А. Р. Ингеманссон¹, Ю. Л. Чигиринский², В. В. Жуков¹

**РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНОЙ И ФРЕЗЕРНОЙ
ОБРАБОТКОЙ В ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ**

¹АО «Федеральный научно-производственный центр “Титан-Баррикады”»

²Волгоградский государственный технический университет

E-mail: aleing@yandex.ru

Разработаны и проанализированы математические модели для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах.

Ключевые слова: цифровые производственные системы, математические модели, технологическая подготовка производства, адаптивное управление.

A. R. Ingemansson¹, Ju. L. Tchigirinsky², V. V. Zhukov³

**THE CALCULATION DEPENDENCIES FOR THE CONTROL
OF TURNING AND MILLING IN DIGITAL PRODUCTION SYSTEMS»**

¹JSC «Federal Scientific and Production Centre “Titan-Barricady”»

²Volgograd State Technical University

The mathematical models for technological preparation of production and adaptive control of turning and milling in digital production systems are developed.

Keywords: digital production systems, mathematical models, technological preparation of production, adaptive control.

Технологическое обеспечение стабильного получения заданных качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента определяет надежность работы производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для цифровых производственных систем (ЦПС).

За счет использования возможностей современных станков с ЧПУ предлагается адаптивное управление (АУ) обработкой резанием на основе данных по нагрузке на привод главного движения, непосредственно зависящей от главной составляющей силы резания – P_z . Подача является целесообразным для выбора управляющим параметром, т. к. АУ 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. Однако, на сегодняшний день отсутствуют комплексные методики, математические модели и программные продукты управления качеством обработки и стойкостью инструмента на основе указанного функционала.

Таким образом, разработка и обоснование 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 АУ процессом резания в ЦПС является актуальным научным направлением.

За характеристики функции отклика были приняты среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм, средний шаг неровностей профиля S_m , мм и нагрузка на режущий инст-

румент, определяемая силой резания P_z , Н.

Глубина резания t для предварительного точения и фрезерования была принята равной 2 мм, для чистового точения и фрезерования – 0,5 мм.

В качестве типового представителя конструкционных углеродистых и легированных сталей использовалась сталь 40Х ГОСТ 4543–2016, а коррозионностойких сталей – сталь 20Х13 ГОСТ 5949–2018. Путем проведения термообработки достигались три уровня варьирования фактора твердости HB .

Были определены наиболее широко распространенные виды, форма, геометрические размеры и инструментальные материалы для токарных и фрезерных инструментов. 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 [1], принята теплопроводность λ , Вт/м·К.

Обработка выполнялась без СОТС, точение – на токарном ОЦ с ЧПУ мод. SL-40L, фрезерование – на горизонтальном сверлильно-фрезерно-расточном ОЦ с ЧПУ мод. ЕС-1600 (все «Haas Automation», США).

Разработка математических моделей производилась на основании данных трехуровневых полных факторных экспериментов. Оценка погрешности построенных зависимостей обнаружила более предпочтительными модели степенного вида.

Для задач применения при ТПП и АУ станками с ЧПУ и ОЦ модели выражены в виде расчетных формул (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1

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

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	R_a , мкм	$R_a = 130,7 \times s^{1,18} \times v^{-0,09} \times \lambda^{0,02} \times HB^{-0,36}$	(1)
	S_o , мм/об	$S_o = \left(\frac{R_a}{130,7 \times v^{-0,09} \times \lambda^{0,02} \times HB^{-0,36}} \right)^{\frac{1}{1,18}}$	(2)
	S_m , мм	$S_m = 0,57 \times s^{0,94} \times v^{0,01} \times \lambda^{-0,06} \times HB^{0,15}$	(3)
	S_o , мм/об	$S_o = \left(\frac{S_m}{0,57 \times v^{0,01} \times \lambda^{-0,06} \times HB^{0,15}} \right)^{\frac{1}{0,94}}$	(4)
	P_z , Н	$P_z = 16501,7 \times s^{0,72} \times v^{-0,17} \times \lambda^{0,006} \times HB^{0,12}$	(5)

Окончание табл. 1

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4520,9 \times s^{1,08} \times v^{-0,32} \times \lambda^{0,31} \times HB^{-1}$	(6)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Ra}{4520,9 \times v^{-0,32} \times \lambda^{0,31} \times HB^{-1}} \right)^{\frac{1}{1,08}}$	(7)
	Sm, мм	$Sm = 1,65 \times s^{0,87} \times v^{-0,13} \times \lambda^{0,11} \times HB^{-0,03}$	(8)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Sm}{1,65 \times v^{-0,13} \times \lambda^{0,11} \times HB^{-0,03}} \right)^{\frac{1}{0,87}}$	(9)
	Pz, Н	$Pz = 1227438,3 \times s^{0,22} \times v^{-1,25} \times \lambda^{0,02} \times HB^{-0,004}$	(10)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 7,13 \times Sz^{0,8} \times v^{-0,21} \times \lambda^{0,39} \times HB^{-0,06}$	(11)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{7,13 \times v^{-0,21} \times \lambda^{0,39} \times HB^{-0,06}} \right)^{\frac{1}{0,8}}$	(12)
	Sm, мм	$Sm = 5,96 \times Sz^{0,85} \times v^{0,13} \times \lambda^{-0,26} \times HB^{-0,14}$	(13)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{5,96 \times v^{0,13} \times \lambda^{-0,26} \times HB^{-0,14}} \right)^{\frac{1}{0,85}}$	(14)
	Pz, Н	$Pz = 4316,8 \times Sz^{0,2} \times v^{-0,13} \times \lambda^{0,04} \times HB^{0,1}$	(15)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 11,44 \times Sz^{0,84} \times v^{-0,1} \times \lambda^{0,09} \times HB^{-0,02}$	(16)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{11,44 \times v^{-0,1} \times \lambda^{0,09} \times HB^{-0,02}} \right)^{\frac{1}{0,84}}$	(17)
	Sm, мм	$Sm = 0,27 \times Sz^{0,9} \times v^{0,04} \times \lambda^{-0,29} \times HB^{0,52}$	(18)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{0,27 \times v^{0,04} \times \lambda^{-0,29} \times HB^{0,52}} \right)^{\frac{1}{0,9}}$	(19)
	Pz, Н	$Pz = 10658,6 \times Sz^{0,1} \times v^{-0,45} \times \lambda^{0,19} \times HB^{0,02}$	(20)

Таблица 2

Расчетные формулы для ТПП и АУ токарной и фрезерной обработкой деталей из коррозионностойких сталей

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 24,9 \times s^{1,15} \times v^{0,15} \times \lambda^{-0,07} \times HB^{-0,21}$	(21)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Ra}{24,9 \times v^{0,15} \times \lambda^{-0,07} \times HB^{-0,21}} \right)^{\frac{1}{1,15}}$	(22)
	Sm, мм	$Sm = 0,76 \times s^{0,88} \times v^{-0,01} \times \lambda^{-0,03} \times HB^{0,1}$	(23)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Sm}{0,76 \times v^{-0,01} \times \lambda^{-0,03} \times HB^{0,1}} \right)^{\frac{1}{0,88}}$	(24)
	Pz, Н	$Pz = 134662,5 \times s^{0,72} \times v^{-0,57} \times \lambda^{0,02} \times HB^{0,04}$	(25)

Окончание табл. 2

Вид обработки	Расчетный параметр	Расчетная формула	Номер формулы
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 20,4 \times s^{1,4} \times v^{-0,02} \times \lambda^{0,01} \times HB^{-0,04}$	(26)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Ra}{20,4 \times v^{-0,02} \times \lambda^{0,01} \times HB^{-0,04}} \right)^{1,4}$	(27)
	Sm, мм	$Sm = 1,16 \times s^{0,91} \times v^{-0,04} \times \lambda^{0,1} \times HB^{-0,04}$	(28)
	So, мм/об	$So = \left(\frac{Sm}{1,16 \times v^{-0,04} \times \lambda^{0,1} \times HB^{-0,04}} \right)^{0,91}$	(29)
	Pz, Н	$Pz = 1884646,9 \times s^{0,14} \times v^{-1,13} \times \lambda^{-0,01} \times HB^{-0,24}$	(30)
Фрезерование			
Предварительное	Ra, мкм	$Ra = 5,5 \times Sz^{0,51} \times v^{-0,05} \times \lambda^{0,53} \times HB^{-0,43}$	(31)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{5,5 \times v^{-0,05} \times \lambda^{0,53} \times HB^{-0,43}} \right)^{0,51}$	(32)
	Sm, мм	$Sm = 32,56 \times Sz^{1,04} \times v^{0,01} \times \lambda^{0,77} \times HB^{-1,01}$	(33)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{32,56 \times v^{0,01} \times \lambda^{0,77} \times HB^{-1,01}} \right)^{1,04}$	(34)
	Pz, Н	$Pz = 9891,1 \times Sz^{0,19} \times v^{-0,22} \times \lambda^{0,04} \times HB^{0,03}$	(35)
Чистовое	Ra, мкм	$Ra = 4,7 \times Sz^{0,72} \times v^{-0,02} \times \lambda^{0,18} \times HB^{-0,13}$	(36)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Ra}{4,7 \times v^{-0,02} \times \lambda^{0,18} \times HB^{-0,13}} \right)^{0,72}$	(37)
	Sm, мм	$Sm = 14,72 \times Sz^{1,08} \times v^{-0,32} \times \lambda^{-0,17} \times HB^{0,12}$	(38)
	Sz, мм/зуб	$Sz = \left(\frac{Sm}{14,72 \times v^{-0,32} \times \lambda^{-0,17} \times HB^{0,12}} \right)^{1,08}$	(39)
	Pz, Н	$Pz = 36536,2 \times Sz^{0,22} \times v^{-0,55} \times \lambda^{0,04} \times HB^{0,03}$	(40)

Таблица 3

**Режимы и условия точения и фрезерования,
при которых применимы разработанные зависимости**

Вид обработки (глубина резания)	Фактор	Диапазон	Фактор	Диапазон	Твердость НВ обрабатываемого материала
	Точение		Фрезерование		
Предварительное (t = 2 мм)	So, 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	
	λ, Вт/м·К	11–51	λ, Вт/м·К	37,1–55,3	
Чистовое (t = 0,5 мм)	So, мм/об	0,08–0,25	Sz, мм/зуб	0,06–0,12	
	v, м/мин	100–200	v, м/мин	100–200	
	λ, Вт/м·К	11–51	λ, Вт/м·К	37,1–55,3	

Рассмотрение полученных зависимостей с позиций температурно-деформационных закономерностей процесса резания [2] позволило установить следующее.

При точении изменение скорости резания и теплопроводности инструментального материала имеет неодинаковое влияние в зависимости от вида обрабатываемого материала. При обработке стали 40Х с ростом скорости резания происходит снижение величины параметра R_a (формулы (1), (6)). 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. С повышением теплопроводности инструментального материала величина R_a растет (формулы (1), (6)). Данное явление объясняется увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания при увеличении теплопроводности инструмента, вследствие чего имеет место увеличение участка пластического контакта зоны контактных пластических деформаций (КПД), увеличение сил резания и ухудшение условий формирования обработанной поверхности.

При токарной обработке стали на предварительных режимах стали 20Х13 с ростом скорости резания имеет место увеличение шероховатости обработанной поверхности (формула (21)). Увеличение теплопроводности инструментального материала приводит к уменьшению величины параметра R_a (формула (21)). Данные явления объясняются теплофизическими особенностями обработки резанием коррозионно-стойких сталей [2, 3].

Рост скорости резания при предварительном и чистовом фрезеровании сталей 40Х и 20Х13 способствует снижению параметра R_a (формулы (11), (16), (31), (36)). При многолезвийной обработке с увеличением теплопроводности инструментального материала величина среднего арифметического отклонения профиля растет (формулы (11), (16), (31), (36)) что связано с увеличением интенсивности стока тепла из зоны резания.

С увеличением подачи растет толщина срезаемого слоя, уровень напряжений в зоне деформирования, размеры участков пластического и полного контактов зоны КПД и, соответственно, сила резания P_z (формулы (5), (10), (15), (20), (25), (30), (35), (40)). Рост скорости резания обеспечивает снижение силы резания (формулы (5), (10), (15), (20), (25), (30), (35), (40)).

Увеличение твердости стали при предварительном точении обеспечивает рост силы резания (ф-лы (5), (15)), при чистовом – наоборот (формулы (10), (20)), что объясняется при меньшей площади среза преобладающим влиянием роста интенсивности тепловыделения и соответствующего уменьшения размеров участков пластического и полного контактов.

При фрезерной обработке в связи с кратковременностью нахождения зуба фрезы в процессе повторяющихся актов отделения стружки, увеличение сопротивления деформированию имеет преобладающее значение над интенсификацией тепловыделения, в следствие чего рост твердости обрабатываемого материала способствует некоторому подъему величины силы резания (формулы (25), (30), (35), (40)).

Таким образом, разработаны и проанализированы математические модели для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ингеманссон, А. Р. Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями / А. Р. Ингеманссон, А. А. Бондарев // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 12. – С. 28–35.
2. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
3. Липатов, А. А. Закономерности процесса резания высоколегированных сталей и пути повышения работоспособности твердосплавного инструмента : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Липатов А. А. – Волгоград, 1987. – 256 с.