

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №9(147). С.39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 39-48.

Научная статья
УДК 621.829.93/621.833/621.83.061.1/669.01
doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Александр Рональдович Ингеманссон², д.т.н.

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Волгоград, Россия

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

² aleing@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7963-393X>

Аннотация. Рассмотрены технологические аспекты цифровизации машиностроительного производства на этапе предпроизводственной технологической подготовки (ТПП). Методы исследования: содержательный анализ базовых понятий ТПП, определенных нормативной документацией – национальными стандартами, составляющими основу единой системы технологической документации. Показано, что формальный переход к цифровому производству формирует феномен трансформации базовых понятий – основной акцент делается на технологии моделирования в ущерб технологиям производства. В результате анализа этапов ТПП в соответствии с нормативными документами показаны особенности ТПП для цифрового производства. Результаты исследования: для основных проектных задач технологического содержания показаны проблемы ТПП, сформированные цифровизацией производства: проблемы рационального выбора обрабатывающего оборудования; проблемы рационального выбора методов обработки; рационального назначения технологических условий обработки. Показано, что в условиях производства, насыщенного информационными и аппаратными средствами управления технологическим оборудованием, необходимо совершенствовать системы обратной связи для реализации оперативной диагностики и активного управления элементами технологической системы для гарантированного обеспечения качества продукции. Показано, что процесс, методы и средства ТПП должны быть адаптированы к условиям конкретного производства. Показано, что задачи ТПП, связанные с рациональным выбором и назначением условий обработки, должны быть перенесены непосредственно на стадию обработки. Такой перенос позволяет оперативно учитывать вариативность свойств материалов обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Основные выводы: рациональное применение принципов цифровизации позволит рассматривать комплекс программно-информационных и аппаратных средств технологического проектирования и управления обрабатывающим оборудованием как технологический искусственный интеллект – накопленный опыт и знания специалистов технологических служб, адаптированные к условиям конкретного предприятия.

Ключевые слова: цифровизация производства, технологическая подготовка производства, цифровые двойники, адаптивная система, интеллектуальные технологические системы, технологический искусственный интеллект

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

Для цитирования: Чигиринский, Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Engineering process aspects of digitalization of machine-building production

Yuli L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Alexander R. Ingemansson², D. Eng.

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Federal Research and Production Center «Titan-Barricades», Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² aleing@yandex.ru

Abstract. *Technological aspects of digitalization of machine-building production at the stage of pre-production engineering process (PEP) are viewed. Research methods: an exhaustive study of the basic concepts of the PEP defined by standardized documentation - national standards forming the basis of a unified system of technological documentation. It is shown that the formal transition to digital production chains the phenomenon of transformation of basic concepts - the main emphasis is on the modeling technologies at the price of production technologies. As a result of the analysis of EP stages in accordance with standardized documents, the EP digitalization peculiarities are shown. Research results: for the main design tasks of the technological content, the problems of PEP caused by production digitalization are presented: rational choice problems for processing machinery selection; problems of rational choice of processing methods; rational determination of process specification of production work. It is shown that in the conditions of production, equipped with programm support and hardware facilities for technological equipment control, it is necessary to improve feedback systems for the implementation of operational diagnostics and active control of process system elements for guaranteed product quality assurance. It is shown that the process, methods and means of PEP should be adapted to the conditions of a particular production. It is shown that the tasks of PEP related to the rational choice and assignment of processing conditions should be implemented directly at the operating step. It will allow taking into account in a timely manner the material properties variability for the workpiece and the cutting tool being in the intraprocess. Conclusions: the rational application of the principles of digitalization will allow treating the hardware/software complex for technological design and control of processing machinery as technological artificial intelligence – the accumulated experience and knowledge of specialists of technological services adapted to the conditions of a particular enterprise.*

Keywords: digitalization of production, engineering process, digital twins, adaptive system, intelligent technological systems, technological artificial intelligence

Acknowledgements: within the preparation of the article, there were the materials used for the research carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101.

For citation: Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Engineering process aspects of digitalization of machine-building production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Трансформация базовых понятий

С момента начала активного использования понятие «цифровое производство» (digital production, digital manufacturing) содержание этого термина существенно изменилось. Первоначально данным термином определяли активное применение различных средств автоматизации [1] на стадиях предпроизводственной подготовки и собственно производства. Акцент делался на использовании прикладного программного обеспечения для автоматизации отдельных этапов конструкторского (в первую очередь), технологического и организационного

проектирования и для эксплуатации оборудования с программным управлением. В настоящее время речь идет о создании, параллельно с проектированием, т. наз., «цифрового двойника» (цифровой или, корректнее, информационной модели, digital twin, digital similar) – информационной структуры, описывающей основные характеристические свойства собственно изделия (в простейшем случае) или производства [2] этого изделия. Предположительно [1], такая виртуальная копия изделия или процесса изготовления изделия, должна обеспечить возможность «увидеть все сложности, издержки, с которыми придётся столкнуться» [1] в реальном

производстве. Формальное толкование понятия «цифровой двойник» установлено национальным стандартом [ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.]. Стандарт распространяет свое действие на изделия машиностроительных предприятий. В контексте подготовки производства и управления технологическими процессами, исходя из положений нормативного документа, следует отметить, что внедрение технологии цифровых двойников на стадии производства серийных изделий позволит откорректировать и (или) разработать технологическую документацию в зависимости от конкретных производственных условий.

Развитие подхода формирует понимание, что этапы жизненного цикла изделий и производственной системы имеют отличия. Последняя подвержена структурным и функциональным изменениям, в т. ч. за счет выполнения мероприятий по техническому перевооружению, использования резервов повышения эффективности технологических процессов и др. Поэтому приобретает значение тенденция формирования не только цифровых двойников изделий, но и цифровых двойников производственных систем [3, 4].

Возможность моделировать критические производственные ситуации, оценивать вероятные риски и заблаговременно разрабатывать стратегии их преодоления, безусловно, следует считать позитивной стороной цифровизации машиностроительного производства. Вместе с тем, следует отметить, что расширение практического применения цифровых двойников потребовало значительного развития технологий информационных – в ряде случаев, за счет традиционных машиностроительных. В частности, весьма активно формируется следующее представление [1, 5] о базовых технологиях цифрового производства:

– цифровое моделирование – «точная математическая модель предвещает любые реальные процессы и даёт возможность вычислить как издержки, так и эффективность

запланированных изменений»;

– трёхмерное моделирование, позволяющее «экономить на создании моделей за счет высокой точности моделирования и освобождения от долгих предварительных согласований, толстых документов с детальными описаниями будущего изделия»;

– управление жизненным циклом изделия – «жизненный цикл начинается с моделирования и заканчивается утилизацией, – постоянное наблюдение за состоянием изделия (и производственного оборудования) является ключом к бесперебойному производству»;

– технология «интернета вещей» подразумевает, что каждое устройство самостоятельно подключается к интернету и передаёт туда данные: назначение этой технологии заключается в постепенном снижении роли человека-оператора.

Здесь [1, 5] имеет место определенная подмена понятий. Во-первых, «цифровое» (корректнее говорить «математическое») и трехмерное моделирование, по сути, являются инструментами инженера, но не самостоятельными технологиями. Во-вторых, утверждение о «точных моделях» в большинстве случаев следует рассматривать как некий «рекламный лозунг», поскольку при построении математических моделей разработчики принимают определенные допущения. В частности, при построении моделей машиностроительных изделий, как правило, не принимают во внимание неоднородность физико-механических свойств материалов и вариативность геометрических размеров, в том числе величин зазоров и натягов в сопряжениях. При моделировании процессов обработки в части прогнозирования качества изделия, работоспособности инструмента и другое, как правило, исключают из рассмотрения особенности [6] физико-механических свойств инструментального и конструкционного материалов, определяемые технологией их изготовления, изменение этих свойств с учетом повышенных температур в зоне контакта «инструмент-заготовка».

Представленный выше подход к цифровизации машиностроительного производства постепенно формирует представление о второстепенности собственно

машиностроительных технологий, поскольку основное внимание (и существенные материальные затраты) направлено на развитие технологий именно моделирования.

**О технологических задачах
технологической подготовки производства**

Данный подзаголовок не следует воспринимать как тавтологию, поскольку на этапе технологической подготовки производства (ТПП) решаются задачи не только технологического, но и организационного – что явно определено в нормативных документах, а также конструкторского и метрологического содержания. Авторами произведен анализ содержания работ, составляющих ТПП в соответствии с ГОСТ 14.004-83 –

«Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий», ГОСТ Р 50995.0.1-96 – «Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения», ГОСТ Р 50995.3.1-96 – «Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства», ГОСТ Р 15.301-2016 – «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство».

В рамках данного исследования рассмотрены именно технологические аспекты ТПП применительно к цифровому производству на этапах ТПП единичных и опытных образцов и серийно выпускаемой продукции (рис. 1).

Этапы ТПП		предпроизводственная подготовка						
		опытное и единичное производство				серийное производство		
Исполнители								
Специализированная технологическая организация		1	2 4		6 8			
Изготовитель	опытное производство	1	2	3	5 7			
	серийное производство	1	3 4		6 8 9			

Рис. 1. Технологические работы в составе ТПП:

1 – предпроизводственная технологическая подготовка; 2 – ТПП опытных образцов и единичных изделий; 3 – оценка определяющих технологических и организационных решений по производству изделия; 4 – привлечение специализированных технологических организаций к ТПП серийных изделий; 5 – оценка с участием независимых экспертов, технологической готовности производства к изготовлению изделий для приемочных испытаний; 6 – ТПП серийного производства; 7 – передача изготовителю серийных изделий технологической документации, отработанной по результатам изготовления и приемочных испытаний опытных образцов; 8 – завершение ТПП серийного производства; 9 – оценка технологической готовности серийного производства

Fig. 1. Technological works as part of the EP:

1 – pre-production engineering process; 2 – EP of prototypes and single products; 3 – evaluation of the determining technological and organizational solutions for the product manufacturing; 4 – involvement of specialized technological organizations to the EP's series manufacture; 5 – evaluation by independent expertise the technological production availability for manufacturing of products for acceptance check-outs; 6 – EP of series manufacture; 7 – design documentation transfer to the series manufacturer, which is worked out according to the results of manufacturing and acceptance check-outs of prototypes; 8 – completion of EP series manufacture; 9 – assessment of the technological production availability of series manufacture

Ранее [7] мы рассматривали укрупненный перечень проектных процедур,

составляющих содержание ТПП (табл. 1) на каждом из этапов.

1. Возможность формализованного решения задач ТПП

1. The possibility of a formalized solution of EP tasks

Типовая задача технологического проектирования	Решение	Класс ПО
Маршрутное технологическое проектирование:		
типовое	+	CAM / CAPP
групповое	±	CAM / CAPP
модульное	– +	CAM / CAPP
функционально-ориентированное по заданным показателям качества одной поверхности в пределах одного перехода	+	CAM
по заданным показателям качества одной поверхности с учетом технологической наследственности при многопереходной обработке	– +	CAPP
по заданным показателям качества группы поверхностей или изделия	– +	CAPP
Выбор схем базирования, последовательности перемены баз и расчет погрешности обработки:		
выбор технологических баз на основе типовых решений	+	CAM
обоснование выбора технологических баз и расчет погрешностей обработки методами размерно-точностного проектирования	– +	CAE
Проектирование специальной технологической оснастки	±	CAD
Техническое нормирование	+	CAM / CAE
Расчет операционных припусков	+	CAM / CAE
Формирование технологической документации	+	CAM / CAPP
Программирование для станков с ЧПУ	+	CAM
Выбор оборудования и инструмента	±	CAM / CAE
Условные обозначения:	+	поддерживается системой
	±	частично поддерживается системой
	– +	перспективная опция, практически не поддерживается

Программное обеспечение класса CAPP (Computer Aided Process Planing) предназначено именно для решения задач планирования производственных и, в частности, технологических процессов. Тем не менее, задачи функционально-ориентированного маршрутного проектирования, также, как и задачи формализованного построения последовательности перемены баз, расчета погрешности обработки, построения рациональных траекторий перемещения инструмента, в настоящее время можно определить, как перспективные. Отечественные CAPP-системы, имеющие «открытую» структуру ПО, предоставляющие возможность наполнения внутренних справочников материалов, оборудования, технологической оснастки, позволяющие формировать комплект документов на технологический процесс согласно ЕСТД и

допускающие расширение функциональных возможностей в отношении методов индивидуального маршрутного проектирования, проектирования комплекта баз и др., представлены программным обеспечением от компаний «АДЕМ» [<https://adem.ru/products>], «АСКОН – Системы проектирования» [<https://ascon.ru/products>] или «СПРУТ-Технология» [<https://sprut.ru/sprut-technology>].

В контексте внедрения на предприятиях ERP-систем, действующих в масштабах всех производственных процессов организации, и MES-систем, оперирующих с процессами в производственных подразделениях, возникает следующая практическая проблема. Формирование производственных расписаний, расчеты загрузки мощностей и др. с использованием программных средств нуждаются в исходных данных по материалоемкости и трудоемкости

выпускаемых изделий. Наполнение базы данных массивом информации по операционной трудоемкости напрямую зависит от оперативности технологического проектирования, достоверности проектных решений, уровня внедрения и функционала используемых САПР ТПП на машиностроительном предприятии.

В основе проектирования маршрутных

технологий лежит, как правило, использование типовых технологических процессов (рис. 2). Частным случаем типового технологического процесса – применительно к одному переходу, – можно считать традиционно используемые таблицы «экономической точности» [8], определяющие технологический допуск метода обработки.

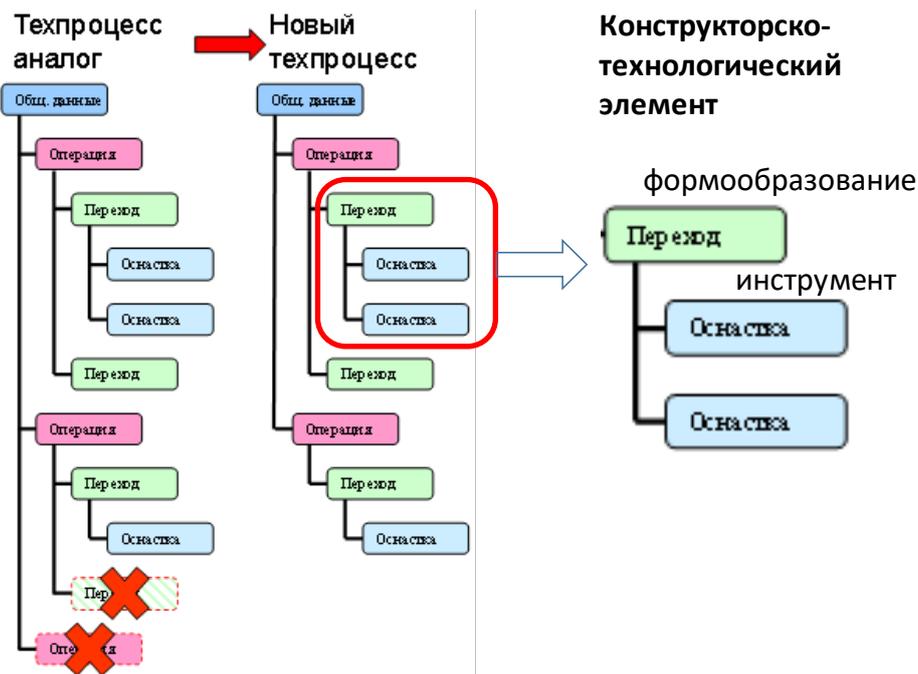


Рис. 2. Схема типового маршрутного проектирования [https://adem.ru/] и конструкторско-технологический элемент [9]

Fig. 2. Scheme of typical route design [https://adem.ru/] and technological element design [9]

Практически во всех применяемых в настоящее время системах в качестве элементарного фрагмента типового технологического процесса рассматривается конструкторско-технологический элемент (КТЭ) [9], содержащий формализованное комплексное описание конструкционного материала, геометрии простейшей поверхности, технологического метода получения поверхности, режимов обработки, оборудования, режущего и вспомогательного инструмента.

Более совершенным, с точки зрения автоматизации технологического проектирования, является конструкторско-технологический модуль [10], включающий формализованное структурированное

описание комплекта технологических баз.

Основные проблемы, непосредственно связанные с эффективностью автоматизации маршрутного технологического проектирования, определяются не только [10] отсутствием в конструкторской документации концентрированной информации об основных поверхностях и неполнотой методик базирования, в частности, методик использования скрытых баз. Здесь следует назвать и недостаточную надежность [7] информации, используемой при формировании и использовании электронных справочников, составляющих информационное обеспечение САПР ТП, в частности: справочников физико-механических характеристик основных и

вспомогательных материалов. Существенные сложности при использовании формализованных методов маршрутного проектирования определяются явно выраженной отраслевой направленностью атласов типовых технологий [7].

Проблемы рационального выбора обрабатывающего оборудования и методов обработки в современном цифровом производстве

В качестве негативной тенденции, сформированной цифровизацией машиностроительного производства следует назвать значительное сужение профессионального кругозора специалистов технологических служб. В частности, при выборе оборудования для оснащения новых или модернизации действующих производств, специалисты делают акцент на оборудовании с программным управлением, преимущественно многоцелевое, не обращая внимания на серийность производства и конструктивную сложность продукции. Основная аргументация при этом сводится: к возможности обрабатывать «любые заготовки с одной установки»; к высокой точности – в реальности высокая точность позиционирования (1,0...3,0 мкм) современных станков не гарантирует высокой точности обработки; к высокой производительности – также достаточно спорное утверждение, поскольку многоцелевые станки рассчитаны на одновременную работу одного инструмента, и т. д.

На отдельных машиностроительных предприятиях, ориентированных на серийное производство малогабаритных корпусных деталей, специалисты технологических служб пришли к нетривиальному решению задачи повышения производительности – на рабочем столе сверлильно-фрезерно-расточного станка с ЧПУ размещается многоместное приспособление. Имитация многопозиционного станка производится программно. Управляющая программа работает в непрерывном цикле – после завершения обработки в текущей позиции, выполняется смещение начала системы координат и переход на начало программы.

Свободные позиции приспособления предназначены для снятия обработанного изделия и установки новой заготовки. Очевидно, что применение специализированного оборудования в данном случае является более эффективным. Более распространенной альтернативой такому способу повышения производительности производства, как правило, является установка нескольких однотипных станков с ЧПУ, что также малоэффективно.

Проблемы рационального назначения технологических условий обработки

Немаловажным этапом ТПП является назначение технологических режимов. В настоящее время условия обработки определяются в соответствии с выбором технологического оборудования, материала, технологии изготовления, геометрических параметров и рекомендациями производителя инструмента. Предлагаемые производителями подгруппы (что уже предполагает некоторое варьирование свойств обрабатываемого материала без учета фактических отклонений химического состава, физико-механических свойств материала даже с учетом требований стандартов).

Рекомендации относительно режимов резания сводятся к определенному диапазону варьирования глубины, подачи и скорости резания, то есть определяют области допустимых значений. И, в данном контексте, параметрическая оптимизация позволяет, исходя из установленных требований, технологических возможностей и целевой функции, выбрать условия достижимой эффективности. Ранее [2, 7] было отмечено, что количественная оценка соответствия условий обработки заданным техническими условиями показателям качества, проблематична при отсутствии достоверных математических моделей структуры производственной системы, а также отдельных технологических переходов.

Как правило, техническое нормирование выполняется с учетом ряда допущений, совокупное воздействие которых приводит к рассогласованию значений, заданных техническими требованиями (прогнозируемых

при расчете режимов) параметров результата обработки и фактического результата. Следует признать, что принимаемые допущения, в большинстве случаев, обоснованы недостаточно. Выше отмечено, что рекомендации производителей в отношении условий рационального использования режущего инструмента базируются на

предположении о стабильности и однородности свойств как конструкционного, так и инструментального материалов. Результаты экспериментальных исследований, например [11], подтверждают справедливость тезиса о существенной неоднозначности (рис. 3) режущих свойств современных инструментальных материалов.

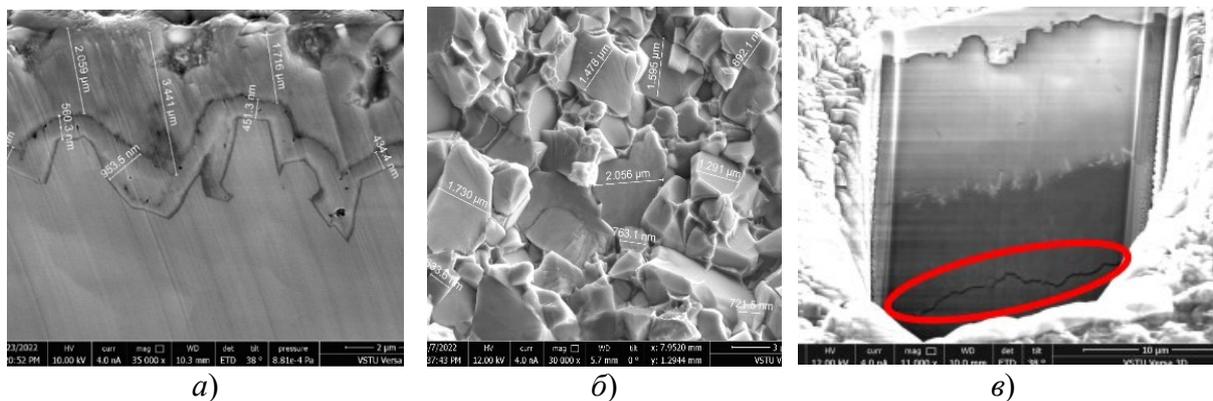


Рис. 3. Неоднородность свойств твердосплавного инструмента с PVD покрытием: а – покрытие; б – матрица инструмента; в – микротрещина в матрице

Fig. 3. Dissimilarity of properties of a carbide tool with PVD coating: а – coating; б – tool matrix; в – microcrack in the matrix

Поэтому на стадии изготовления детали возникает необходимость в адаптации проектных значений режимов резания к состоянию конкретной технологической системы. Например, использование стационарных и портативных систем вибродиагностики позволяет следующее (рассмотрено на примере сверлильно-фрезерно-расточного станка с ЧПУ, оборудованного системой вибродиагностики «Montronix»):

- выполнить анализ работоспособности шпиндельного узла на холостых оборотах без и с установленными вспомогательным и режущим инструментами;

- исходя из этого, выявить частоты вращения, на которых ожидается присутствие нестабильности процесса резания и не рекомендуется работа на данных частотах;

- провести анализ применяемых режимов резания с учетом амплитуды вибраций и наличие вибраций, например, по оси Z, что сказывается на нестабильности качества поверхности, геометрической точности детали, износе шпинделя, а также рассмотреть синфазность вибраций по осям X

и Y, что свидетельствует о равномерности съема стружки (каждым зубом – для фрезы); выявить появление дополнительных промежуточных гармоник, расширяющих общую полосу амплитуды спектра вибраций и снижающих стабильность процесса резания;

- оптимизировать технологию с учетом обеспечения невысокой амплитуды и синфазности вибраций по осям X и Y, малой амплитуды по оси Z с обеспечением требуемой производительности (объема удаляемого материала в единицу времени) за счет подбора сочетаний скорости резания, подачи, ширины фрезерования (для фрезерования).

Как правило, имеет место недостаточная проработка технологических решений в плане адаптации к условиям конкретного производства; рассогласование рекомендаций производителей инструмента, справочно-методических рекомендаций, нормативных указаний технологической службы предприятий, а также отсутствие оперативной информации о состоянии элементов технологической системы.

Заключение

Цифровизация предполагает повышение эффективности машиностроительного производства не только (и не столько) за счет увеличения производительности собственно производства. Основным эффектом может быть получен на этапе ТПП как результат тщательной проработки различных аспектов производственного процесса. Эффективным «цифровым» инструментарием для решения всего комплекса технологических проектных задач должен стать цифровой двойник производства – формализованное и структурированное описание методов и средств гарантированного обеспечения функционального назначения выпускаемой продукции. Такое описание должно учитывать технологические особенности конкретного производства, т. е., представлять собой «оцифрованный» накопленный опыт и знания специалистов технологической службы – знания, реализованные в виде программно-информационного обеспечения компьютеров и оборудования с программным управлением. В таком случае следует говорить о «технологическом искусственном интеллекте» – сущность, не предполагающую [12] копирование образа мышления человека, – только знания, накопленный опыт и способность оценивать достоверность информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Гайдукова Е.** Что такое цифровое производство? // 20 мая 2020 г. URL : <https://www.comindware.ru/blog/что-такое-цифровое-производство>.
2. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48. DOI : 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.
3. **Паршина И.С., Кривоногов С.А., Фролов Е.Б.** Цифровые модели производственной системы в машиностроительных предприятиях ОПК / И.С. Паршина // РИТМ машиностроения. 2021. № 9. С. 27–29.
4. **Соломенцев Ю.М., Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б.** Цифровые двойники изделия и производственной системы // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. 2018. № 8. С. 26–33.
5. **Цифровизация промышленности.** Обзор // TAdvisor. – URL : <https://www.tadviser.ru/index.php/> Статья:Цифровизация промышленности. Обзор_TAdvisor.

6. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1 (248). С. 15–18. DOI :10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.

7. **Чигиринский Ю.Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35. DOI : 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.

8. **Справочник технолога** / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

9. **Вертикаль.** Система автоматизированного проектирования технологических процессов (2023) URL : <https://ascon.ru/products/vertikal/>

10. **Базров Б.М.** Фундаментальные основы технологической подготовки производства // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 7 (97). С. 24–29. DOI : 10.30987/article_5cf7bd2fbc4f43.90942178.

11. **Научное обоснование и реализация цифровых технологий низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на поверхностях прецизионных геометрически сложных металлических изделий: промежуточный отчет о НИР 19-19-00101 , ИМАШ РАН.** 2022.

12. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход = Artificial Intelligence: a Modern Approach / Пер. с англ. и ред. К.А. Птицына. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1408 с. ISBN 5-8459-0887-6

REFERENCES

1. Gaidukova E. What is digital production? // May 20, 2020 URL : <https://www.comindware.ru/blog/what-is-digital-production>
2. Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: process design, production, tracking // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8 (134), pp. 39–48, DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.
3. Parshina I.S., Krivonogov S.A., Frolov E.B. Digital models of the production system in machine-building enterprises of MIC / I.S. Parshina, // RHYTHM of mechanical engineering, 2021, no. 9, pp.27–29.
4. Solomentsev Yu.M., Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. Digital twins of a product and a production system // General Director. Management of an industrial enterprise. 2018, no. 8. pp. 26–33.
5. Digitalization of industry. Overview // TAdviser. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> Article: Digitalization_industry_Survey_TAdviser

6. Ingemansson A.R. Basic framework of the engineering process concept and adaptive management in digital production systems for machining operations // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2021, No. 1 (248). pp. 15–18. DOI :10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.
7. Chigirinsky Yu.L. Current state and trends in development of technological engineering pre-production// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 8 (110), pp. 29–35. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.
8. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019, 800 p.
9. Vertical. Automated Process Design System (2023) URL: <https://ascon.ru/products/vertikal/>
10. Bazrov B.M. Fundamentals of engineering process// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 7 (97). pp. 24–29. DOI: 10.30987/article_5cf7bd2fbc4f43.90942178
11. Scientific rationale and implementation of digital technologies for low-temperature plasma formation of composite structures on the surfaces of geometrically complex precision metal products. Russian Science Foundation: update report on RE 19-19-00101, IMASH RAS, 2022.
12. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern Approach = Artificial Intelligence: a Modern Approach / Translated from English and edited by K.A. Ptitsyna, 2-nd ed. Moscow: Williams, 2006. 1408 p, ISBN 5-8459-0887-6

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 20.06.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 11.07.2023.

The article was submitted 20.06.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 11.07.2023.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.09.2023. Выход в свет 29.09.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16