



УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-11-30-39

А.Р. Ингеманссон, к.т.н.
(«Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
400071, г. Волгоград, пр. Ленина, б/н)
E-mail: aleing@yandex.ru

Цифровая производственная система для механообрабатывающего производства: структура, функционирование, программный производственно- технологический комплекс и анализ технико-экономической эффективности

Изложена разработка структуры и механизма функционирования цифровых производственных систем (ЦПС) при технологической подготовке производства и адаптивном управлении операциями предварительной и чистовой токарной и фрезерной обработки. На основе проведенного анализа с использованием комплексных критериев технологической себестоимости и коэффициента общей эффективности оборудования установлено повышение технико-экономической эффективности технологии производства механической обработки за счет предложенных мероприятий по внедрению ЦПС.

Ключевые слова: обработка резанием; цифровые производственные системы; технологическая подготовка производств; адаптивное управление; эффективность.

A.R. Ingemansson, Can.Sc.Tech.
(“Federal Scientific and Production Center “Titanium-Barricades”,
n/n, Lenin Avenue, Volgograd, 400071)

Digital production system for machining production: structure, operation, software production-technological complex and analysis of technical and economic effectiveness

The development of the structure and mechanism of digital production system (DPS) functioning during technological pre-production (TP) and adaptive control (AC) of preliminary finish turning and milling is presented. On the basis of the analysis carried out with the use of complex criteria of technological cost price and general effectiveness of equipment there was defined an increase of technical and economic TP effectiveness of machining at the expense of the measures offered for DPS introduction.

Keywords: cutting; digital production systems; technological preproduction; adaptive control; effectiveness.

Разработка наукоемких решений по внедрению цифровых производственных систем (ЦПС) в машиностроение обеспечивает повышение технико-экономической эффективности технологических процессов (ТП). Для реализации указанного направления требуется разработать структуру и механизмы функционирования ЦПС. Необходимо представить механизм функционирования предлагаемой сис-

темы как на этапе технологической подготовки производства (ТПП), так и на стадии изготовления деталей. Кроме этого, для использования при ТПП и адаптивном управлении (АУ) процессами механической обработки следует разработать программный производственно-технологический комплекс для ЦПС. В завершение необходимо выполнить технико-экономический анализ изменения эффек-

тивности ТП механической обработки.

В состав ЦПС для механообрабатывающего производства входит технологическое, контрольное, транспортное и складское оборудование.

Технологическое оборудование представлено металлорежущими станками с ЧПУ и обрабатывающими центрами (ОЦ) с установленными на них контактными и бесконтактными устройствами контроля и привязки к детали и контроля износа инструмента. Серийно выпускаемые системы управления современных станков с ЧПУ и ОЦ оснащаются функцией АУ процессом обработки.

Контрольное оборудование представлено измерительными инструментами и приборами, в том числе координатно-измерительными машинами (КИМ) и приборами для входного контроля заготовок (стационарными и портативными анализаторами химического состава и твердомерами). Следует выделить использование приборов для настройки инструмента вне станка (пресеттеров).

Структура ЦПС и информативная способность ее элементов описаны в работе [1].

Принципиальной составляющей функционирования ЦПС является идентификация элементов системы, запись и передача информации, определяющей ход ТП. Наиболее современными и универсальными технологиями промышленной идентификации являются штрих-кодирование и *RFID*-технология (англ. *Radio Frequency Identification*), использующая принцип радиочастотной идентификации.

При использовании технологии штрих-кодирования в качестве носителей информации (кодоносителей) используются штрих-коды. Считывание штрих-кода позволяет обращаться к записи в базе производственно-технологических данных. Они могут быть сгенерированы на любом ПК без использования специального программного обеспечения, распечатаны на принтере, 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 для чтения информации представляет собой сканер штрих-кодов, 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 разработанной ЦПС информацией, определяющей ход ТП.

При разработке структуры ЦПС необходимо рассмотреть связи, возникающие между элементами системы, представляющими собой оборудование участков механообрабаты-

вающих цехов. Связи реализуются в виде информационных потоков между элементами ЦПС.

На рабочее место входного контроля заготовок, оснащенное твердомером, поступает информация о номере чертежа детали и операция входного контроля с операционным эскизом согласно ТП, для выполнения замеров фактической твердости заготовки с целью последующей корректировки номинальных (стартовых) режимов резания. Информация об измеренной фактической твердости заносится в производственно-технологическую базу данных. Заготовки индивидуально идентифицируются за счет штрих-кодов или *RFID*-меток.

На рабочее место по подготовке инструментов, оснащенное прибором для настройки инструмента вне станка, поступает ведомость оснастки согласно ТП, для формирования информации о фактических геометрических размерах инструментальной сборки и записи их в производственно-технологическую базу данных. Инструментальные сборки индивидуально идентифицируются за счет штрих-кодов или *RFID*-меток.

На рабочее место наладчика или оператора станка с ЧПУ поступает производственное задание, информация о фактической твердости заготовки, геометрические параметры инструментов, документация на операцию ТП, управляющая программа (УП), стартовые (номинальные) режимы резания для каждой конкретной детали в партии и информация для автоматизированного управления операцией механической обработки. В свою очередь от станка с ЧПУ или ОЦ возможно получать информацию об отработке УП, о действующей нагрузке на привод исполнительного движения, о количестве обработанных деталей, об износе инструмента и о состоянии узлов станка.

На рабочее место КИМ поступает контрольная операция с операционным эскизом, согласно ТП и УП, для выполнения контроля обработанной детали и выдачи заключения о её годности. Информация о годности или несоответствии детали заносится в производственно-технологическую базу данных. Данная информация используется, в том числе для корректировки настроек станка и инструментальных сборок.

Рассмотрим функционирование системы для обеспечения стабильности заданного качества обработки и работоспособности инструментов в ЦПС для механической обработки.

На этапе ТПП инженер-технолог получает исходные данные для технологического проектирования: комплект конструкторской документации (КД) и технические условия (ТУ) на изготовление детали, данные о программе выпуска и др.

При разработке операций предварительной обработки руководствуются рядом критериев, в том числе объемом удаляемого материала в единицу времени. При этом для участков с автоматизированным оборудованием с ЧПУ существенное значение приобретает период работы ОЦ или объем партии обработанных деталей до остановки оборудования для замены изношенных инструментов и переналадки. При обработке стойкость инструмента связана с действующей на него нагрузкой, т.е. силами резания. Поэтому при предварительной обработке в качестве критерия АУ процессом резания в настоящей работе выступает нагрузка на режущий инструмент, поддержание стабильных значений которой во время обработки, обеспечивает надежную работу режущего инструмента.

Режимы резания и нормативная стойкость режущего инструмента рассчитываются по справочно-нормативной литературе с применением методик, повышающих надежность расчетов, активно разрабатываемых отечественными научными коллективами. В настоящей работе на основе проведенных исследований для операций предварительного точения и фрезерования разработаны математические модели [2, 3] для определения действующей силы резания P_z в зависимости от заданных параметров: скорости резания, подачи, фактической твердости материала конкретной детали и теплопроводности инструмента, определенной согласно предложенных в работе [4] рекомендаций.

Автоматизированное управление процессом резания по нагрузке на современном оборудовании с ЧПУ реализуется за счет активного мониторинга соотношения мощности резания к мощности привода главного движения. Диаграммы и числовые характеристики мощности привода главного движения $N_{ст}$, кВт в зависимости от частоты вращения и диапазона частот вращения указываются в паспортных данных оборудования с ЧПУ. Мощность резания определяется по формуле [1, 5]:

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \text{ кВт.} \quad (1)$$

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

$$P = \frac{N_{рез}}{N_{ст}} \cdot 100 \% . \quad (2)$$

Таким образом, инженером-технологом на этапе разработки ТП для предварительных операций определяются режимы резания. Скорость резания назначается исходя из тре-

бований по производительности и исходя из износостойкости инструментального материала. Коэффициент теплопроводности является присущей характеристикой выбранного инструментального материала. Методика определения данной характеристики для использования при технологическом проектировании предложена в работе [4].

При проектировании ТП принимается номинальное значение твердости. На этапе изготовления партии деталей определяется фактическая твердость материала конкретной детали, полученная в состоянии поставки или после промежуточных термических операций, предусмотренных ТП.

На основе разработанных математических зависимостей [2, 3] производится автоматизированный уточненный расчет силы резания P_z для заданных режимов и условий обработки и фактической твердости материала детали. По зависимостям (1), (2) инженером-технологом определяется и фиксируется в программном производственно-технологическом комплексе для ЦПС соответствующая характеристика нагрузки P на привод главного движения станка для каждой детали в партии. Из программного производственно-технологического комплекса для ЦПС формируется производственно-технологическая карта, содержащая требуемое значение нагрузки P для каждой изготавливаемой детали в партии, которая передается на производственный участок цеха.

Конструкторская документация ограничивает требования, предъявляемые к качеству обработанных поверхностей. В качестве основного параметра шероховатости поверхностей обработанных деталей при конструкторском проектировании в большинстве случаев принимается величина высотного параметра – среднего арифметического отклонения профиля Ra , мкм. Кроме этого, в настоящей работе использован стандартизованный шаговой параметр – средний шаг неровностей профиля S_m , мм. В качестве параметров, характеризующих деформированное состояние поверхностного слоя после механической обработки, используются величины степени наклепа U_n , % и глубины наклепа h_n , мм [6].

На этапе ТПП при разработке ТП механической обработки инженер-технолог получает исходные сведения из КД о требуемом качестве обработанных поверхностей деталей, в частности, шероховатости. Осуществляется расчет режимов резания. Аспекты, связанные с расчетом скорости резания, а также с параметрами теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материала, описаны выше.

Расчету подлежит режимный параметр, оказывающий наиболее существенное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности – подача. При заданной в КД ве-

личине среднего арифметического отклонения профиля Ra или величине среднего шага неровностей профиля Sm выполняется расчет соответствующего значения подачи для операций чистового точения и фрезерования с использованием математического аппарата, изложенного в [2, 3]. При необходимости, значение подачи при заданном параметре Ra или Sm может быть рассчитано для операций с большим съемом припуска по формулам, приведенным в [2, 3]. Кроме этого, может быть решена другая задача. На основе назначенных подачи, скорости резания, установленных теплопроводности инструментального материала и твердости обрабатываемого материала могут быть рассчитаны величины Ra и Sm по формулам, приведенным в [2, 3].

После определения требуемой подачи выполняется расчет соответствующей силы резания P_z по формулам, приведенным в [2, 3]. Для АУ нагрузка P на привод главного движения для каждой детали в партии определяется по зависимостям (1), (2).

В программном производственно-технологическом комплексе для ЦПС инженером-технологом фиксируется рассчитанная требуемая величина подачи s_0 для точения и s_z , s_0 или $s_{мин}$ для фрезерования, а также требуемое значение нагрузки P на привод главного движения станка для каждой детали в партии. Из программного производственно-технологического комплекса для ЦПС формируется производственно-технологическая карта, содержащая указанные величины и передается на производственный участок цеха.

Для автоматизации процесса ТПП разработан программный технологический расчетный модуль [7]. Модуль предназначен для автоматизации расчетов режимов резания, параметров шероховатости обработанной поверхности, силы резания и ее производных, как величины функционального параметра процесса резания, по которому выполняется АУ токарной и фрезерной обработкой с целью обеспечения стабильности качества обработки и работоспособности инструментов. Для разработки использованы математические модели, описанные в [2, 3].

Программный технологический расчетный модуль («Технологический калькулятор») может использоваться как составная часть программного производственно-технологического комплекса для ЦПС [7], так и самостоятельно при ТПП. При технологическом проектировании модуль используется инженером-технологом для определения режимов резания.

После выбора клавиши «Технологический калькулятор» (рис. 1) открывается программный технологический расчетный модуль (рис. 2).

В программном технологическом расчетном модуле («Технологический калькулятор») выполняется выбор одной из четырех вкладок:

1. Расчет силы резания P_z , Н, мощности резания N , кВт и уровня нагрузки на привод главного движения P , % (в качестве примера представлена экранная форма на рис. 2);

2. Расчет подачи s_0 для точения и s_z , s_0 или $s_{мин}$ для фрезерования;

3. Расчет среднего арифметического отклонения профиля Ra , мкм;

4. Расчет среднего шага неровностей профиля Sm , мм.

Затем указываются метод обработки, обрабатываемый материал, вид обработки и вводятся необходимые технологические данные для расчета. После нажатия клавиши «Расчет» выполняется автоматизированный расчет величины искомого параметра. Расчет на данном этапе выполняется по номинальным значениям твердости обрабатываемого материала, указанным в технологической документации и предназначен для этапа технологического проектирования.

Дальнейшее описание функционирования разработанной ЦПС для механической обработки рассмотрим на примере ТП изготовления детали «Вал-шестерня».

Объект производства – деталь 20.01 «Вал-шестерня», применяемая в изделии «Редуктор-203». Деталь изготавливается из конструкционной легированной стали 40Х ГОСТ 4543-2016. В качестве заготовки используется прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006. Для обеспечения требований КД в ТП предусмотрена операция термообработки – объемная закалка с отпуском с обеспечением КТ 75 ОСТ 3-1686-90 (277...331 НВ). Следует отметить, что отраслевым стандартом подразумевается диапазон значений твердости (277...331 НВ) при обеспечении заданной в конструкторской документации категории прочности КТ 75 [8], что подтверждает необходимость учета разброса обрабатываемости и использования АУ процессом резания.

Рассмотрим механизм функционирования разработанной ЦПС при ТПП и АУ процессом резания на примере операций 035 – «Токарная с ЧПУ» и 130 – «Вертикально-фрезерная с ЧПУ».

Операция 035 выполняется на токарно-револьверном станке с ЧПУ. Для описания работы программного производственно-технологического комплекса для ЦПС следует рассмотреть переходы чистовой токарной обработки цилиндрических поверхностей $\varnothing 70h11$ (Ra 2,5) (переход 8) и $\varnothing 45h7$ (Ra 1,25) (переход 9). В качестве режущего инструмента используются твердосплавные СМП ромбической формы CNMG 120408 согласно ISO 1832-1991 с износостойким CVD-покрытием NC3215 (Korloy). Пластина устанавливается в державку для наружного точения PCLNR 2525K 12 (ISO 1832-1991).

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Ш/К	Изделие	Индекс детали...	Наименование	Год изготовления	Номер заказа	Наличие ТП	Наличие УП
2		Редуктор-203	20.01	Вал-шестерня	2019	203-3	02/04/19	03/04/19
3	Ш/К на деталь партии	Номер в партии	Твердость, НВ	Отметка о годности	Токарная с ЧПУ 035; 8; 3; 90; 60		Вертикально-фрезерная с ЧПУ 130; 3; 1; 4; 95	
4	2	1	299	+	P=17.0% So=0.31мм/об	P=13.0% So=0.16мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
5	3	2	278	+	P=16.8% So=0.29мм/об	P=12.8% So=0.15мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
6	4	3	287	+	P=16.9% So=0.30мм/об	P=13.0% So=0.16мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
7	5	4	298	+	P=17.0% So=0.31мм/об	P=13.0% So=0.16мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
8	6	5	307	+	P=17.1% So=0.32мм/об	P=13.1% So=0.17мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
9	7	6	300	+	P=17.0% So=0.31мм/об	P=13.0% So=0.16мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
10	8	7	310	+	P=17.1% So=0.32мм/об	P=13.1% So=0.17мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
11	9	8	321	+	P=17.2% So=0.33мм/об	P=13.1% So=0.17мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
12	10	9	330	+	P=17.3% So=0.34мм/об	P=13.3% So=0.18мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
13	11	10	305	+	P=17.1% So=0.32мм/об	P=13.1% So=0.17мм/об	P=18.8% So=0.92мм/об	
14	12	Редуктор-203	20.02	Корпус	2019	203-3	03/04/19	04/04/19
15	Ш/К на деталь партии	Номер в партии	Твердость, НВ	Отметка о годности				
16	13	1						
17	14	2						
18	15	3						

Рис. 1. Экранная форма программного производственно-технологического комплекса для ЦПС

Технологический калькулятор

Сила резания Pz, Мощность N, Нагрузка P% | Поддача S | Среднеариф. откл. профиля Ra | Сред. шаг не

Метод обработки
 Точение
 Фрезерование

Обработываемый материал
 Конструкционные углеродистые и легированные стали
 Коррозионностойкие стали

Вид обработки
 Предварительная
 Чистовая

Скорость резания, V | 150 | м/мин

Поддача, S | 0.32 | мм/об - при точении
мм/зуб - при фрезеровании

Кoeff. теплопроводности инструментального материала, λ | 31.1 | Вт/м * К

Твердость обработанного материала, НВ | 307

Мощность главного привода станка, Nст | 27.28 | кВт

Рассчет

Сила резания, Pz | 1905.1 | Н

Мощность резания, N | 4.67 | кВт

Уровень нагрузки на привод, P | 17.1 | %

OK Cancel

Рис. 2. Экранная форма вкладки технологического расчетного модуля для определения силы резания Pz, N, мощности резания N, кВт и уровня нагрузки на привод главного движения P, %

На этапе разработки ТП номинальные режимы резания определяются следующим образом. В рассматриваемом примере для чистой токарной обработки стали 40Х с номинальной твердостью 300 НВ твердосплавной СМП с покрытием скорость резания принимается равной 150 м/мин [1, 5, 9]. Глубина резания согласно рекомендациям справочно-нормативной литературы для чистового точения принимается 0,5 мм. Таким образом, остается определить величину подачи, исходя из тре-

бований по шероховатости, заданных чертежом детали. Путем использования программного технологического расчетного модуля выполняется автоматизированный расчет продольной подачи. Условия обработки и назначенные режимы резания приведены в табл. 1.

Операция 130 выполняется на вертикальном сверлильно-фрезерно-расточном ОЦ с ЧПУ. Для описания работы программного производственно-технологического комплекса для ЦПС рассмотрим обработку радиусных

пазов по окружности зубчатого венца с требуемой шероховатостью $Ra = 3,2$ мкм. В качестве режущего инструмента используются концевые фрезы с цилиндрическим хвостови-

ком, оснащенные твердосплавными СМП с износостойким PVD-покрытием АСР 300 (Big Daishowa, (Sumitomo)).

1. Условия обработки и режимы резания для токарной операции с ЧПУ

Требования чертежа		Материал детали	Инструмент	Номинальные режимы резания		
Размер, мм	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	Твердость, НВ	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·К	Глубина, мм	Скорость, м/мин	Подача, мм/об
Ø70h11	2,5	300	31,1	0,5	150	0,31
Ø45h7	1,25	300	31,1	0,5	150	0,16

Аналогично ранее описанной токарной операции с ЧПУ на этапе разработки ТП определяются номинальные режимы резания. В рассматриваемом примере для чистовой фрезерной обработки стали 40Х с номинальной твердостью 300 НВ твердосплавной СМП с покрытием скорость резания принимается равной 170 м/мин [1, 5, 10]. Глубина резания согласно рекомендациям справочно-нормативной литературы для чистового фрезерования принимается равной 0,5 мм. Таким образом, остается определить величину подачи, исходя из требований по шероховатости, заданных в КД. Путем использования программного технологического расчетного модуля выполняется автоматизированный расчет подачи. Условия обработки и назначенные режимы резания приведены в табл. 2.

После завершения ТПП, на стадии запуска изготовления посредством программного производственно-технологического комплекса

формируется запись в базе данных. Выбирается клавиша «Добавить запись» и вводятся индекс изделия; индекс детали, которая применяется в этом изделии; наименование детали; год изготовления; номер заказа (договора) на изготовление (см. рис. 1). Формируется штрих-код, определяющий данную деталь как входящую в состав изделия. Кроме этого, указывается количество деталей в партии изготовления. В столбце «Номер в партии» отображаются все детали из партии с индивидуальным номером. 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 УП для станков с ЧПУ или ОЦ, и в соответствующих ячейках «Наличие ТП» и «Наличие УП» информирует о наличии данных материалов.

2. Условия обработки и режимы резания для вертикально-фрезерной операции с ЧПУ

Требования чертежа		Материал детали	Инструмент	Номинальные режимы резания		
Размер, мм	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	Твердость, НВ	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·К	Глубина, мм	Скорость, м/мин	Подача, мм/зуб
78×R1±0,5 на R115±0,5 и 78×R4±0,5 на R117,5±0,5	3,2	300	48,4	0,5	170	0,3

На следующем этапе выдается задание на изготовление производственным подразделениям предприятия.

В разработанной ЦПС на этапе получения механообрабатывающим участком цеха заготовок в соответствие с производственным заданием или деталей, прошедших промежуточную операцию термообработки, сотрудник ОТК заносит в запись, соответствующую данной детали в производственно-технологической базе, необходимую для последующего технологического передела информацию –

фактическую твердость материала детали. Внесение данных по твердости осуществляется выбором клавиши «Добавить данные твердости» (см. рис. 1). Идентификация детали выполняется путем автоматизированного считывания штрих-кода, сопровождающего деталь, или ввода номера детали в диалоговом режиме. Значения фактической твердости отображаются для каждой детали в партии в столбце «Твердость, НВ» (см. рис. 1).

В рассматриваемом примере ТП изготовления детали «Вал-шестерня» предусмотрена

промежуточная операция 025 упрочняющей термической обработки. Сгенерированный пример разброса фактических значений твердости для партии из 10-ти деталей, прошед-

ших термическую обработку на категорию прочности КТ 75 по ОСТ 3-1686-90, приведен в табл. 3 и на рис. 1.

3. Разброс фактической твердости в партии деталей, прошедших термическую обработку

Номер детали в партии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фактическая твердость, НВ	299	278	287	298	307	300	310	321	330	305

В соответствии с производственным заданием на участке настройки инструментов вне станка на основе данных из ТП подготавливаются инструментальные наладки (сборки) для выполнения операций механической обработки. Определение размеров от базирующей поверхности вспомогательного инструмента до вершины режущей кромки инструмента по осям X и Z для инструментальных наладок для токарных, сверлильных, фрезерных и расточных операций осуществляется с использованием прибора для настройки инструментов вне станка. Запись информации в производственно-технологическую базу осуществляется путем выбора клавиши «Добавить данные инструментальных наладок» (см. рис. 1).

Идентификация инструментальной сборки выполняется путем автоматизированного считывания штрих-кода, сопровождающего ее, или ввода номера инструментальной сборки в диалоговом режиме. Вводятся операционный маршрут изготовления детали и соответ-

ствующие данные по настройке инструментальных наладок. Операционный маршрут ТП отражается в программном производственно-технологическом комплексе в виде столбцов, имеющих кодировку в названии: номер операции, номер перехода, номер инструмента, размер от базовой поверхности вспомогательного инструмента до режущей кромки по оси X , размер от базовой поверхности вспомогательного инструмента до режущей кромки по оси Z . 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 по оси X равный 10 мм и размер по оси Z равный 150 мм.

Пример обмера инструментальных наладок для рассматриваемых переходов операций 035 и 130 ТП изготовления детали 20.01 «Вал-шестерня» представлен в табл. 4 и на рис. 1.

4. Пример обмера инструментальных наладок

Номер операции	Номер перехода	Номер инструмента	Размер по оси X , мм	Размер по оси Z , мм
035	8	3	90	60
035	9	3	90	60
130	3	1	4	95

Комплект инструментальных сборок направляется к ОЦ для установки в инструментальный магазин. Параметры инструментальных наладок (размеры по осям X и Z) вносятся в УП для станка с ЧПУ или ОЦ наладчиком или оператором на основе полученной производственно-технологической карты. За счет этого сокращается время на наладку станка с ЧПУ или ОЦ.

На основе данных о фактической твердости материала каждой заготовки в партии инженер-технолог имеет возможность расчета уточненных режимов резания. Для этого выбирается ячейка в окне программного производственно-технологического комплекса, соответствующая конкретной детали в партии, номеру операции и номеру перехода (см. рис. 1). Затем выполняется обращение к «Технологическому калькулятору» и его соответствующим вкладкам и расчет уточненных стартовых режимов резания. В соответствующей ячейке базы данных программного производ-

ственно-технологического комплекса для ЦПС автоматически отображаются уточненные стартовые значения подачи S и требуемой нагрузки P (%) на привод главного движения станка для АУ процессом обработки для каждой конкретной детали в партии (см. рис. 1).

Пример с результатами расчета уточненных стартовых значений подачи для партии из 10-ти деталей «Вал-шестерня» приведен в табл. 5 и на рис. 1.

После выбора клавиши «Создать производственно-технологическую карту» (см. рис. 1) автоматически формируется производственно-технологическая карта, содержащая следующую информацию: об индексе изделия; индексе и наименовании детали или сборочной единицы (ДСЕ); номере заказа (договора) и годе изготовления; количестве деталей в партии; твердости материала каждой конкретной заготовки; параметрах инструментальных сборок согласно операционного маршрута и уточненных стартовых режимах резания, в ча-

стности, о величине подачи и требуемом уровне нагрузки на привод главного движения для обеспечения стабильности получаемого качества обработанной поверхности и работоспособности инструментов; о годности ДСЕ.

Производственно-технологическая карта может быть распечатана и выдана мастером или начальником участка на рабочее место станочника.

5. Уточненные стартовые значения подачи S и требуемой нагрузки P на привод главного движения станка для обработки партии деталей

Номер детали в партии	Фактическая твердость, НВ	Операция / переход					
		035 / 8		035 / 9		130 / 3	
		s_o , мм/об	P , %	s_o , мм/об	P , %	$S_{мин}$, мм/мин	P , %
1	299	0,31	17	0,16	13	6206	18,8
2	278	0,29	16,8	0,15	12,8	6196	18,8
3	287	0,3	16,9	0,16	13	6200	18,8
4	298	0,31	17	0,16	13	6206	18,8
5	307	0,32	17,1	0,17	13,1	6210	18,8
6	300	0,31	17	0,16	13	6207	18,8
7	310	0,32	17,1	0,17	13,1	6212	18,8
8	321	0,33	17,2	0,17	13,1	6217	18,8
9	330	0,34	17,3	0,18	13,3	6221	18,8
10	305	0,32	17,1	0,17	13,1	6209	18,8

Для выполнения операций предварительной обработки разработанная система действует следующим образом. Наладчик или оператор станка с ЧПУ или ОЦ, получив производственно-технологическую карту, заносит в систему ЧПУ станка значение требуемой нагрузки P на привод главного движения для конкретной детали в партии. В процессе операций предварительной обработки имеет место колебание припуска и твердости обрабатываемого материала. Соответственно, изменяется характер стружкообразования и контактного взаимодействия, действующая сила резания и нагрузка на привод главного движения, и, соответственно, на инструмент.

Система АУ осуществляет автоматическое изменение подачи для приведения действующей нагрузки в соответствие с заданной. Тем самым реализуется постоянство действующей нагрузки на режущий инструмент в процессе операций предварительной обработки. Таким образом, в ЦПС на основе разработанных математических моделей [2, 3] обеспечивается поддержание заданного периода работоспособности инструмента или объема партии обработанных деталей до остановки оборудования для замены изношенных инструментов и переналадки, что имеет решающее значение для участков механообрабатывающих производств, оснащенных автоматизированным оборудованием с ЧПУ.

Для выполнения операций чистовой обработки порядок функционирования системы следующий. В разработанной ЦПС для механической обработки наладчик или оператор станка с ЧПУ или ОЦ получает производственно-технологическую карту, содержащую требуемые величины подачи и нагрузки на

привод главного движения для обеспечения стабильности получаемого качества обработанной поверхности и заносит их в систему ЧПУ станка для конкретной детали в партии. В процессе чистовой обработки имеет место колебание твердости обрабатываемого материала, а также изнашивание режущего инструмента. Соответственно, изменяется характер стружкообразования и контактного взаимодействия, действующая сила резания и нагрузка на привод главного движения. АУ выполняется изменением подачи при отклонениях нагрузки на привод. Таким образом, в ЦПС обеспечивается стабильность получения заданного качества поверхностей обработанных деталей (шероховатости и деформированного состояния поверхностного слоя) за счет АУ процессом резания на основе разработанных математических моделей [2, 3].

На следующем этапе ТП осуществляется контроль обработанной детали. Идентификация детали выполняется путем автоматизированного считывания штрих-кода, сопровождающего ее, или ввода номера детали в диалоговом режиме. Контролер ОТК делает отметку о годности детали (символ «+») или не годности (символ «-») в программном производственно-технологическом комплексе после выбора клавиши «Отметка о годности» (см. рис. 1).

Был проведен анализ, обнаруживший резервы повышения технико-экономической эффективности ТП механической обработки за счет предложенных мероприятий по внедрению ЦПС. Оценка выполнена с использованием комплексных критериев – технологической себестоимости [11] и коэффициента общей эффективности оборудования OEE [12, 13, 14].

По своему содержанию коэффициент *OEE* представляет оценку коэффициента использования оборудования и внецикловых потерь. Установлено, что внедрение предложенных мероприятий по ТПП и АУ процессом резания в условиях ЦПС позволяет обеспечить снижение затрат на изготовление деталей по нескольким направлениям. Среди них: снижение трудовых затрат на доработку деталей из-за неудовлетворительного качества поверхностей путем обеспечения стабильности получаемых шероховатости и деформированного состояния поверхностного слоя деталей; снижение затрат на режущий инструмент ввиду уменьшения его износа и поломок за счет использования АУ по нагрузке на инструмент; снижение затрат на производство путем уменьшения простоев оборудования с ЧПУ за счет предложенных мероприятий по обеспечению стабильной работоспособности режущих инструментов.

При выполнении анализа для рассмотренного примера ТП изготовления детали «Вал-шестерня» принят участок цеха, состоящий из четырех токарно-револьверных станков с ЧПУ и двух вертикальных сверлильно-фрезерно-расточных ОЦ с ЧПУ. Принято, что станочниками (операторами) выполняется многостаночное обслуживание. Каждый оператор обслуживает два ОЦ. Таким образом, на участке работает три оператора. Кроме этого, участок обслуживает двое наладчиков – один для станков с ЧПУ токарной группы, другой – для сверлильно-фрезерно-расточных ОЦ.

Согласно методике [11] при технико-экономическом анализе вариантов ТП следует сравнивать только те статьи затрат, которые меняются при переходе от одного варианта ТП к другому. С учетом этого при оценке снижения затрат путем уменьшения простоев оборудования с ЧПУ за счет обеспечения стабильной работоспособности режущих инструментов к расчету приняты следующие составляющие технологической себестоимости: затраты на заработную плату рабочих; расходы на амортизацию и эксплуатацию оборудования; расходы, связанные с необходимостью погашения стоимости здания, в котором располагается производственный участок; расходы на амортизацию и эксплуатацию приспособлений, как имеющие место даже при простом оборудовании. Для повышения объективности расчетов прочие накладные расходы не учитывались, ввиду их значительного отличия у различных предприятий машиностроительной отрасли.

Согласно статистическим данным о годовом объеме простоев металлорежущего оборудования с ЧПУ [15], в т.ч. из-за замены режущего инструмента, и о причинах потери работоспособности инструментов [16, 17] выполнена оценка экономии затрат при внедре-

нии предложенных мероприятий по ТПП и АУ процессом резания в ЦПС. Определена расчетная годовая экономия затрат в части технологической себестоимости изготовления детали 20.01 «Вал-шестерня» по методике [11] на принятом участке механообрабатывающего цеха в размере 1 597 591,1 руб. и установлено расчетами увеличение значения коэффициента общей эффективности оборудования *OEE*.

Таким образом, разработана структура и механизм функционирования ЦПС при ТПП и АУ операциями предварительной и чистовой токарной и фрезерной обработки. Создан программный производственно-технологический комплекс для ЦПС [7], позволяющий выполнять ТПП и АУ процессом механической обработки для каждой конкретной детали в партии изготовления. На основе проведенного анализа с использованием комплексных критериев технологической себестоимости и коэффициента общей эффективности оборудования установлено повышение технико-экономической эффективности ТП механической обработки за счет предложенных мероприятий по внедрению ЦПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Справочник** технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
2. **Ингеманссон, А.Р.** Повышение эффективности обработки резанием за счет адаптивного управления в цифровых производственных системах // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2020. – № 4(106). – С. 39-48.
3. **Ингеманссон, А.Р.** Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 27-40.
4. **Ингеманссон, А.Р., Бондарев, А.А.** Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2019. – № 12(102). – С. 28-35.
5. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / А. М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 942 с.
6. **Сулов, А. Г.** Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Сулов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
7. **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 АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады». – № 2020615978; заявл. 27.03.2020; опубл. 5.06.2020.
8. **Заготовки** из конструкционной стали для машиностроения. Общие технические условия : ОСТ 3-1686-90. – Взамен ОСТ 3-1686-80 ; введ. 01.09.90. – М.: ЦНИИ Комплекс, 1990. – 26 с. – (Отраслевой стандарт).

9. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. – South Korea: Korloy Publ., 2017. – P. 1060.
10. Big Daishowa. High precision toolholders: catalogue. – Japan: Big Daishowa Seiki Ltd., 2016. – P. 324.
11. Безязычный, В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В.Ф. Безязычный. – М.: Машиностроение, 2013. – 568 с.
12. Медведева, Г.М. Как не допустить ошибок при выборе системы управления машиностроительным производством / Г.М. Медведева, А.Б. Мусеридзе, Е.Б. Фролов // Станочный парк. – 2012. – № 8. – С. 29-35.
13. ОЕЕ: сила общей эффективности оборудования [Электронный ресурс] : Альманах Управление производством. – 2010. – Режим доступа: http://www.up-pro.ru/library/production_management/operations_management/OEE.html (дата обращения: 06.04.2020).
14. Коношенко, Н. Механизм расчета общей эффективности оборудования: пример Jordan Steel Company [Электронный ресурс] : Альманах Управление производством. – 2016. – Режим доступа: http://www.up-pro.ru/docs/Almanach_2016.pdf (дата обращения: 08.04.2020).
15. Хартли, Дж. ГПС в действии: пер. с англ. / Дж. Хартли. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
16. Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
17. Григорьев, С.Н. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учебник / С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 372 с.

REFERENCES

1. Technologists's reference book / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.
2. Ingemansson, A.P. Cutting effectiveness increase due to adaptive control in digital production systems // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.4(106). – pp. 39-48.
3. Ingemansson, A.R. Simulator development for technological preproduction and adaptive control of turning and milling in digital production systems // *Metal Machining (technology, equipment, tools)*. – 2020. – Vol.22. No.1. – pp. 27-40.
4. Ingemansson, A.R. Calculation procedure for thermal conductivity definition of modern hard-alloy tools with multi-layer coatings / A.R. Ingemansson, A.A. Bondarev // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.12(102). – pp. 28-35.

5. *Technologist's Reference Book*. In 2 Vol. Vol.2. / A.M. Dalsky [et al.]; under the editorship of A.M. Dalsky, A.G. Kosilovoy, R.K. Mescheryakova, A.G. Suslova.]. – 5-th edition revised and supplemented. – M.: Mechanical Engineering-1, 2001. – pp. 942.

6. Suslov, A.G. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique* / A.G. Suslov, A.M. Dalsky. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.

7. Certificate of State Registration of Program for Computer No.2020615978 the RF. IPC (no). *Software Production-Technological Complex for Digital Production Systems* / V.A. Shurygin, A.R. Ingemansson, V.V. Zhukov; applicant and patent holder: Joint-Stock Company "Federal Scientific and Production center "Titanium-Barricades". – No.2020615978; applied: 27.03.2020; published: 05.06.2020.

8. *Structural Steel Billets for Mechanical Engineering. General Technical Conditions*: OST 3-1686-90. – Instead of OST 3-1686-80; introduced: 01.09.90. – M.: CRI Complex, 1990. – pp. 26. – (Branch Standard).

9. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. – South Korea: Korloy Publ., 2017. – P. 1060.

10. Big Daishowa. High precision toolholders: catalogue. – Japan: Big Daishowa Seiki Ltd., 2016. – P. 324

11. Beziyazychny, V.F. *Fundamentals of Engineering Technique*: college textbook / V.F. Beziyazychny. – M.: Mechanical Engineering, 2013. – pp. 568.

12. Medvedeva, G.M. How to avoid mistakes in choice of engineering production control system / G.M. Medvedeva, A.B. Museridze, E.B. Frolov // *Machine Equipment*. – 2012. – No.8. – pp. 29-35.

13. OEE: force of equipment general effectiveness [electronic resource]: almanac of production control. – 2010. – Access mode: http://www.up-pro.ru/library/production_management/operations_management/OEE.html (address date: 06.04.2020).

14. Konoshenko, N. Mechanism for calculation of equipment general effectiveness: example of Jordan Steel Company [Electronic resource]: *Production Control Almanac*. – 2016. – Access mode: http://www.up-pro.ru/docs/Almanach_2016.pdf (Address date): 06.04.2020).

15. Hartly, J. *GPS in Action*: transl. from Engl. / J. Hartly. – M.: Mechanical Engineering. 1987. – pp. 328.

16. Starkov, V. K. *Cutting. Control of Stability and Quality in Automated Production* / V.K. Starkov. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 296.

17. Grigoriev, S.N. *Cutting in Automated Production*: textbook / S.N. Grigoriev, A.R. Maslov. - M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 372.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров