

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-5-13

УДК 621.9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА И АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

TECHNOLOGICAL PREPARATION AND ADAPTIVE CONTROL IN DIGITAL PRODUCTION SYSTEMS

Ингеманссон Александр Рональдович,

кандидат техн. наук, главный технолог, e-mail: aleing@yandex.ru

Alexander R. Ingemansson,

C. Sc. in Engineering, Chief Process Engineer, e-mail: aleing@yandex.ru

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», 400071, Россия, г.

Волгоград, пр. Ленина, б/н

JSC «Federal Research and Production center «Titan-Barrikady», w/n Lenin av., Volgograd, 400071,

Russian Federation

Аннотация:

Статья посвящена разработке базовых принципов технологической подготовки современного автоматизированного производства при внедрении цифровых производственных систем (ЦПС) на основе обеспечения стабильности процессов механической обработки. Предложена система управления стабильностью процесса резания и качеством обработки в автоматизированном механообрабатывающем производстве при внедрении ЦПС, базирующаяся на контроле изменения силы резания и адаптивном управлении процессом резания по параметру рабочей подачи. Разработан программный производственно-технологический комплекс для автоматизации технологической подготовки производства и управления стабильностью процесса резания и качеством обработки в автоматизированном механообрабатывающем производстве при внедрении ЦПС.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, цифровые производственные системы, индустрия 4.0, технологический процесс, стабильность, механическая обработка, адаптивное управление.

Информация о статье: поступило в редакцию 05.07.2021

Abstract:

The article is dedicated to development of basic principles of technological preparation of modern automated industry, based on the implementation of digital production systems (DPS), by mean of providing stability of machining processes. The system of maintenance of cutting process stability and machining quality in automated metalworking industry by implementation of DPS suggested. The system is based on the control of cutting force and adaptive control of cutting process using feed parameter. The production-technological software complex for automated technological preparation of production and cutting process stability and machining quality maintenance in automated metalworking industry by mean of implementation of DPS developed

Keywords: technological preparation of production, digital production systems, industry 4.0, technological process, stability, machining, adaptive control

Article info: received July 05, 2021

Основные положения и порядок технологической подготовки производства (ТПП) продукции машиностроения и приборостроения устанавливаются ГОСТ Р 50995.3.1-96 «Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства» [1]. Углубление интеграции машиностроительных и информационных технологий, связанное с внедрением цифровых производственных систем (ЦПС), вызывает



Рис. 1. Сканер штрих-кодов мод. Eclipse 5145 («Honeywell»), применявшийся в экспериментальных исследованиях, и примеры штрих-кодов, идентифицирующих детали
Fig. 1. Bar-code scanner mod. Eclipse 5145 («Honeywell»), which was used in experimental investigations, and examples of bar-codes, which identify work-parts

необходимость совершенствования механизмов технологической подготовки автоматизированного производства.

Следует учитывать требования к технологическим процессам (ТП), устанавливаемые системой Государственных стандартов Российской Федерации ГОСТ Р 50995 «Технологическое обеспечение создания продукции». В п.5.2 ГОСТ Р 50995.0.1-96 «Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения» установлено, что одной из задач технологического обеспечения создания продукции является поддержание стабильности технологии в установившемся производстве [2]. Пункт 5.2.7 ГОСТ Р 50995.3.1-96 «Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства» гласит, что к определяющим технологическим и организационным решениям по производству

относятся предложения по обеспечению стабильности ТП и других элементов производства, непосредственно влияющих на качество изделия [1].

Согласно ГОСТ Р 57945-2017 стабильность ТП – это свойство ТП, обуславливающее постоянство распределений вероятностей его контролируемых параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне [3]. Случайный характер входных возмущающих факторов – характеристик заготовок и инструмента, колебание припуска и твердости обрабатываемого материала, а также изнашивание инструмента во время обработки определяют нестационарный характер процесса резания [4]. В связи с этим необходимы мероприятия по разработке активно-управляемой технологии для механообрабатывающего производства [5, 6].

С этим связана научная проблема, которая заключается в следующем. Современное технологическое оборудование и технологическая оснастка позволяют получать оперативную информацию о состоянии заготовки и характеристиках процесса резания, а также выполнять адаптивное управление (АУ) последним [7, 8, 9, 10]. Уровень развития машиностроительных и информационных технологий обеспечивает потенциальную возможность управления ТП с целью обеспечения стабильности и качества механической обработки. При этом использование указанной информации для управления носит в основном фрагментарный характер [11, 12, 13]. Сохраняется потребность в разработке математических моделей для ТПП, а также в разработке принципов организации и построения современной системы АУ ТП механической обработки в автоматизированном производстве при внедрении ЦПС с целью обеспечения его стабильности и качества продукции.

Решение представленной научной проблемы заключается в разработке принципов технологической подготовки цифровых производств на основе обеспечения стабильности процессов механической обработки.

В состав ЦПС для механообрабатывающего производства входит технологическое, контрольное, транспортное, складское оборудование. Информативная способность, которой обладают элементы ЦПС, описана в [14].

Принципиальной составляющей функционирования ЦПС является идентификация элементов системы, запись и передача информации, определяющей ход ТП [15, 16]. Предлагается использование технологии штрих-кодирования. В качестве носителей информации (кодоносителей) используются штрих-коды, позволяющие обращаться к записи в базе производственно-технологических данных. Они могут быть сгенерированы на любом ПК, имеют компактные размеры и не требуют особых условий для использования. В разработанной ЦПС для механической обработки штрих-коды сопровождают заготовки, столы-спутники,

инструментальные сборки и обработанные детали и могут быть удалены на любом этапе ТП. Система представляет собой сканер штрих-кодов (рис. 1), подключаемый к ПК или другому оборудованию – к стойке ЧПУ станка, к прибору для настройки инструмента вне станка и др. Указанным способом осуществляется автоматизированная фиксация и обмен между элементами ЦПС информацией, определяющей ход ТП. Связи в системе реализуются посредством информационных потоков между элементами ЦПС, представляющими собой оборудование механообрабатывающих цехов.

Для использования при ТПП и для реализации АУ процессом резания в ЦПС выполнено построение математических моделей функциональных (Pz) и выходных (Ra , Sm) параметров обработки для предварительного и чистового точения и фрезерования [17]. Для автоматизации ТПП и АУ процессами механической обработки разработан программный производственно-технологический комплекс (ППТК) для ЦПС [18].

Функционирование разработанной системы для обеспечения стабильности заданного качества обработки и работоспособности инструментов в ЦПС для механической обработки осуществляется следующим образом.

При предварительной обработке в качестве критерия АУ процессом резания выступает нагрузка на режущий инструмент, поддержание стабильных значений которой обеспечивает надежную работу режущего инструмента.

Для систем ЧПУ современных ОЦ требуемая или допустимая нагрузка на привод главного движения и, соответственно, на инструмент задается через процентное соотношение мощности резания $N_{рез}$ с учетом мощности холостого хода к мощности привода станка $N_{см}$. Характеристика нагрузки P для системы ЧПУ определяется следующим образом:

$$P = \frac{N_{рез}}{N_{ст}} * 100\% . \quad (1)$$

Инженером-технологом на этапе разработки ТП для предварительных операций определяются режимы резания. Скорость резания назначается исходя из требований по производительности и исходя из износостойкости инструментального материала. Коэффициент теплопроводности является присущей характеристикой выбранного инструментального материала. Предложена методика определения данной характеристики для современных твердосплавных инструментов с многослойными износостойкими покрытиями с целью использования при ТПП [19]. При проектировании ТП принимается номинальное значение твердости обрабатываемого материала. На основе разработанных математических зависимостей [17] производится расчет силы резания для заданных режимов и условий обработки. По формуле (1) определяется и фиксируется в ППТК для ЦПС соответствующая характеристика нагрузки P на привод главного движения станка для каждой детали в партии.

На стадии разработки операций ТП для чистового точения и фрезерования при заданной в КД величине Ra или Sm выполняется расчет соответствующего значения подачи с использованием математического аппарата, описанного в [17]. После определения требуемой подачи выполняется расчет соответствующей силы резания по формулам, приведенным в [17]. Для АУ чистовой обработкой контролируемая нагрузка P на привод главного движения станка для каждой детали в партии определяется по зависимости (1) и фиксируется в ППТК для ЦПС наряду с рассчитанным требуемым значением подачи s_o для точения и s_z , s_o или $s_{мин}$ для фрезерования.

Для автоматизации расчетов режимов резания, параметров шероховатости обработанной поверхности, силы резания и ее производных разработан программный технологический расчетный модуль, являющийся частью ППТК для ЦПС. При разработке модуля использованы математические модели, описанные ранее.

После выбора клавиши «Технологический калькулятор» открывается рабочее окно программного технологического расчетного модуля (рис. 2) и выполняется выбор одной из четырех вкладок:

1. Расчет силы резания Pz , H , мощности резания N , $кВт$ с учетом мощности холостого хода привода и уровня нагрузки на привод главного движения P , %;
2. Расчет подачи s_o для точения и s_z , s_o или $s_{мин}$ для фрезерования (рис. 3);
3. Расчет среднего арифметического отклонения профиля Ra , $мкм$;
4. Расчет среднего шага неровностей профиля Sm , $мм$.

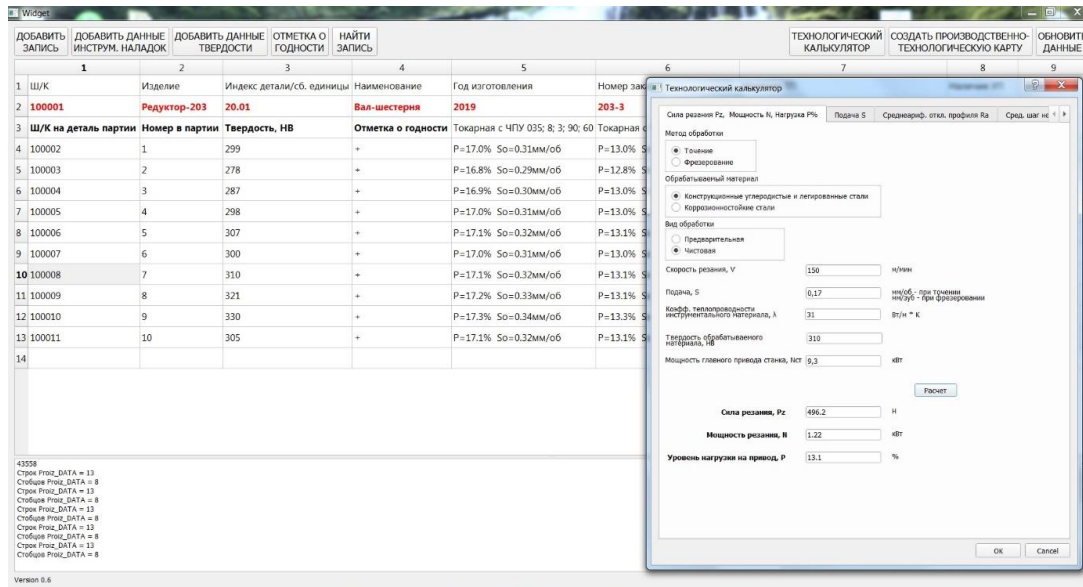


Рис. 2. Экранная форма программного технологического расчетного модуля
 Fig. 2. Screenshot of software technological calculation module

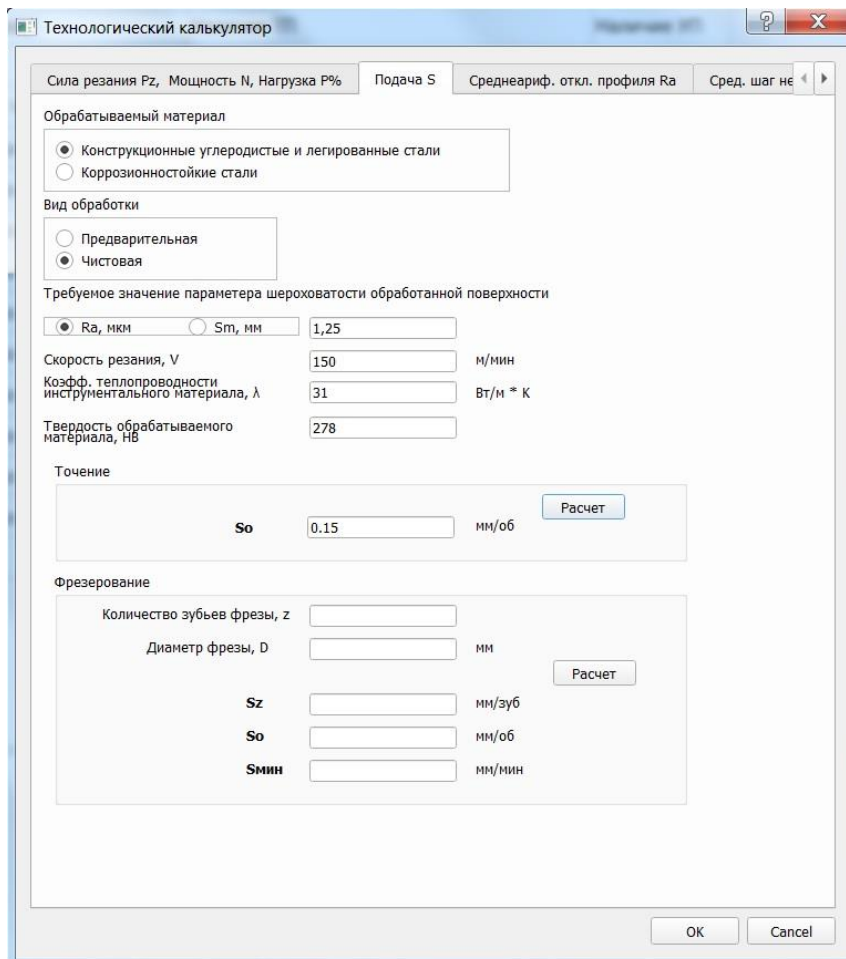


Рис. 3. Пример экранной формы вкладки технологического расчетного модуля для определения подачи s_0 для точения
 Fig. 3. Technological calculation module screenshot example of menu for feed s_0 definition for turning

Затем указываются метод обработки, обрабатываемый материал, вид обработки и вводятся необходимые технологические данные для расчета.


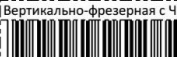
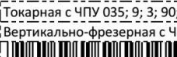
ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА							
Штрих Код	Изделие	Индекс дет./сб. единицы	Наименование	Год изготовления	Номер заказа	Наличие ТП	Наличие УП
	Редуктор-203	20.01	Вал-шестерня	2019	203-3	02.04.2019	03.04.2019
Ш/К на деталь партии	Номер в партии	Твердость, НВ	Отметка годности				
	1	299	+				
Токарная с ЧПУ 035; 8; 3; 90; 60		P=17.0% So=0.31мм/об					
Токарная с ЧПУ 035; 9; 3; 90; 60		P=13.0% So=0.16мм/об					
Вертикально-фрезерная с ЧПУ 130; 3; 1; 4; 95		P=18.8% So=0.92мм/об					
	2	278	+				
Токарная с ЧПУ 035; 8; 3; 90; 60		P=16.8% So=0.29мм/об					
Токарная с ЧПУ 035; 9; 3; 90; 60		P=12.8% So=0.15мм/об					
Вертикально-фрезерная с ЧПУ 130; 3; 1; 4; 95		P=18.8% So=0.92мм/об					
	3	287	+				
Токарная с ЧПУ 035; 8; 3; 90; 60		P=16.9% So=0.30мм/об					
Токарная с ЧПУ 035; 9; 3; 90; 60		P=13.0% So=0.16мм/об					
Вертикально-фрезерная с ЧПУ 130; 3; 1; 4; 95		P=18.8% So=0.92мм/об					

Рис. 4. Пример производственно-технологической карты
 Fig. 4. An example of production-technological card

Следует продолжить рассмотрение механизма функционирования ЦПС при ТПП и АУ процессом резания на примере операций 035 – Токарная с ЧПУ и 130 – Вертикально-фрезерная с ЧПУ ТП изготовления детали 20.01 «Вал-шестерня».

После завершения ТПП на стадии запуска изготовления посредством ППТК производственно-диспетчерской службой предприятия формируется запись в базе данных. Выбирается клавиша «Добавить запись» и вводятся индекс изделия; индекс и наименование детали; год изготовления; номер заказа на изготовление (рис. 2). Для каждой конкретной детали в партии генерируется штрих-код как идентификатор. Система обращается к технологической базе данных, в которой содержится учет разработанных комплектов документации на ТП и управляющих программ (УП), и в ячейках «Наличие ТП» и «Наличие УП» информирует о наличии данной документации.

На следующем этапе выдается задание на изготовление производственным подразделениям предприятия.

После выбора клавиши «Добавить данные твердости» (рис. 2) сотрудник ОТК заносит в производственно-технологическую базу данные о фактической твердости материала каждой заготовки. Идентификация выполняется путем автоматизированного считывания штрих-кода или ввода номера детали в диалоговом режиме.

При подготовке инструментальных наладок (сборок) на участке настройки инструмента вне станка запись информации в производственно-технологическую базу осуществляется путем выбора клавиши «Добавить данные инструментальных наладок» (рис. 2). Идентификация наладки выполняется путем считывания штрих-кода или ввода ее номера в диалоговом режиме. Вводятся операционный маршрут изготовления и данные по настройке. Например, название столбца «Вертикально-фрезерная с ЧПУ 020;5;10;10;150» означает, что представлена операция 020 Вертикально-фрезерная с ЧПУ, 5-й переход, инструмент под номером 10 в ячейке магазина станка, имеющий размер от базовой поверхности вспомогательного инструмента до режущей кромки по оси X равный 10 мм, а по оси Z равный 150 мм. Параметры наладок вносятся в УП станка с ЧПУ или ОЦ наладчиком или оператором на основе производственно-технологической карты (рис. 4). За счет этого сокращается время на наладку станка.

На основе данных о фактической твердости материала каждой детали в партии инженер-технолог имеет возможность расчета уточненных стартовых значений подачи S и требуемой нагрузки P на привод главного движения станка для АУ процессом обработки по формулам, приведенным в [17].

После выбора клавиши «Создать производственно-технологическую карту» (рис. 2) автоматически формируется производственно-технологическая карта (рис. 4), содержащая информацию об: индексе изделия; индексе и наименовании детали или сборочной единицы (ДСЕ); номере заказа и годе изготовления; количестве деталей в партии; твердости материала каждой конкретной детали; параметрах инструментальныхборок и уточненных стартовых величине подачи и требуемом уровне нагрузки на привод главного движения; годности ДСЕ.

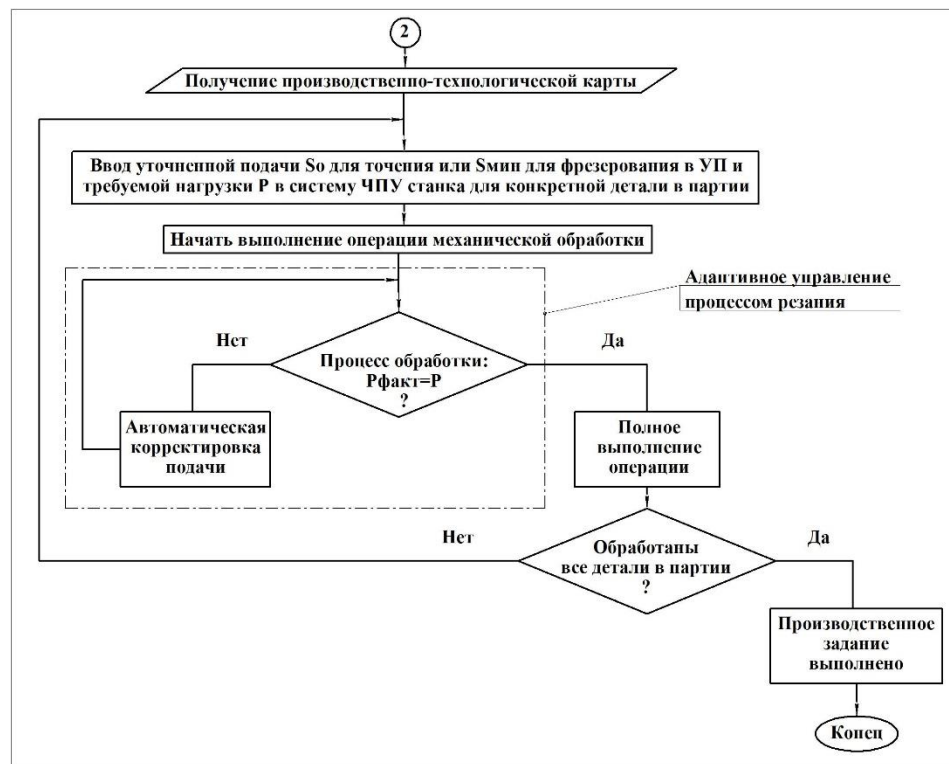


Рис. 5. Блок-схема алгоритма управления качеством обработки в ЦПС. Процесс адаптивного управления механической обработкой резанием

Fig. 5. Block diagram of algorithm of machining quality maintenance in DPS. The process of adaptive control of machining by cutting

Производственно-технологическая карта выдается мастером или начальником участка на рабочее место наладчика или оператора станка с ЧПУ и ОЦ.

При выполнении переходов предварительной обработки наладчик или оператор станка с ЧПУ или ОЦ, получив производственно-технологическую карту, заносит в систему ЧПУ значение требуемой нагрузки P на привод главного движения для конкретной детали в партии. В процессе обработки система АУ осуществляет автоматическое изменение подачи для приведения действующей нагрузки в соответствие с заданной. Тем самым реализуется постоянство действующей нагрузки на режущий инструмент [20].

Для чистовых переходов в систему ЧПУ заносятся требуемые величины подачи и нагрузки на привод главного движения для обеспечения стабильности получаемого качества обработанной поверхности. В ЦПС на технологическом уровне обеспечивается стабильность заданного качества (шероховатости и деформированного состояния поверхностного слоя) за счет АУ процессом резания [21] на основе разработанных математических моделей [20]. Блок-схема алгоритма управления качеством обработки в ЦПС для процесса АУ механической обработкой резанием представлена на рис. 5.

На стадии контроля обработанной детали сотрудником ОТК делается отметка о годности (символ «+») или негодности (символ «-») в ППТК после выбора клавиши «Отметка о годности» (рис. 2).

Таким образом, проведенные исследования позволяют сформулировать базовые принципы ТПП современного автоматизированного производства при внедрении ЦПС, заключающиеся в следующем:

- цифровая обработка комплексной информации о параметрах технологической системы и характеристиках процесса обработки резанием;
- создание условий для организационной, информационной и технической совместимости работ по ТПП, проводимых на стадиях постановки изделий на производство различными исполнителями, на основе использования современных средств идентификации и ППТК для ЦПС;

- обеспечение единства, постоянной обновляемости и достоверности, а также оперативности доступа к информации, определяющей ход ТП;
- обеспечение стабильности ТП механической обработки за счет АУ цифровой технологической системой с учетом возмущающих факторов.

Выводы

1. Разработаны и методологически обоснованы базовые принципы технологической подготовки современного автоматизированного производства при внедрении ЦПС;
2. Разработана система управления стабильностью процесса резания и качеством обработки в автоматизированном механообрабатывающем производстве при внедрении ЦПС, базирующаяся на контроле изменения силы резания и адаптивном управлении процессом резания по параметру рабочей подачи;
3. Разработан программный производственно-технологический комплекс для автоматизации ТПП и управления стабильностью процесса резания и качеством обработки в автоматизированном механообрабатывающем производстве при внедрении ЦПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства : ГОСТ Р 50995.3.1-96. – Введ. 01.07.97. – М. : Госстандарт России, 1997. – 20 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
2. Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения : ГОСТ Р 50995.0.1-96. – Введ. 01.07.97. – М. : Госстандарт России, 1997. – 16 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
3. Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения : ГОСТ Р 57945-2017. – Введ. 14.11.2017. – М. : Стандартинформ, 2018. – 20 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).
4. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. Григорьев, С. Н. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учебник / С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов. – М. : Машиностроение, 2008. – 372 с.
6. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования: учебное пособие / М. П. Козочкин [и др.]. – М. : Инновационное машиностроение, 2017. – 240 с.
7. Berglind, L. Modeling of machining process / L. Berglind, E. Ozturk // Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. – Switzerland : Springer Publ., 2019. – Chap. 4 – P. 57-93.
8. Cyber-physical system to improve machining process performance / M. Armendia [et al.] // Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. – Switzerland : Springer Publ., 2019. – Chap. 12 – P. 197-208.
9. Twin-control evaluation in industrial environment: automotive case / M. Armendia [et al.] // Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. – Switzerland : Springer Publ., 2019. – Chap. 16 – P. 261-294.
10. Chang, P. AI case study / P. Chang // Breakthrough. – 2018. – Vol. 10, iss. 38. – P. 12-15.
11. Lee, J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18-23.
12. Lee, J. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance and service innovation / J. Lee [et al.] // The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP 38, 2015. – P. 3-7.
13. Yang, S. A Unified framework and platform for designing of cloud-based machine health monitoring and manufacturing systems / S. Yang [et al.] // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. – P. 040914-1 – 040914-6.
14. Ингеманссон, А. Р. Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение / А. Р. Ингеманссон // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 8. – С. 25-32.
15. Wahlster, W. Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems / Talk of presentation, 27, May, 2013; Zurich. – режим доступа : https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-Industrie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf. [06.04.2016]
16. Wang, S. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. / S. Wang [et al.] // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2016. – Vol. 2016. – P. 23-33.

17. Ингеманссон, А. Р. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 27-40.
18. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020615978 РФ. МПК (нет). Программный производственно-технологический комплекс для цифровых производственных систем / В. А. Шурыгин, А. Р. Ингеманссон, В. В. Жуков; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады». – № 2020615978; заявл. 27.03.2020; опубл. 5.06.2020.
19. Ингеманссон, А. Р. Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями / А. Р. Ингеманссон, А.А. Бондарев // *Научно-технологические технологии в машиностроении*. – 2019. – № 12. – С. 28-35.
20. Ингеманссон, А. Р. Исследование возможности адаптивного управления деформированным состоянием обработанных поверхностей и работоспособностью инструментов в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон // *Известия ВолгГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении»*. – Волгоград, 2020. – № 3 (238). – С. 22-26.
21. Петрешин, Д. И. Управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности / Д. И. Петрешин, А. Г. Суслов, О. Н. Федонин // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2016. – № 4. – С. 57-61.

REFERENCES

1. Tehnologicheskoe obespechenie sozdaniya produkcii. Tehnologicheskaja podgotovka proizvodstva : GOST R 50995.3.1-96 [Technological providing of products creation. Technological preparation of production : GOST R 50995.3.1-96]. Moscow : National Standard of Russia, 1997. 20 p. (rus)
2. Tehnologicheskoe obespechenie sozdaniya produkcii. Osnovnye polozhenija : GOST R 50995.0.1-96 [Technological providing of products creation. Basic principles : GOST R 50995.0.1-96]. Moscow : National Standard of Russia, 1997. 16 p. (rus)
3. Sistema tehnologicheskogo obespechenija razrabotki i postanovki na proizvodstvo izdelij kosmicheskoi tehniki. Terminy i opredelenija : GOST R 57945-2017 [The system of technological providing of development and start of production of space technique products. Terms and definitions : GOST R 57945-2017]. Moscow : Standardinform, 2018. 20 p. (rus)
4. Starkov, V. K., Fizika i optimizacija rezanija materialov [Physics and optimization of materials cutting]. Moscow : Mechanical engineering, 2009. 640 p. (rus)
5. Grigor'iev, S. N., Obrabotka rezaniem v avtomatizirovannom proizvodstve: uchebnik [Machining by cutting in automated industry: textbook]. Moscow : Mechanical engineering, 2008. 372 p. (rus)
6. Kozochkin, M. P., Diagnostika i sertifikacija metallorezhushhego oborudovaniya: uchebnoe posobie [Diagnostics and certification of metal cutting equipment: tutorial]. Moscow : Innovative mechanical engineering, 2017. 240 p. (rus)
7. Berglind, L. Modeling of machining process. Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. Switzerland : Springer Publ., 2019. Chap. 4. P. 57-93. (eng)
8. Armendia, M., Cyber-physical system to improve machining process performance. Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. Switzerland : Springer Publ., 2019. Chap. 12. P. 197-208. (eng)
9. Armendia, M., Twin-control evaluation in industrial environment: automotive case. Twin-control. A digital twin approach to improve machine tools lifecycle. Switzerland : Springer Publ., 2019. Chap. 16. P. 261-294. (eng)
10. Chang, P. AI case study. Breakthrough, 2018. Vol. 10. iss. 38. P. 12-15. (eng)
11. Lee, J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 2015. Vol. 3. P. 18-23. (eng)
12. Lee, J. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance and service innovation. The Fourth International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP 38, 2015. P. 3-7. (eng)
13. Yang, S. A Unified framework and platform for designing of cloud-based machine health monitoring and manufacturing systems. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015. Vol. 137. P. 040914-1 – 040914-6. (eng)
14. Ingemansson, A. R., Harakteristika, sostav, mehanizmy funkcionirovanija i sovremennye aspekty vnedrenija cifrovih proizvodstvennyh sistem v mashinostroenii [The characteristics, composition, mechanisms of function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering]. Brjansk : Science intensive technologies in mechanical engineering, 2018. Vol. 8. P. 25-32. (rus)
15. Wahlster, W. Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems. Access mode : https://www.ida.lui.se/ida30/program/Wolfgang_Wahlster-IDA30-20130924-Industrie_4_0_Active_Semantic_Memories_for_Smart_Factories.pdf. [06.04.2016] (eng)
16. Wang, S. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. International Journal of Distributed Sensor

Networks, 2016. Vol. 2016. P. 23-33. (eng)

17. Ingemansson, A. R., Razrabotka matematicheskikh modelej dlja tehnologicheskoi podgotovki proizvodstva i adaptivnogo upravlenija tokarnoi i freznoi obrabotkoi v cifrovyykh proizvodstvennykh sistemah [Development of mathematical models for technological preparation of production and adaptive control for turning and milling in digital production systems]. Novosibirsk : Metal Working and Material Science, 2020. Vol. 22. No. 1. P. 27-40. (rus)

18. Shurygin, V. A., Programmnyj proizvodstvenno-technologicheskij kompleks dlja cifrovyykh proizvodstvennykh sistem [The production-technological software complex for digital production systems. Russian Federation patent pending for software no. 2020615978]. 2020. (rus)

19. Ingemansson, A. R., Raschetnaja metodika opredelenija teploprovodnosti sovremennykh tverdospavnykh instrumentov s mnogoslojnyimi pokrytijami [The calculation methodology for definition of thermal conductivity of modern cemented carbide tools with multilayer coatings]. Brjansk : Science intensive technologies in mechanical engineering, 2019. Vol. 12. P. 28-35. (rus)

20. Ingemansson, A. R., Issledovanie vozmozhnosti adaptivnogo upravlenija deformirovannykh sostojaniem obrabotannykh poverhnostej i rabotosposobnost'ju instrumentov v cifrovyykh proizvodstvennykh sistemah [The ability research of adaptive control of surface integrity deformed condition and working performance of instruments in digital production systems]. Volgograd : Science magazine of VSTU, 2020. Vol. 3. P. 22-26. (rus)

21. Petreshin, D. I., Upravlenie parametrami kachestva poverhnostnogo sloja detalej mashin v uslovijah neopredelennosti [Maintenance of surface layer quality parameters of machine parts in uncertainty conditions]. Moscow : Progressive technologies and systems of mechanical engineering, 2016. Vol. 4. P. 57-61. (rus)

Библиографическое описание статьи

Ингеманссон А.Р. Технологическая подготовка и адаптивное управление в цифровых производственных системах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 4 (146). – С. 5-13.

Reference to article

Ingemansson A.R. Technological preparation and adaptive control in digital production systems. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2021, no.4 (146), pp. 5-13.