Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2020 Том 22 № 1 с. 27–40
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах

Александр Ингеманссон*

АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», пр. Ленина, б/н, г. Волгоград, 400071, Россия

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК621.9.025

История статьи:
Поступила: 22 ноября 2019
Рецензирование: 28 декабря 2019
Принята к печати: 30 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:
Технологическая подготовка производства
Обработка резанием
Адаптивное управление
Математические модели
Цифровые производственные системы

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка наукоемких решений в области технологического обеспечения стабильности получения качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента является современным направлением повышения эффективности технологических процессов механической обработки. Особое значение данная проблема приобретает для производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для цифровых производственных систем (ЦПС), т. е. она связана с реализацией концепции «индустрия 4.0» в промышленности. Нестабильность процесса резания выражается в колебании температурно-силовых характеристик процессов стружкообразования и контактного взаимодействия и провоцирует непостоянство получаемого качества обработанных поверхностей и работоспособности режущего инструмента. Адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров процесса резания при колебаниях состояния технологической системы. На основе использования возможностей современного оборудования с ЧПУ предлагается адаптивное управление режимами резания с целью повышения эффективности технологических процессов механической обработки. **Цель работы:** разработка и обоснование математических моделей влияния режимов и параметров процесса обработки на функциональные и выходные параметры точения и фрезерования для технологической подготовки производства (ТПП) и адаптивного управления процессом резания в ЦПС. **Методами исследования** являются планирование многоуровневых полных факторных экспериментов с учетом анализа наиболее распространенных обрабатываемых и инструментальных материалов, режимов и условий обработки при точении и фрезеровании на станках с ЧПУ, статистическая обработка результатов экспериментов и регрессионный анализ, анализ разработанных математических моделей с позиции теории и физических основ процесса резания. **Результаты и обсуждение.** На основе проведенных экспериментальных исследований, построения математических моделей и анализа полученных результатов получены расчетные формулы для определения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm* обработанной поверхности, подачи и силы резания при точении и фрезеровании. Представленные математические модели описывают закономерности формирования функциональных и выходных параметров обработки резанием и предназначены для ТПП и для адаптивного управления современным автоматизированным оборудованием с ЧПУ в ЦПС для механической обработки. Анализ разработанных математических моделей обнаружил закономерности формирования микрогеометрии обработанной поверхности и силы резания, т.е. нагрузки на инструмент, с позиции теории резания и температурно-деформационных закономерностей высокоскоростного пластического деформирования.

Для цитирования: *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. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40.

Введение

Реализация концепции «индустрия 4.0» в промышленности означает внедрение цифровых производственных систем (ЦПС), в которых технологическое оборудование и оснащение, материалы и изделия являются активными системными компонентами, самостоятельно

***Адрес для переписки**
Ингеманссон Александр Рональдович, к.т.н., главный технолог
АО «Федеральный научно-производственный центр
«Титан-Баррикады»
пр. Ленина, б/н
400071, г. Волгоград, Россия
Тел.: 8 (8442) 74-90-74, **e-mail:** aleing@yandex.ru

управляющими своими технологическими и логистическими процессами. Преимущества от внедрения ЦПС должны быть реализованы прежде всего в механообрабатывающем производстве [1–3].

Разработка наукоемких решений в области технологического обеспечения стабильности получения качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента является современным направлением повышения эффективности технологических процессов механической обработки. Особое значение данная проблема приобретает для производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для цифровых производственных систем (ЦПС).

Нестабильность процесса резания выражается в колебании температурно-силовых характеристик процессов стружкообразования и контактного взаимодействия и провоцирует непостоянство получаемого качества обработанных поверхностей и работоспособности режущего инструмента. Среди факторов, оказывающих влияние на возмущения системы, отметим следующие: непостоянство физико-механических свойств обрабатываемого материала, непостоянство припуска, колебания жесткости и температурные деформации элементов технологической системы, изнашивание режущего инструмента и др. [4, 5].

Адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров процесса резания при колебаниях состояния технологической системы [6–8]. На основе использования возможностей современного оборудования с ЧПУ [9] предлагается адаптивное управление режимами резания с целью повышения эффективности технологических процессов механической обработки.

Предлагаемый подход для реализации в ЦПС для механической обработки заключается в следующем.

Современное металлорежущее оборудование с ЧПУ позволяет получать данные о текущей потребляемой мощности приводом главного движения или крутящем моменте, осуществлять мониторинг и автоматическое управление на основе данных по нагрузке на привод. Указанные параметры нагрузки непосредственно определяются силой резания. Главной составляющей силы резания является тангенциальная *Pz*. Величина силы резания является функциональной, динамичной характеристикой температурно-деформационных процессов стружкообразования и контактного взаимодействия. Автоматическая корректировка режимов резания, в частности подачи, по запрограммированному алгоритму во время обработки в зависимости от изменяющейся нагрузки на привод станка позволяет повысить стабильность процесса образования обработанных поверхностей и стабильность стойкости режущего инструмента. Таким образом, адаптивное управление процессом резания для современного автоматизированного оборудования с ЧПУ с целью получения заданных значений выходных параметров обработки целесообразно выполнять по величине силы резания. В качестве выходных параметров процесса резания, определяющих эффективность обработки, целесообразно принять шероховатость обработанной поверхности и период работоспособности инструмента. Кроме этого необходимо учитывать физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, измененное в результате обработки.

Современные системы ЧПУ металлорежущего оборудования функционально позволяют выполнять адаптивное управление рабочей подачей. Однако на сегодняшний день отсутствуют комплексные методики, математические модели и программные продукты управления качеством обработки и стойкостью инструмента на основе указанного функционала. Выпускаемые продукты в основном ограничиваются защитой инструмента от поломки, а управляющее воздействие нередко выражается в выдаче предупреждающего сообщения для оператора ОЦ или аварийной остановке станка. Таким образом, разработка принципов и математических моделей для адаптивного управления процессом резания в ЦПС является актуальным научным направлением. Подача является целесообразным для выбора управляющим параметром, так как адаптивное управление подачей технически осуществимо на современном серийно выпускаемом оборудовании с ЧПУ; среди режимов резания подача имеет наибольшее влияние на шероховатость обработанной

поверхности и оказывает существенное влияние на стойкость инструмента.

В связи с этим цель настоящей работы заключается в разработке и обосновании математических моделей влияния режимов и параметров процесса обработки на функциональные и выходные параметры точения и фрезерования для последующего применения при технологической подготовке производства (ТПП) и адаптивном управлении процессом резания в ЦПС.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, выполнить выбор характеристик функции отклика, а также режимов и условий механической обработки, инструментальных и обрабатываемых материалов, выступающих в качестве влияющих факторов. Во-вторых, осуществить планирование, выполнить многоуровневые полные факторные эксперименты и провести статистическую обработку их результатов с получением математических моделей. В-третьих, провести анализ полученных математических зависимостей с позиции температурно-деформационных закономерностей процесса резания.

Методика исследований

В качестве характеристики функции отклика при обработке в материалах данного исследования выступают среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, мкм, средний шаг неровностей профиля *Sm*, мм, и нагрузка на режущий инструмент, которая выражается через силу резания *Pz*, Н.

Согласно принятым методикам назначения режимов резания на основе справочно-нормативной литературы [10–16] глубина резания *t* для предварительного точения и фрезерования была принята равной 2 мм, для чистового точения и фрезерования – 0,5 мм.

В качестве обрабатываемых материалов рассмотрены конструкционные углеродистые и легированные стали – группа «Р» согласно международному стандарту ISO и коррозионно-стойкие – группа «М», как наиболее распространенные в машиностроении. Для построения математических моделей в настоящей работе в роли фактора, определяющего свойства обрабатываемого материала, оказывающего значительное влияние на температурно-деформационные характеристики, функциональные и выходные параметры процесса резания, а также широко используемого в производственной практике, принята твердость, HV.

В качестве типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей использовалась сталь 40Х ГОСТ 4543–2016, а коррозионно-стойких сталей – сталь 20Х13 ГОСТ 5949–2018. Для задач многоуровневого полного факторного эксперимента на основе анализа конструкторской документации были определены наиболее распространенные механические свойства, предъявляемые к деталям из стали 40Х и 20Х13. На основе данного анализа были назначены режимы термической обработки при проведении экспериментов для трех уровней варьирования фактора твердости обрабатываемого материала.

Выбор геометрии и конструкции режущего инструмента также осуществлялся исходя из справочно-нормативных рекомендаций и на основе производственной практики механообрабатывающих участков.

Наиболее универсальными сменными многогранными пластинами (СМП) для токарной обработки с ЧПУ являются пластины ромбической формы с углом при вершине 80º, форма «С» согласно ISO 1832–1991. Наиболее широко применяемыми при чистовой и получистовой токарной обработке являются СМП с $r = 0{,}8$ мм. Таким образом, на основе проведенного анализа были назначены СМП геометрии и размера CNMG 120408 согласно ISO 1832–1991.

Более часто применяемым и универсальным инструментом для фрезерной обработки с ЧПУ являются концевые фрезы, позволяющие выполнять операции торцевого фрезерования, обработки уступов, отверстий и пазов, профильного и плунжерного фрезерования и др. [16] В качестве типового представителя данного вида инструмента были применены концевые фрезы с цилиндрическим хвостовиком, оснащенные твердосплавными СМП. Корпус фрезы – ST20-FCM20093-110, диаметр режущей части – 20 мм («Big Daishowa», Япония) [15]. В качестве типовой операции была назначена обработка плоскости (полки уступа) торцом инструмента при попутном асимметричном фрезеровании. Использовались твердосплавные

СМП r = 0,4 мм, как наиболее универсальные для чистовой и получистовой фрезерной обработки.

В качестве фактора, определяющего свойства инструментального материала, оказывающего значительное влияние на температурно-деформационные характеристики, функциональные и выходные параметры процесса резания, а также доступного из справочно-нормативной литературы или из разработанных практических рекомендаций [17], принята теплопроводность λ, Вт/м · К.

Исходя из различных теплопроводностей инструментальных материалов, видов обработки, а также применяемых инструментов при обработке рассматриваемых групп сталей назначены следующие виды твердых сплавов [17]. Для токарной обработки конструкционных углеродистых и легированных сталей (группа «Р») – твердосплавные СМП с CVD-покрытием NC3215, твердосплавные СМП без покрытия H01 и безвольфрамовые твердосплавные (керметы) СМП без покрытия – CN2500 для предварительного точения и CN1500 для чистового точения. Для токарной обработки коррозионно-стойких сталей (группа «М») – твердосплавные СМП с CVD-покрытием NC5330, твердосплавные СМП без покрытия H01 и безвольфрамовые твердосплавные (керметы) СМП без покрытия – CN2500 для предварительного точения и CN1500 для чистового точения (все «Korloy», Ю. Корея) [14]. Для фрезерной обработки сталей групп «Р» и «М» использовались твердосплавные СМП с PVD-покрытием ACP 200, ACP 300 и ACZ350S (все «Big Daishowa» («Sumitomo»), Япония) [15].

Диапазоны варьирования факторов скорости резания и подачи для предварительной и чистовой обработки устанавливались согласно принятым методикам назначения режимов резания на основе справочно-нормативной литературы [10–16]. Обработка выполнялась без СОТС, точение – на токарном ОЦ с ЧПУ мод. SL-40L, фрезерование – на горизонтальном сверлильно-фрезерно-расточном ОЦ с ЧПУ мод. EC-1600 (все «Haas Automation», США).

Построение математических моделей выполнялось исходя из результатов многоуровневых полных факторных экспериментов. Минимальный объем статистической выборки, на основании которой осуществлялось моделирование, определялся по зависимости

$$k_{\min} = 3^n = 3^4 = 81, \qquad (1)$$

где $k_{\min}$ – минимально необходимое и достаточное количество независимых комбинаций опытов при полном факторном эксперименте; n – количество факторов.

При исследованиях выполнялось построение и последующее сравнение математических моделей следующих спецификаций: линейной, степенной и показательной как наиболее часто рассматриваемых. Оценка статистической значимости и определение степени влияния обсуждаемых факторов выполнялись с помощью критерия Стьюдента. Оценка адекватности построенных моделей выполнялась по величине критерия Фишера. Средняя относительная погрешность (расхождение значений среднего арифметического отклонения профиля *Ra*, среднего шага неровностей профиля *Sm* и силы резания *Pz*, рассчитанных по модели и полученных опытным путем) степенных моделей не превышает 16,6 %, что удовлетворяет требованиям практики механической обработки. Сравнение полученных математических моделей путем оценки погрешности обнаружило предпочтение моделей степенного вида.

На основе разработанных моделей для определения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm*, исходя из режимов и условий обработки, решена и обратная задача. Выведены математические зависимости для определения величины подачи *S* для обеспечения шероховатости обработанной поверхности (по параметру *Ra* или *Sm*), заданной техническими условиями на изготовление детали.

Для удобства использования моделей, упрощения вычислений при технологической подготовке производства и для задач адаптивного управления автоматизированным оборудованием с ЧПУ они выражены в виде расчетных формул, которые приведены в табл. 1 и 2.

Зависимости рекомендуются для режимов и условий обработки, приведенных в табл. 3.

Таблица 1

Table 1

Расчетные формулы для ТПП и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой деталей из конструкционных углеродистых и легированных сталей

Calculation formulas for TPP and adaptive control of turning and milling of parts made of carbon and alloyed steels

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 130,7 s^{1,18} v^{-0,09} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,36}$	(2)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{130,7 v^{-0,09} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,36}} \right)^{1/18}$	(3)
	Sm, мм	$Sm = 0,57 s^{0,94} v^{0,01} \lambda^{-0,06} \mathrm{HV}^{0,15}$	(4)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{0,57 v^{0,01} \lambda^{-0,06} \mathrm{HV}^{0,15}} \right)^{1/0,94}$	(5)
	Pz, Н	$Pz = 16501,7 s^{0,72} v^{-0,17} \lambda^{0,006} \mathrm{HV}^{0,12}$	(6)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4520,9 s^{1,08} v^{-0,32} \lambda^{0,31} \mathrm{HV}^{-1}$	(7)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{4520,9 v^{-0,32} \lambda^{0,31} \mathrm{HV}^{-1}} \right)^{1/1,08}$	(8)
	Sm, мм	$Sm = 1,65 s^{0,87} v^{-0,13} \lambda^{0,11} \mathrm{HV}^{-0,03}$	(9)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{1,65 v^{-0,13} \lambda^{0,11} \mathrm{HV}^{-0,03}} \right)^{1/0,87}$	(10)
	Pz, Н	$Pz = 1227438,3 s^{0,22} v^{-1,25} \lambda^{0,02} \mathrm{HV}^{-0,004}$	(11)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 7,13 Sz^{0,8} v^{-0,21} \lambda^{0,39} \mathrm{HV}^{-0,06}$	(12)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{7,13 v^{-0,21} \lambda^{0,39} \mathrm{HV}^{-0,06}} \right)^{\frac{1}{0,8}}$	(13)
	Sm, мм	$Sm = 5,96 Sz^{0,85} v^{0,13} \lambda^{-0,26} \mathrm{HV}^{-0,14}$	(14)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{5,96 v^{0,13} \lambda^{-0,26} \mathrm{HV}^{-0,14}} \right)^{1/0,85}$	(15)
	Pz, Н	$Pz = 4316,8 Sz^{0,2} v^{-0,13} \lambda^{0,04} \mathrm{HV}^{0,1}$	(16)

Окончание табл. 1
End table 1

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Чистовое	*Ra*, мкм	$Ra = 11,44Sz^{0,84}v^{-0,1}\lambda^{0,09}\mathrm{HV}^{-0,02}$	(17)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{11,44v^{-0,1}\lambda^{0,09}\mathrm{HV}^{-0,02}}\right)^{1/0,84}$	(18)
	Sm, мм	$Sm = 0,27Sz^{0,9}v^{0,04}\lambda^{-0,29}\mathrm{HV}^{0,52}$	(19)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{0,27v^{0,04}\lambda^{-0,29}\mathrm{HV}^{0,52}}\right)^{1/0,9}$	(20)
	Pz, Н	$Pz = 10658,6Sz^{0,1}v^{-0,45}\lambda^{0,19}\mathrm{HV}^{0,02}$	(21)

Таблица 2
Table 2

Расчетные формулы для ТПП и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой деталей из коррозионно-стойких сталей

Calculation formulas for TPP and adaptive control of turning and milling of parts made of stainless steels

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	*Ra*, мкм	$Ra = 24,9s^{1,15}v^{0,15}\lambda^{-0,07}\mathrm{HV}^{-0,21}$	(22)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Ra}{24,9v^{0,15}\lambda^{-0,07}\mathrm{HV}^{-0,21}}\right)^{1/1,15}$	(23)
	Sm, мм	$Sm = 0,76s^{0,88}v^{-0,01}\lambda^{-0,03}\mathrm{HV}^{0,1}$	(24)
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{0,76v^{-0,01}\lambda^{-0,03}\mathrm{HV}^{0,1}}\right)^{\frac{1}{0,88}}$	(25)
	Pz, Н	$Pz = 134662,5s^{0,72}v^{-0,57}\lambda^{0,02}\mathrm{HV}^{0,04}$	(26)
Чистовое	*Ra*, мкм	$Ra = 20,4s^{1,4}v^{-0,02}\lambda^{0,01}\mathrm{HV}^{-0,04}$	(27)
	S_o, мм/об	$So = \left(\frac{Ra}{20,4v^{-0,02}\lambda^{0,01}\mathrm{HV}^{-0,04}}\right)^{\frac{1}{1,4}}$	(28)
	Sm, мм	$Sm = 1,16s^{0,91}v^{-0,04}\lambda^{0,1}\mathrm{HV}^{-0,04}$	(29)

Окончание табл. 2
End table 2

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
	S_o, мм/об	$S_o = \left(\frac{Sm}{1,16v^{-0,04}\lambda^{0,1}HV^{-0,04}} \right)^{1/0,91}$	(30)
	Pz, Н	$Pz = 1884646,9s^{0,14}v^{-1,13}\lambda^{-0,01}HV^{-0,24}$	(31)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 5,5Sz^{0,51}v^{-0,05}\lambda^{0,53}HV^{-0,43}$	(32)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{5,5v^{-0,05}\lambda^{0,53}HV^{-0,43}} \right)^{1/0,51}$	(33)
	Sm, мм	$Sm = 32,56Sz^{1,04}v^{0,01}\lambda^{0,77}HV^{-1,01}$	(34)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{32,56v^{0,01}\lambda^{0,77}HV^{-1,01}} \right)^{1/1,04}$	(35)
	Pz, Н	$Pz = 9891,1Sz^{0,19}v^{-0,22}\lambda^{0,04}HV^{0,03}$	(36)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4,7Sz^{0,72}v^{-0,02}\lambda^{0,18}HV^{-0,13}$	(37)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{4,7v^{-0,02}\lambda^{0,18}HV^{-0,13}} \right)^{\frac{1}{0,72}}$	(38)
	Sm, мм	$Sm = 14,72Sz^{1,08}v^{-0,32}\lambda^{-0,17}HV^{0,12}$	(39)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{14,72v^{-0,32}\lambda^{-0,17}HV^{0,12}} \right)^{1/1,08}$	(40)
	Pz, Н	$Pz = 36536,2Sz^{0,22}v^{-0,55}\lambda^{0,04}HV^{0,03}$	(41)

Таблица 3
Table 3

Режимы и условия механической обработки, для которых разработаны расчетные формулы
Modes and conditions of machining which for the calculation formulas are developed

Вид обработки (глубина резания)	Фактор	Диапазон	Фактор	Диапазон	HV обработка материала
	Точение		Фрезерование		
Предварительная (t = 2 мм)	S_o, мм/об	0,3…0,5	Sz, мм/зуб	0,09…0,15	Сталь 40Х НВ 230-370 Сталь 20Х13 НВ 190-300
	v, м/мин	60…120	v, м/мин	60…120	
	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	11…51	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	37,1…55,3	
Чистовая (t = 0,5 мм)	S_o, мм/об	0,08…0,25	Sz, мм/зуб	0,06…0,12	
	v, м/мин	100…200	v, м/мин	100…200	
	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	11…51	$\lambda_{инстр}$, Вт/м · К	37,1…55,3	

Результаты и их обсуждение

Анализ, выполненный с позиций температурно-деформационных основ процесса резания [18], позволил сформулировать следующие закономерности изменения шероховатости обработанной поверхности и силы резания, т. е. нагрузки на режущий инструмент.

Значения коэффициентов регрессии математических моделей для определения величины среднего арифметического отклонения профиля *Ra* для предварительного и чистового точения и фрезерования демонстрируют, что наибольшее влияние на формирование шероховатости обработанной поверхности оказывает величина подачи (см. формулы (2), (7), (12), (17), (22), (27), (32), (37)). С увеличением подачи шероховатость растет, что согласуется с представлениями о геометрических факторах формирования микронеровностей обработанной поверхности [12, 19].

При точении изменение скорости резания имеет неодинаковое влияние в зависимости от вида обрабатываемого материала. Так, при точении типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей – стали 40Х с увеличением скорости резания имеет место снижение шероховатости обработанной поверхности (коэффициенты регрессии –0,09 и –0,32 для предварительного и чистового точения соответственно в формулах (2), (7)). Данная тенденция объясняется увеличением скорости деформации и температуры в зоне резания и соответственно облегчением перемещения металла в контактной зоне и улучшением условий формирования обработанной поверхности. При этом следует отметить, что для чистового точения влияние скорости резания почти в четыре раза выше, чем для предварительного (см. значения коэффициентов регрессии). Это объясняется увеличением влияния теплофизических аспектов формирования обработанной поверхности при небольших глубинах резания (t = 0,5мм) по сравнению с превалированием геометрических факторов при предварительной обработке (t = 2 мм).

Изменение теплопроводности инструментального материала также имеет неодинаковое влияние в зависимости от вида обрабатываемого материала на токарных операциях. При точении типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей – стали 40Х с увеличением теплопроводности инструментального материала величина *Ra* растет (см. формулы (2), (7)). Данное явление объясняется увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания при увеличении теплопроводности инструмента. Вследствие этого согласно температурно-деформационным закономерностям контактного взаимодействия, описанным в работе [18], имеет место увеличение участка пластического контакта зоны контактных пластических деформаций (КПД), увеличение сил резания и ухудшение условий формирования обработанной поверхности. При этом аналогично фактору скорости резания при чистовом точении влияние теплопроводности инструментального материала почти в 16 раза выше, чем для предварительного точения.

С увеличением твердости обрабатываемого материала при точении и фрезеровании значение среднего арифметического отклонения профиля снижается (см. формулы (2), (7), (22), (27)), что согласуется с имеющимися представлениями об обработке резанием ([12, 13, 18, 20] и др.) и объясняется стабилизацией линии раздела, уменьшением зоны очага разрушения при отделении стружки и соответствующим изменением характера процессов контактного взаимодействия в зоне резания. При этом из полученных математических моделей для токарной обработки следует, что влияние твердости обрабатываемого материала на значение шероховатости обработанной поверхности является вторым по величине после влияния подачи.

Изменение скорости резания и теплопроводности инструментального материала при точении коррозионно-стойких сталей оказывает влияние на величину среднего арифметического отклонения профиля *Ra*, обусловленное особенностями обработки резанием данных материалов.

При точении стали 20Х13 на предварительных режимах при увеличении скорости резания имеет место увеличение шероховатости обработанной поверхности (коэффициент регрессии +0,15 в формуле (22)). Кроме этого увеличение теплопроводности инструментального материала приводит к уменьшению величины параметра *Ra* (коэффициент регрессии –0,07 в формуле (22)).

Данные явления объясняются теплофизическими особенностями обработки резанием коррозионно-стойких сталей [18, 21]. Во-первых, лезвийная обработка данных материалов характеризуется высокочастотной цикличностью, т.е. неустойчивостью процесса стружкообразования и контактного пластического деформирования в широком диапазоне скоростей, что негативно сказывается на формировании микрогеометрии обработанной поверхности. Изменение факторов процесса точения, вызывающее рост температуры в зоне резания, способствует росту частоты цикличности. Во-вторых, в противоположность конструкционным углеродистым и легированным сталям с ростом температуры теплопроводность коррозионно-стойких сталей растет. В связи с этим при росте температуры резания сток теплоты из зоны КПД в обрабатываемый материал интенсифицируется, что способствует увеличению участка пластического контакта зоны КПД и ухудшению условий формирования обработанной поверхности.

По причине описанных особенностей при предварительной токарной обработке, когда имеют место большие сечения среза, увеличение скорости резания способствует существенному увеличению объема тепловыделения в зоне резания и развитию описанных выше механизмов. Увеличение теплопроводности инструментального материала содействует более интенсивному отводу тепла в тело инструмента и обратному влиянию на развитие описанных выше процессов по сравнению со скоростью резания. Рост тепловыделения при увеличении скорости резания имеет большее влияние, чем изменение теплопроводности инструмента (см. значения коэффициентов регрессии в формуле (22)). Данные аспекты обусловливают величины и знаки коэффициентов регрессии для факторов скорости резания и теплопроводности инструментального материала в формуле (22).

При точении стали 20Х13 на чистовых режимах в связи с относительно небольшим сечением среза изменение мощности источника тепла оказывает меньшее влияние. Поэтому при увеличении скорости резания уменьшается шероховатость обработанной поверхности (коэффициент регрессии –0,02 в формуле (27)). При увеличении теплопроводности инструментального материала происходит незначительное увеличение величины параметра *Ra* (коэффициент регрессии 0,01 в формуле (27)). Следует отметить, что при чистовом точении коррозионно-стойкой стали изменение факторов скорости резания и теплопроводности инструмента оказывает незначительное влияние.

Влияние факторов скорости резания, теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материала на величину среднего арифметического отклонения профиля *Ra* при фрезерной обработке характеризуется их особенностями.

В связи с кратковременностью нахождения зуба фрезы в процессе повторяющихся актов отделения стружки, по сравнению с установившимся резанием при однолезвийной (токарной) обработке, влияние высокочастотной цикличности стружкообразования при обработке коррозионно-стойких сталей при фрезеровании оказывает меньшее влияние на качество поверхности, чем при точении. Увеличение скорости резания при предварительном и чистовом фрезеровании конструкционных углеродистых и легированных сталей и коррозионно-стойких сталей способствует снижению величины *Ra* (см. формулы (12), (17), (32), (37)). Указанное влияние обусловлено увеличением скорости деформации и температуры в зоне резания и соответственно облегчением перемещения металла в контактной зоне и улучшением условий формирования обработанной поверхности.

При многолезвийной обработке с увеличением теплопроводности инструментального материала величина среднего арифметического отклонения профиля растет (см. формулы (12), (17), (32), (37)). Как описано ранее, подобное влияние теплопроводности инструментального материала связано с увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания при увеличении теплопроводности инструмента. В результате этого согласно температурно-деформационным закономерностям контактного взаимодействия, описанным в [18], имеет место увеличение участка пластического контакта зоны КПД, увеличение сил резания и ухудшение условий формирования обработанной поверхности. Анализ математических моделей для определения величины *Ra* при фрезерной обработке говорит о том, что теплопроводность инструментального

материала оказывает второе по значимости влияние после величины подачи.

Следует отметить, что при чистовой многолезвийной обработке влияние факторов скорости резания, теплопроводности инструментального и твердости обрабатываемого материала на величину среднего арифметического отклонения профиля почти в 2,5 раза ниже, чем при предварительном фрезеровании (см. значения коэффициентов регрессии в формулах (12), (17), (32), (37)). Это объясняется меньшим сечением среза, приходящегося на один зуб фрезы, при чистовой обработке, и, следовательно, уменьшением роли факторов, определяющих уровень напряжений в зоне резания (твердость), интенсивность тепловыделения (скорость резания) и характер теплораспределения (теплопроводность инструмента).

Относительно шаговых параметров шероховатости, к которым относится средний шаг неровностей профиля *Sm*, при лезвийной обработке они определяются в основном подачей [12]. Этим объясняется основное влияние фактора подачи по сравнению с меньшим влиянием остальных факторов в полученных математических моделях для определения величины параметра *Sm* для точения и фрезерования конструкционных углеродистых и легированных и коррозионностойких сталей (см. формулы (4), (9), (14), (19), (24), (29), (34), (39)).

Разработанные математические модели для определения величины силы резания *Pz* при точении и фрезеровании отражают следующие особенности процессов обработки.

С увеличением подачи растет толщина срезаемого слоя, уровень напряжений в зоне деформирования, размеры участков пластического и полного контактов зоны КПД и соответственно сила резания (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)). При этом при предварительной обработке подача оказывает наибольшее влияние на значение *Pz* по сравнению с остальными приведенными факторами (коэффициенты регрессии +0,72; +0,72; +0,19; +0,2 для предварительного точения и фрезерования сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (6), (16), (26), (36)). Это объясняется превалированием влияния роста площади срезаемого слоя по сравнению с влиянием других факторов, например, скорости резания. Лишь при предварительном фрезеровании стали 40Х величины коэффициентов регрессии для факторов подачи и скорости резания близки.

Увеличение скорости резания способствует уменьшению силы резания (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)). Указанное влияние на примере токарной обработки объясняется ростом интенсивности тепловыделения, снижением уровня контактных касательных напряжений в зоне КПД, увеличением угла сдвига β, уменьшением размеров участков пластического и полного контактов [18]. Следует отметить, что при чистовой токарной и фрезерной обработке скорость, в свою очередь, оказывает наибольшее влияние среди остальных рассмотренных факторов на формирование величины силы резания (коэффициенты регрессии: –1,13; –1,25; –0,55; –0,45 для чистового точения и фрезерования сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (11), (21), (31), (41)). Это объясняется превалированием теплофизических процессов в зонах стружкообразования и КПД при малых глубинах резания над влиянием площади срезаемого слоя.

Изменение теплопроводности в исследованном диапазоне величин оказывает незначительное влияние на силу резания. В основном с увеличением теплопроводности инструмента сила резания растет (см. формулы (6), (11), (16), (21), (26), (31), (36), (41)), что объясняется интенсификацией стока тепла из зоны резания и соответствующим уменьшением угла сдвига β и увеличением размеров участков пластического и полного контактов [18].

Согласно [18] увеличение механической прочности обрабатываемого материала оказывает взаимно противоположное влияние на силу резания. С одной стороны, увеличение прочности приводит к росту сопротивления деформированию в зонах стружкообразования и КПД, с другой – это способствует росту интенсивности тепловыделения и соответствующему увеличению угла сдвига β и уменьшению размеров участков пластического и полного контакта. Превалирование того или иного механизма зависит от режимов и условий обработки. Подтверждение данного положения имеет место и в настоящем исследовании в полученных зависимостях.

При предварительной токарной обработке увеличение твердости обрабатываемого матери-

ала способствует росту силы резания (коэффициенты регрессии с положительным знаком для предварительного точения сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (6), (16)) за счет относительно большей площади срезаемого слоя и роста касательных и нормальных напряжений в зоне резания. При чистовой токарной обработке имеет место обратная тенденция – увеличение твердости материала детали вызывает снижение силы резания (коэффициенты регрессии с отрицательным знаком для чистового точения сталей 20Х13 и 40Х соответственно в формулах (11), (21)), что объясняется при меньшей площади среза превалирующим влиянием роста интенсивности тепловыделения и соответствующего уменьшения размеров участков пластического и полного контактов.

При прерывистом резании в связи с кратковременностью нахождения зуба фрезы в процессе повторяющихся актов отделения стружки, по сравнению с установившимся резанием, рост сопротивления деформированию имеет превалирующее значение над ростом интенсивности тепловыделения, поэтому при фрезеровании увеличение твердости обрабатываемого материала способствует некоторому росту силы резания (коэффициенты регрессии с положительным знаком в формулах (26), (31), (36), (41)).

Выводы

Таким образом, разработанные расчетные формулы позволяют определять значения среднего арифметического отклонения профиля *Ra* и среднего шага неровностей профиля *Sm* обработанной поверхности, подачи *S* и силы резания *Pz* при точении и фрезеровании. Они предназначены для технологической подготовки производства и для адаптивного управления автоматизированным оборудованием с ЧПУ в ЦПС для механической обработки. Представленные математические модели описывают закономерности формирования функциональных и выходных параметров обработки резанием. Анализ разработанных математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления процессом резания на современном автоматизированном оборудовании с ЧПУ обнаружил закономерности формирования микрогеометрии обработанной поверхности и силы резания, т.е. нагрузки на инструмент, с позиции теории резания и температурно-деформационных закономерностей высокоскоростного пластического деформирования.

Список литературы

1. *Chang P.* Targeting “Industrie 4.0” // The Challenger. – 2017. – Vol. 9, iss. 33. – P. 2–3.

2. *Ingemansson A.R.* The development of informational-executive cyber-physical systems in materials production and metalworking // Innovative Technologies in Engineering: From Design to Competitive Product. – 2019. – Vol. 973. – P. 200–205. – DOI: 10.1007/978-3-0357-3267-2.

3. *Ingemansson A.R.* Characteristics, composition, mechanism function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering industry // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – Cham: Springer, 2020. – Vol. 2. – P. 1167–1174. – DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1.

4. *Старков В.К.* Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.

5. Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 184 с. – ISBN 978-5-6040281-1-7.

6. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control / B.S. Prasad, D.S. Prasad, A. Sandeep, G. Veeraiah // International Journal of Automation and Computing. – 2013. – Vol. 10. – P. 202–209. – DOI: 10.1007/s11633-013-0713-1.

7. Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process / F. Cus, U. Zuperl, E. Kiker, M. Milfelner // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 17, iss. 1–2. – P. 237–240.

8. *Zuperl U., Cus F., Milfelner M.* Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 1472–1478. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02/143.

9. *Chang P.* AI case study // Breakthrough. – 2018. – Vol. 10, iss. 38. – P. 12–15.

10. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с. – ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 942 с. – ISBN 5-94275-013-0.

12. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с. – ISBN 5-217-03108-5.

13. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров, Н.Л. Земина, О.А. Пленина, Ю.Я. Прохоров, А.Н. Соломахин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

14. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. – South Korea: Korloy Publ., 2017. – 1060 p.

15. Big Daishowa. High precision toolholders: catalogue. – Japan: Big Daishowa Seiki Ltd., 2016. – 324 p.

16. Sandvik Coromant machining work manual: guide. – Sweden: Elanders Publ., 2010. – 803 p.

17. *Ингеманссон А.Р., Бондарев А.А.* Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 97–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-97-105.

18. *Талантов Н.В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. – ISBN 5-217-01857-7.

19. *Kalpakjian S.*, *Schmid S.R.* Manufacturing engineering and technology. – New York: Prentice Hall, 2010. – 1180 p. – ISBN 9810681445.

20. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

21. *Липатов А.А.* Закономерности процесса резания высоколегированных сталей и пути повышения работоспособности твердосплавного инструмента: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01. – Волгоград, 1987. – 256 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2020 vol. 22 no. 1 pp. 27–40
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Development of Mathematical Models for Technological Preparation of Production and Adaptive Control for Turning and Milling in Digital Production Systems

Alexander Ingemansson *

JSC «Federal Scientific and Production Center «Titan-Barricady», Lenin av., w/n, Volgograd, 400071, Russian Federation

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

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 November 2019
Revised: 28 December 2019
Accepted: 30 January 2020
Available online: 15 March 2020

Keywords:
Technological preparation of production
Machining by cutting
Adaptive control
Mathematical models
Digital production systems

ABSTRACT

Introduction. The development of science-intensive solutions for technological providing of stabile output of machined surface quality and working performance of cutting instrument is up-to-date direction of technological process of machining efficiency increase. This problem poses special value for production systems, which use automated equipment; in particular, for digital production systems (DPS), i.e. it is connected with the implementation of "industrie 4.0" concept in industry. Instability of cutting process appears in fluctuation of thermo-load characteristics of chip-forming processes and contact interaction and promotes instability of quality of machined surface and working performance of cutting instrument. Adaptive control allows to ensure output parameters of cutting process stability while the fluctuation of condition of technological system. On the basis of modern CNC equipment abilities the adaptive control of cutting modes suggested in aim to increase the efficiency of technological process of machining. **The purpose of the work** is the development and justification of mathematical models linking the influence of modes and parameters of machining with the functional and output parameters of turning and milling to be used in technological preparation of production (TPP) and adaptive control of cutting process in DPS. **The research methods** are: planning of multilevel full-factor experiments due to the analysis of most widely used construction and tool materials, modes and conditions of machining in turning and milling on CNC machine tools, statistic treatment of experiments results and regression analysis, analysis of obtained mathematical models from the points of theory and physical principles of cutting process. **The results and discussion.** Based on the carried out experimental investigations, development of mathematical models and analysis of obtained results the calculation formulas for definition of arithmetic mean value Ra and mean roughness spacing Sm of machined surface, feed and cutting force in turning and milling are obtained. Listed mathematical models describe patterns of formation of functional and output parameters of machining by cutting and intended for TPP and for adaptive control of modern automated CNC equipment in DPS for machining. Analysis of developed mathematical models found out patterns of formation of machined surface texture and of cutting forces, i.e. tool load, from points of theory of cutting process and temperature-deformational patterns of high-speed plastic deformation.

For citation: *Ingemansson A.R.* Development of Mathematical Models for Technological Preparation of Production and Adaptive Control for Turning and Milling in Digital Production Systems. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 27–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40. (In Russian).

References

1. Chang P. Targeting "Industrie 4.0". *The Challenger*, 2017, vol. 9, iss. 33, pp. 2–3.

2. Ingemansson A.R. The development of informational-executive cyber-physical systems in materials production and metalworking. *Innovative Technologies in Engineering: From Design to Competitive Product*, 2019, vol. 973, pp. 200–205. DOI: 10.1007/978-3-0357-3267-2.

3. Ingemansson A.R. Characteristics, composition, mechanism function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering industry. *Proceedings of the 5th International Conference*

*** Corresponding author**
Ingemansson Alexander R., Ph.D. (Engineering), Head
of Technological department
JSC «Federal Scientific and Production Center «Titan-Barricady»
Lenin av., w/n,
400071, Volgograd, Russian Federation
Tel.: 8 (8442) 74-90-74, **e-mail:** aleing@yandex.ru

on Industrial Engineering (ICIE 2019). Cham, Springer, 2020, vol. 2, pp. 1167–1174. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1.

4. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. ISBN 978-5-94275-460-0.

5. Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Shatagin D.A., Kuz'mishina A.M. *Povyshenie effektivnosti protsessov mekhanoobrabotki na osnove podkhodov iskusstvennogo intellekta i nelineinoi dinamiki* [Increase of efficiency of machining processes on basis of approaches of artificial intellect and nonlinear dynamics]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 184 p. ISBN 978-5-6040281-1-7.

6. Prasad B.S., Prasad D.S., Sandeep A., Veeraiah G. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control. *International Journal of Automation and Computing*, 2013, vol. 10, pp. 202–209. DOI: 10.1007/s11633-013-0713-1.

7. Cus F., Zuperl U., Kiker E., Milfelner M. Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, vol. 17, iss. 1–2, pp. 237–240.

8. Zuperl U., Cus F., Milfelner M. Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling. *Journal of Materials Processing Technology,* 2005, vol. 164–165, pp. 1472–1478. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02/143.

9. Chang P. AI case study. *Breakthrough*, 2018, vol. 10, iss. 38, pp. 12–15.

10. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Reference book of the technologist]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p. ISBN 978-5-907104-23-5.

11. Dal'skii A.M., ed. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya.* V 2 t. T. 2 [Reference book of the technologist. In 2 vol. Vol. 2]. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 942 p. ISBN 5-94275-013-0.

12. Suslov A.G., Dal'skii A.M. *Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Science basis of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 684 p. ISBN 5-217-03108-5.

13. Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I., Zemina N.L., Plenina O.A., Prokhorov Yu.Ya., Solomakhin A.N. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov:* spravochnik [Cutting modes for hard-machined materials: reference book]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 240 p.

14. *Korloy. Metal cutting tools*: catalogue. South Korea, Korloy Publ., 2017. 1060 p.

15. *Big Daishowa. High precision toolholders*: catalogue. Japan, Big Daishowa Seiki Ltd., 2016, 324 p.

16. *Sandvik Coromant machining work manual*: guide. Sweden, Elanders Publ., 2010. 803 p.

17. *Ingemansson A.R., Bondarev A.A.* Definition of thermal conductivity of cemented carbide cutting tools with multilayer wear-resistant coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 97–105. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-97-105. (In Russian).

18. Talantov N.V. *Fizicheskie osnovy protsessa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta* [Physical fundamentals of cutting, wear and destruction of the tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 240 p. ISBN 5-217-01857-7.

19. Kalpakjian S., Schmid S.R. *Manufacturing engineering and technology.* New York, Prentice Hall, 2010. 1180 p. ISBN 9810681445.

20. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

21. Lipatov A.A. *Zakonomernosti protsessa rezaniya vysokolegirovannykh stalei i puti povysheniya rabotosposobnosti tverdosplavnogo instrumenta.* Diss. kand. tekhn. nauk [Highly-alloyed steels cutting process patterns and directions to increase efficiency of cemented carbide tools. PhD eng. sci. diss.]. Volgograd, 1987. 256 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2020 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).