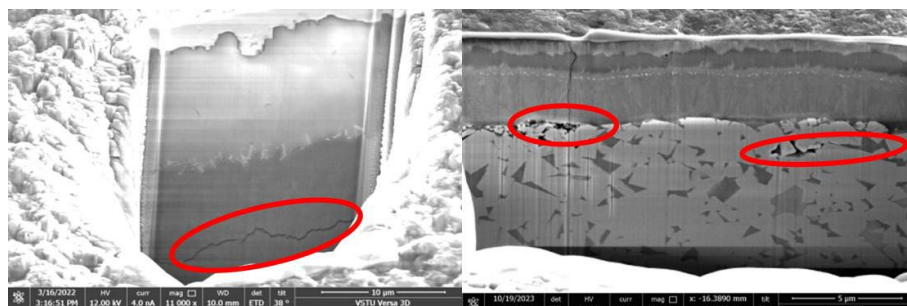


Рис. 3. Внутренние дефекты матрицы твердосплавной многогранной пластины

Fig. 3. Internal defects of the matrix of a carbide indexible insert

Определенный вклад в вариативность свойств инструментального материала, влияющих на эффективность процесса резания, вносит также и технология обработки поверхности (табл. 1, рис. 4) режущей пластины.

Очевидно, что изменение показателя Ra высоты микронеровностей рабочей

поверхности сменной многогранной твердосплавной пластины (СМП) в диапазоне + 15...+ 47 % среднего значения в расчете на отдельную СМП, или в диапазоне до ± 75 % среднего в пределах партии инструмента, существенно влияет на результаты обработки.

1. Вариативность среднего отклонения высоты микропрофиля Ra

1. Variability of the average deviation of the microprofile height Ra

Ra , мкм	Исследуемый образец			
	1	2	3	4
минимум	0,292	0,325	0,291	0,271
максимум	0,478	0,907	0,465	0,366
интервал	$0,385 \pm 24 \%$	$0,616 \pm 47 \%$	$0,378 \pm 23 \%$	$0,319 \pm 15 \%$

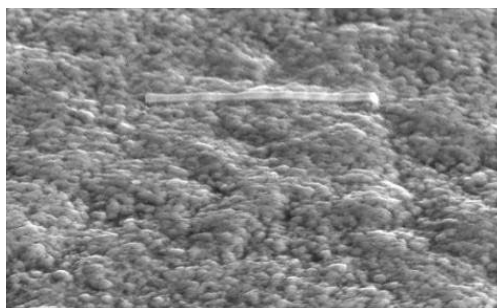


Рис. 4. Морфология поверхности СМП

Fig. 4. Morphology of the indexible insert surface

Существующие методы контроля свойств (табл. 2) материалов контактной пары «инструмент-заготовка» позволяют без

разрушения исследуемых образцов оценить параметры твердости поверхности.

2. Методы контроля свойств элементов технологической системы

2. Testing methods of technological system elements properties

Свойства материала	Методы контроля	
	Разрушающий	Неразрушающий
Заготовка		
Твердость	+	+
Микротвердость	+	-
Прочность	+	-
Теплопроводность	+	-
Инструмент		
Твердость	+	+
Микротвердость	+	+
Прочность	+	-
Стойкость к абразивному износу	+	-
Температуро- и красностойкость	+	-

Однако известно, что наиболее значимыми с точки зрения формирования комплекса свойств обработанной поверхности и изнашивания режущего инструмента, являются

теплофизические свойства материалов, в особенности при высоких скоростях резания. Оценка эффективности процесса резания на основе электро- и теплофизических свойств [12]

только инструментального материала характеризуется невысокой достоверностью. Так как результаты обработки – свойства поверхностного слоя, точность размеров и формы обработанной поверхности, закономерности изнашивания инструмента, формируются при взаимодействии инструментального и конструкционного материалов, то и оценка эффективности процесса должна выполняться комплексно, с учетом сочетания свойств материалов контактной пары «инструмент-заготовка».

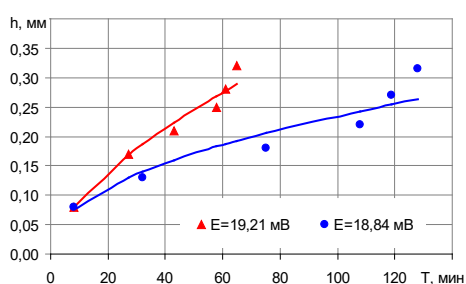
В качестве оценочного показателя работоспособности режущего инструмента, учитывающего комплекс свойств инструментального и конструкционного материалов принята, величина термоЭДС пробного рабочего хода. Поскольку величина показателя определяется при

фиксированных режимах [12] обработки, не зависящих от группы применимости твердого сплава и марки конструкционного материала, результаты контроля можно сравнивать для различных сочетаний материалов. Условия проведения стойкостных испытаний твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими покрытиями для различных условий обработки приведены в табл. 3. В результате проведенных испытаний доказано, что величину термоЭДС пробного рабочего хода можно рассматривать в качестве комплексного показателя работоспособности твердосплавного инструмента, в том числе инструмента с многослойными износостойкими покрытиями.

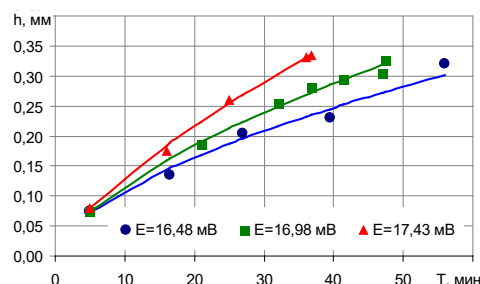
3. Условия проведения стойкостных испытаний

3. Conditions for conducting resistance tests

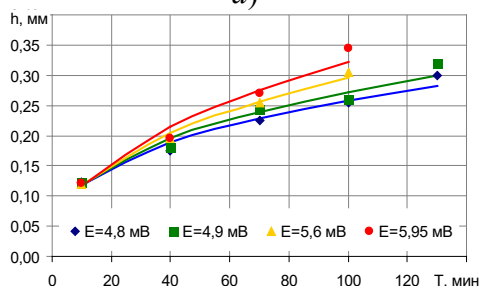
Материал заготовки	Инструмент (группа применимости)	Подача, мм/об	Скорость, м/мин	Диапазон термоЭДС, мВ	Рис. 5
40X13	Korloy WNMG 080408 MM NC9125 (M)	0,2	155	18,84...19,21	(а)
08X21Н6М2Т	Korloy WNMG 080408-VP2 UNC805 (S)	0,3	80	16,48...17,43	(б)
40X	Sandvik Coromant WNMG 080408 PM 4425 (P)	0,1	280	4,80...5,95	(в)
20X13	Sandvik Coromant WNMG 080408-MM 2220 (M)	0,1	210	11,60...13,90	(г)



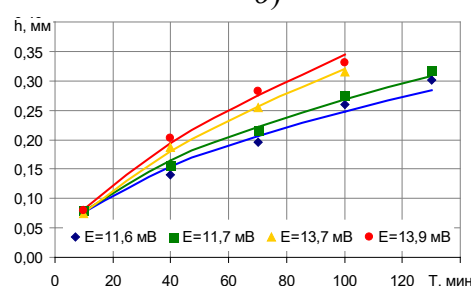
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента в зависимости от термоЭДС пробного рабочего хода

Fig. 5. The wear rate of the carbide tool depending on the thermal efficiency of the test stroke

Величина термоЭДС пробного рабочего хода: может быть измерена непосредственно в процессе обработки; не требует разрушения исследуемых образцов; обладает достаточно высокой чувствительностью к интенсивности изнашивания режущего инструмента – увеличение интенсивности изнашивания СМП в 1,4 – 1,9 раза отражается на изменении термоЭДС в пределах 1,0...1,6 мВ, т.е., не более чем на 7...10 %.

Следовательно, можно говорить о возможности применения этого показателя в качестве проактивного критерия работоспособности режущего инструмента на стадии подготовки производства и для оперативной диагностики сочетания материалов контактной пары «инструмент-заготовка» для коррекции предварительно назначенных режимов обработки.

В условиях развивающейся цифровизации металлообрабатывающего производства следует говорить не просто об оценке состояния отдельных элементов технологической системы. Полноценное цифровое производство, соответствующее положениям концепции Industry 4.0, предполагает существенное снижение [3] участия и влияния «человеческого фактора» в общей системе управления производственными

процессами и частичную передачу функций принятия решений кибернетической подсистеме интеллектуальной [6] технологической системы. Возможность «интеллектуализации» технологических систем базируется на построении систем диагностики, идентификации и управления технологическими системами за применения комплексных критериев и методов искусственного интеллекта [10, 13].

Влияние начальной неопределенности II и IV рода (рис. 1), отягощенное стохастическим характером процессов формирования комплекса показателей качества обработки (неопределенность IV рода) и изменением состояния оборудования и инструмента (неопределенность I рода), приводит к формированию неопределенности III рода. Специалисты ведущих технологических научных школ России [4, 9 – 11, 14, 15] обосновывают возможность снижения случайных воздействий на результат производства (неопределенность III рода) за счет применения систем адаптивного управления, в частности, самообучающихся [14] и систем, учитывающих стохастический характер изменения производственной ситуации [15], обеспечивающих динамическое управление неопределенностью I рода.

4. Функциональная схема управления неопределенностью

4. Operating diagram of ambiguity control

Этап	Содержание
1. Тарирование режущих пластин	Оценка однородности свойств СМП в рамках партии поставки. Группирование СМП с учетом установленных надежности и уровня неопределенности технологической информации.
2. Предварительное назначение режимов резания	Выбор и назначение режимов резания в соответствии с нормативными рекомендациями.
3. Оценка свойств контактной пары	Оценка свойств контактной пары в режиме пробного прохода с целью нивелирования неопределенности технологической информации.
4. Корректировка предварительных режимов резания	Коррекция режимов обработки по результатам оценки свойств материалов контактной пары и в соответствии с технологической задачей
5. Тензометрический мониторинг процесса	Оценка силовой напряженности процесса резания, вида контактного взаимодействия и динамической неустойчивости процесса обработки. Адаптивное управление в соответствии с задачами технологической операции
6. Вибрационный мониторинг процесса	Оценка неустойчивости динамики процесса резания, корректировка режимов обработки в соответствии с установленными граничными условиями. Предиктивная аналитика стабильности условий и обеспечения требуемых результатов обработки
<i>Примечание.</i> Этапы 5 и 6 выполняются непрерывно на протяжении всего технологического перехода; если результаты тензометрического и (или) вибрационного мониторинга неудовлетворительны, то выполняется возврат к этапу 4.	

В качестве перспективных информационных каналов, обеспечивающих достаточно эффективный мониторинг (табл. 3) состояния элементов технологической системы в процессе обработки, исследователи называют вибрационный [8 – 10, 12, 14] и динамический (тензометрический, силовой) [7, 9, 11, 12, 14] сигналы.

Заключение

Неоднозначность исходных данных, методов и результатов решения задач технологической подготовки и обеспечения машиностроительного производства определяется неопределенностью исходной и оперативной информации. Наиболее существенное влияние на комплексный результат производства оказывает неопределенность I, II, III рода. Эффективное управление неопределенностью II, IV и, частично, I рода, в цифровом производстве может быть реализовано за счет применения интеллектуальных технологических систем с адаптивным управлением, в том числе, самообучающихся. Эффективное управление неопределенностью II и III рода реализуется на этапе проектирования технологических операций, за счет предварительной диагностики, и на начальном этапе обработки, за счет оперативной комплексной диагностики свойств материалов контактной пары «инструмент-заготовка». Эффективное управление неопределенностью I и II рода может быть реализовано на начальных этапах технологической подготовки производства – при маршрутном проектировании, и непосредственно в ходе производства, за счет оперативного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорозкин А.М., Соколова О.И. Понятие "неопределённость" в современной науке и философии // Вестник Вятского гуманитарного университета, 2015. № 12. С. 5–12. EDN: VKAXZZ.
2. Терминологический словарь автоматизации строительства и производственных процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://slovar-avt.ru> (дата обращения: 14.03.2025). DOI: 10.34660/c0727-6092-6372-a
3. Ингеманссон А.Р. Технологические составляющие цифровизации производственного

процесса на машиностроительном предприятии // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 41–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-41-48. EDN PDJLDO.

4. Чигиринский Ю.Л. Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многоменклатурного производства / Ю.Л. Чигиринский, Д.В. Крайнев, Ж.С. Тихонова // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 4(154). С. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40. EDN EIXHSQ.

5. Леон К.С., Калачев О.Н. Применение дополненной реальности в сборочных процессах машиностроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. Т. 23, № 8. С. 346–349. DOI: 10.36652/0202-3350-2022-23-8-346-349.

6. Чигиринский Ю.Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства / Ю.Л. Чигиринский // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35

7. Снегирева К.К. Улучшение обрабатываемости инструментальных сталей резанием посредством управления свойствами обрабатываемого материала / К.К. Снегирева, С.А. Тараканов // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2021. № 4 (37). С. 52–58.

8. Кузнецова Е.М. Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с ЧПУ / Е.М. Кузнецова, В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, У.С. Путилова // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 418–426.

9. Остапчук А.К. Адаптивное управление чистовой токарной обработкой деталей транспортных машин на станках с ЧПУ / А.К. Остапчук, Е.М. Кузнецова / Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2019. Т.1. С. 98–103.

10. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 32–42.

11. Унянин А.Н. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса обработки / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 3 (107). С. 63–68.

12. Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С., Рогачев А.В., Нилидин Д.А., Чигиринская Н.В. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по теплофизическим свойствам // Современные научные технологии. 2024. № 5. С. 64–70; DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40006>.

13. Маслов Д.А. Модель для оценки износа режущего инструмента на основе искусственного интеллекта / Д.А. Маслов, В.Е. Овсянников, Г.Н. Шпитко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2023, № 3 (274). С. 27–30. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-27-30

14. Суслов А.Г., Медведев Д.А., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Система автоматизированного

технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 5. С. 40–44.

15. Решетникова Е.П. Формализация выбора контрольно-измерительных средств для оценки размерных характеристик деталей со сложнопрофильными поверхностями при разработке технологических процессов / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017, № 9 (204). С. 135–137.

REFERENCES

1. Dorozhkin A.M., Sokolova O.I. The concept of "uncertainty" in modern science and philosophy // Bulletin of Vyatka State Humanitarian University, 2015, no. 12, pp. 5–12. EDN: VKAXZZ.

2. Terminological dictionary of automation of construction automation and production processes [Electronic resource]. URL: <http://slovar-avt.ru> (date of access: 03/14/2025). DOI: 10.34660/c0727-6092-6372-a

3. Ingemansson A.R. Engineering process aspects of digitalization of machine-building production // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, no. 8 (158). pp. 41–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-41-48. EDN PDJLDO.

4. Chigirinsky Yu.L. Transformation of the information structure as a tool for efficiency increase in high-variety production / Yu.L. Chigirinsky, D.V. Krainev, Zh.S. Tikhonova // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, n. 4 (154). pp. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40. EDN EIXHSQ.

5. Leon K.S., Kalachev O.N. The use of augmented reality in the assembly processes of mechanical engineering // Assembling in mechanical engineering, instrument-making. 2022, vol. 23, no. 8, pp. 346–349. DOI: 10.36652/02-3350-2022-23-8-346-349.

6. Chigirinsky Yu.L. Current state and trends in development of technological engineering pre-production of machinery production / Yu.L. Chigirinsky // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 8 (110), pp. 29–35

7. Snegireva K.K. Improvement of machinability of tool steels by cutting by controlling the properties of the processed material / K.K. Snegireva, S.A. Tarakanov //

Resource-saving technologies of production and forming materials in mechanical engineering. 2021, no. 4 (37), pp. 52–58.

8. Kuznetsova E. M., Ovsyannikov V. E., Nekrasov R. Y., Putilova U. S. Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines. Polytech Journal. 2024, vol. 28, no.3, pp. 418–426.

9. Ostapchuk A.K. Adaptive process control system of fine turning of parts of transport machines on CNC machines / A.K. Ostapchuk, E.M. Kuznetsova / Modernization and scientific research in the transport sector. 2019, vol.1, pp. 98–103.

10. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B. Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, no. 7 (157), pp. 32–42.

11. Unyanin A.N. Correction of the turning mode under conditions of uncertainty of technological information, taking into account changes in machining parameters / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022, vol. 24, no. 3 (107), pp. 63–68.

12. Krainev D.V., Tikhonova Zh.S., Rogachev A.V., Nikitin D.A., Chigirinskaya N.V. The possibility of evaluating the cutting properties of a coated carbide tool by thermophysical properties // Modern science-intensive technologies. 2024, no. 5, pp. 64–70; DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40006>.

13. Maslov D.A., Ovsyannikov V.E., Shpitko G.N. Model for assessing the wear of a cutting tool based on artificial intelligence. // Izvestiya VolgSTU. Iss. Advanced technologies in mechanical engineering. 2023, no. 3 (274), pp. 27–30. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-27-30

14. Suslov A.G., Medvedev D.A., Petreshin D.I., Fedonin O.N. Automated technological system to ensure contact stiffness of machine parts // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, no. 5, pp. 40–44.

15. Reshetnikova E.P. Formalization of the choice of control and measuring instruments for assessing the dimensional characteristics of parts with complex surfaces in the development of process industries/ E.P. Reshetnikova, P.Y. Bochkarev // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2017, no. 9 (204), pp. 135–137.

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 28.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025.