

УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-4-39-48

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

Повышение эффективности обработки резанием за счет адаптивного управления в цифровых производственных системах

Статья посвящена разработке решений по повышению эффективности процесса резания за счет использования возможностей современного автоматизированного оборудования с ЧПУ и применению данных решений для построения цифровых производственных систем (ЦПС) для механической обработки. Разработаны расчетные формулы, позволяющие определять значения силы резания при точении и фрезеровании, предназначенные для технологической подготовки производства (ТПП) и адаптивного управления оборудованием с ЧПУ в ЦПС.

Ключевые слова: обработка резанием; цифровые производственные системы; адаптивное управление; сила резания; математические модели; стойкость инструмента; поверхностный слой.

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

Cutting effectiveness increase at expense of adaptive control in digital production systems

The paper is dedicated to the development of solutions for cutting effectiveness increase at the expense of the potentialities use of modern NC automated equipment and these solutions application for the formation of digital production systems (DPS) for machining. There are developed computation formulae allowing the definition of cutting force values during turning and mill operation aimed for technological pre-production (TP) and for the adaptive control of NC equipment in DPSs.

Keywords: cutting; digital production systems; adaptive control; cutting force; simulators; tool durability; surface layer.

Разработка наукоемких решений в области технологического обеспечения стабильности получения качества обработанной поверхности и работоспособности режущего инструмента является актуальным 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 выража-

ется 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, следующие – непостоянство структуры и твердости материала обрабатываемой поверхности, непостоянство припуска, колебания жесткости и температурные деформации элементов технологической системы, изнашивание режущего инструмента и др. [1, 2].

Адаптивное управление позволяет повысить стабильность выходных параметров процесса резания при колебаниях состояния технологической системы [3 – 6]. На основе использования возможностей современного оборудования с ЧПУ предлагается адаптивное управление режимами резания для повышения эффективности технологических процессов механической обработки.

Принцип работы системы состоит 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 P_z . 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 стойкости режущего инструмента. Таким образом, адаптивное управление процессом резания для современного автоматизированного оборудования с ЧПУ 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 процессе обработки.

Современные системы ЧПУ металлорежущего оборудования функционально позволяют выполнять адаптивное управление рабочей подачей. Однако в настоящее время 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. В этой связи, разработка принципов и математических моделей для адаптивного управления процессом резания в ЦПС является актуальным научным направлением.

Подача является оптимальным управляющим параметром, т.к. адаптивное управление подачей технически осуществимо на современном серийно выпускаемом оборудовании с ЧПУ; среди режимов резания подача оказывает наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности и стойкость инструмента.

Для внедрения данной системы необходимо изучить закономерности влияния режимов и параметров процесса обработки на функциональные и выходные параметры, учитывая физические основы процесса резания, разработку принципов и математических моделей для технологической подготовки производства (ТПП) и адаптивного управления процессом резания в ЦПС.

Для реализации адаптивного управления были разработаны математические модели для определения силы резания P_z при точении и фрезеровании.

При построении моделей согласно известным методикам назначения режимов резания [7 – 12] 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 выбраны конструкционные углеродистые и легированные стали – группы «Р» согласно международному стандарту ISO и коррозионно-стойкие – группы «М» как самые используемые в машиностроении. Для построения математических моделей в данной работе в качестве фактора, определяющего свойства обрабатываемого материала и оказывающего значительное влияние на температурно-деформационные характеристики, функциональные и выходные параметры процесса резания, а также, широко используемого в производственной практике, принята твердость, НВ.

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 осно-

ве анализа были определены режимы термической обработки для проведения 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 механообрабатываемых участков.

Универсальными сменными многогранными пластинами (СМП) для токарной обработки с ЧПУ являются пластины ромбической формы с углом при вершине 80° , 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.

Наиболее широко 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. В качестве типового инструмента были применены концевые фрезы с цилиндрическим хвостовиком, оснащенные твердосплавными СМП. Корпус фрезы – ST20-FCM20093-110, диаметр режущей части – 20 мм (*Big Daishowa*, Япония) [12]. В качестве типовой операции была выбрана обработка плоскости (полки уступа) торцом инструмента при попутном, ассиметричном фрезеровании. Использовались твердосплавные СМП $r = 0,4$ мм как наиболее универсальные для чистовой и получистовой фрезерной обработки.

В качестве фактора, определяющего свойства инструментального материала и 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 [13], принята теплопроводность λ , Вт/м·К.

Исходя из различных теплопроводностей инструментальных материалов, видов обработки, а также применяемых инструментов при обработке рассматриваемых групп сталей выбраны следующие виды твердых сплавов [13]. 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) [11]. Для фрезерной обработки сталей групп «Р» и «М» использовались твердосплавные СМП с PVD-покрытием ACP200, ACP 300 и ACZ350S (все *Big Daishowa (Sumitomo)*, Япония) [12].

Диапазоны варьирования факторов скорости резания и подачи для предварительной и чистовой обработки устанавливались согласно принятым методикам назначения режимов резания на основе справочно-нормативной литературы [7 - 12]. 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 следующей зависимости:

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

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. Сравнение моделей путем оценки погрешности показало, что предпочтение должно быть дано моделям степенного вида.

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.

1. Расчетные формулы по определению величины силы резания для ТПП и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой

Вид обработки	Обрабатываемый материал	Расчетная формула	Номер формулы
Точение			
Предварительное	40X	$P_z = 16501,7 \cdot S_0^{0,72} \cdot v^{-0,17} \cdot \lambda^{0,006} \cdot HB^{0,12}$	(2)
	20X13	$P_z = 134662,5 \cdot S_0^{0,72} \cdot v^{-0,57} \cdot \lambda^{0,02} \cdot HB^{0,04}$	(3)
Чистовое	40X	$P_z = 1227438,3 \cdot S_0^{0,22} \cdot v^{-1,25} \cdot \lambda^{0,02} \cdot HB^{-0,004}$	(4)
	20X13	$P_z = 1884646,9 \cdot S_0^{0,14} \cdot v^{-1,13} \cdot \lambda^{-0,01} \cdot HB^{-0,24}$	(5)
Фрезерование			
Предварительное	40X	$P_z = 4316,8 \cdot S_z^{0,2} \cdot v^{-0,13} \cdot \lambda^{0,04} \cdot HB^{0,1}$	(6)
	20X13	$P_z = 9891,1 \cdot S_z^{0,19} \cdot v^{-0,22} \cdot \lambda^{0,04} \cdot HB^{0,03}$	(7)
Чистовое	40X	$P_z = 10658,6 \cdot S_z^{0,1} \cdot v^{-0,45} \cdot \lambda^{0,19} \cdot HB^{0,02}$	(8)
	20X13	$P_z = 36536,2 \cdot S_z^{0,22} \cdot v^{-0,55} \cdot \lambda^{0,04} \cdot HB^{0,03}$	(9)

Помимо этого, были разработаны модели для определения среднего арифметического отклонения профиля Ra и среднего шага неровностей профиля Sm обработанной поверхности.

Зависимости рекомендуются для режимов и условий обработки, приведенных в табл. 2.

2. Режимы и условия механической обработки, для которых разработаны расчетные формулы

Вид обработки (глубина резания)	Фактор	Диапазон	Фактор	Диапазон	HV обработанного материала
	Точение		Фрезерование		
Предварительная ($t=2$ мм)	S_0 , мм/об	0,3...0,5	S_z , мм/зуб	0,09...0,15	Сталь 40X 230...370 HV Сталь 20X13 190...300 HV
	v , м/мин	60...120	v , м/мин	60...120	
	λ инстр, Вт/м·К	11...51	λ инстр, Вт/м·К	37,1...55,3	
Чистовая ($t=0,5$ мм)	S_0 , мм/об	0,08...0,25	S_z , мм/зуб	0,06...0,12	
	v , м/мин	100...200	v , м/мин	100...200	
	λ инстр, Вт/м·К	11...51	λ инстр, Вт/м·К	37,1...55,3	

Анализ разработанных моделей, выполненный с позиций температурно-деформационных основ процесса резания [14], позволил сформулировать следующие закономерности изменения силы резания, т.е. нагрузки на режущий инструмент.

С увеличением подачи растет толщина срезаемого слоя, уровень напряжений в зоне деформирования, размеры участков пластического и полного контактов зоны контактных пластических деформаций и, соответственно, сила резания (см. формулы (2) – (9)). При этом при предварительной обработке подача оказывает наибольшее влияние на значение P_z по сравнению с остальными приведенными факторами (коэффициенты регрессии +0,72; +0,2; +0,72; +0,19 для предварительного точения и фрезерования сталей 40X и 20X13, соответственно, в формулах (2), (6), (3), (7)). Это объясняется превалированием влияния роста площади срезаемого слоя над влиянием других

факторов, например, скорости резания. Лишь при предварительном фрезеровании стали 40X величины коэффициентов регрессии для факторов подачи и скорости резания близки.

Увеличение скорости резания способствует уменьшению силы резания (см. формулы (2) – (9)). Указанное влияние на примере токарной обработки объясняется ростом интенсивности тепловыделения, снижением уровня контактных касательных напряжений в зоне контактных пластических деформаций, увеличением угла сдвига β , уменьшением размеров участков пластического и полного контактов [14]. Следует отметить, что при чистовой токарной и фрезерной обработке уже скорость в свою очередь оказывает наибольшее влияние на формирование величины силы резания (коэффициенты регрессии -1,25; -0,45; -1,13; -0,55 для чистового точения и фрезерования сталей 40X и 20X13, соответственно, в формулах (4), (8), (5), (9) по сравнению с другими рассмот-

ренными факторами. Это объясняется прева-лированием теплофизических процессов в зонах стружкообразования и контактных пластических деформаций при малых глубинах резания над влиянием площади срезаемого слоя.

С увеличением теплопроводности инстру-мента сила резания растет (см. формулы (2) – (9)), что объясняется интенсификацией стока тепла из зоны резания и соответствующим уменьшением угла сдвига β и увеличением размеров участков пластического и полного контакта [14].

Увеличение механической прочности обра-батываемого материала оказывает взаимно противоположное влияние на силу резания [14]. С одной стороны, увеличение прочности приводит к росту сопротивления деформиро-ванию в зонах стружкообразования и контактных пластических деформаций. С другой сто-роны, это способствует росту интенсивности тепловыделения и соответствующему увели-чению угла сдвига β и уменьшению размера участков пластического и полного контакта. Превалирование того или иного механизма зависит от режимов и условий обработки. В данном исследовании дано подтверждение этого положения в полученных зависимостях.

При предварительной токарной обработке увеличение твердости обрабатываемого мате-риала способствует росту силы резания (ко-эффициенты регрессии с положительным зна-ком для предварительного точения сталей 40X и 20X13, соответственно, в формулах (2), (3)) за счет относительно большей площади срезаемого слоя и роста касательных и нормаль-ных напряжений в зоне резания. При чистовой токарной обработке прослеживается обратная тенденция – увеличение твердости материала детали вызывает снижение силы резания (ко-эффициенты регрессии с отрицательным зна-ком для чистового точения сталей 40X и 20X13, соответственно, в формулах (4), (5)), что объясняется преваляющим влиянием роста интенсивности тепловыделения и соот-ветствующего уменьшения размеров участков пластического и полного контакта при мень-шей площади среза.

При прерывистом резании в связи с кратко-временностью нахождения зуба фрезы в про-цессе повторяющихся актов отделения струж-ки, по сравнению с установившемся резанием, рост сопротивления деформированию имеет преваляющее значение над ростом интен-сивности тепловыделения. В этой связи, уве-личение твердости обрабатываемого материа-

ла при фрезеровании способствует некоторо-му росту силы резания (коэффициенты рег-рессии с положительным знаком в формулах (6) – (9)).

После разработки математических моделей для обеспечения стабильной работоспособно-сти инструмента на автоматизированном ме-таллорежущем оборудовании с ЧПУ были проведены экспериментальные исследования по адаптивному управлению процессом реза-ния.

Например, на рис. 1 представлена зависи-мость роста площадки износа h_z по главной задней поверхности от пройденного режущей кромкой СМП пути при точении (сталь 40X (твердость HB 300) – твердый сплав NC3215; $t = 2$ мм; $v = 120$ м/мин; $S_0 = 0,5$ мм/об). На кривых следует выделить участки приработки – интенсивного изнашивания новой режущей кромки, вступившей в работу, и нормального изнашивания – относительно стабильного функционирования лезвия во времени до дос-тижения заданной величины износа. В качест-ве такого критерия принимается размер пло-щадки (фаски) износа h_z . Согласно справочно-нормативной литературе в данном исследова-нии значение этого параметра при предвари-тельном точении равно 0,8 мм.

На рис. 2 показана зависимость изменения силы резания P_z , выраженной из величины мощности на приводе главного движения станка, при экспериментальных исследовани-ях изнашивания инструмента (сталь 40X (твердость HB 300) – твердый сплав NC3215; $t = 2$ мм; $v = 120$ м/мин; $S_0 = 0,5$ мм/об).

Анализ данных, полученных при исследо-ваниях, показывает следующее:

1) разработанные математические модели с достаточной степенью точности описывают процесс обработки для использования при технологической подготовке производства и адаптивном управлении;

2) расчетное значение силы резания по зависимости (2) для режимов и условий рис. 1 и рис. 2 составляет 9296 Н;

3) экспериментально полученное значе-ние силы резания при точении не изношенной кромкой СМП (первая точка на графике (см. рис. 2) составляет 8523 Н, а при достижении заданной величины износа $h_z = 0,8$ мм (по-следняя точка на графике (см. рис. 2) равна 8883 Н;

4) погрешность расчета по математиче-ской зависимости (2) составляет 9,07 % и 4,65 % соответственно, что удовлетворяет для практического применения.

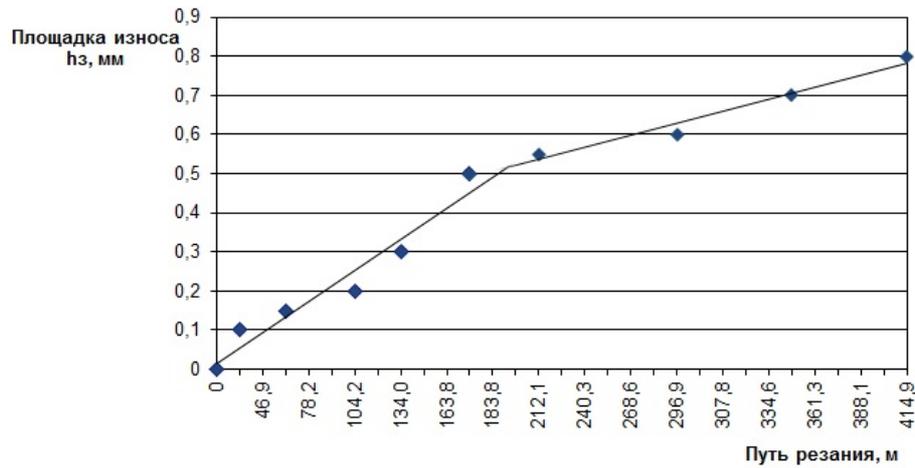


Рис. 1. Зависимость изменения величины площадки износа по задней поверхности СМП от пути резания

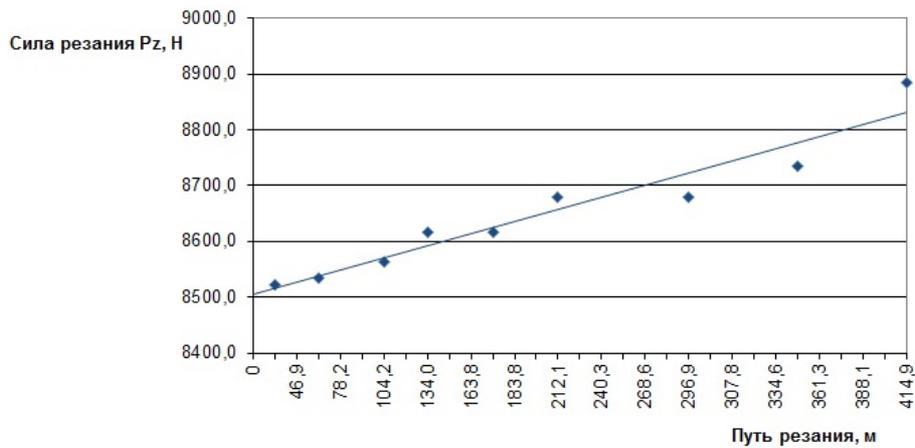


Рис. 2. Зависимость изменения величины силы резания P_z от пути резания

Полученные математические модели для определения силы резания (нагрузки на инструмент) позволяют выполнять адаптивное управление процессом резания в ЦПС для обеспечения заданной работоспособности инструмента. Адаптивное управление по величине силы резания за счет ее вычисленной нормативной величины, занесенной в систему ЧПУ станка, позволяет обеспечивать работу инструмента в стабильных условиях в период нормального изнашивания, нивелируя влияние колебаний припуска, твердости и структуры материала заготовки.

Для изучения возможности адаптивного управления в ЦПС стабильностью деформированного состояния поверхностного слоя обработанных деталей были проведены следующие исследования:

1) Выполнены работы по определению поверхностной микротвердости HV, глубины h_H и степени U_H наклепа на деталях, обработанных точением, при использовании свежей твердосплавной СМП и изношенной (площад-

ка износа $h_z = 0,8$ мм).

2) Производилось продольное точение на проход стали 40X (твердость HB 300) без СОТС СМП CNMG120408 из твердого сплава NC3215 на следующих режимах: глубина резания $t = 2$ мм; скорость резания $v = 120$ м/мин; подача $S_o = 0,5$ мм/об. При точении новой режущей кромкой сила резания P_z составляла 8439 Н, при точении изношенной кромкой – 8883 Н.

3) Заготовки были порезаны на диски, из которых на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ в последствии, были изготовлены образцы для металлографических исследований.

Исследование глубины наклепа h_H выполнялось на металлографическом микроскопе мод. МЕТАМ ЛВ-41 (АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) и микротвердомере мод. KB-30S (KB Pruftechnik GmbH, Германия). С использованием последнего также выполнялось определение поверхностной микротвердости HV и степени U_H наклепа на изготовленных об-

разцах.

Для экспериментальных исследований с использованием микроскопа мод. МЕТАМ ЛВ-41 применялись образцы габаритами $15 \times 10 \times 7$ мм, содержащие фрагмент окружности наружной поверхности диска $\varnothing 60$ мм. Производились полировка и травление исследуемых поверхностей образцов. На микроскопе мод. МЕТАМ ЛВ-41 использовалось 200- и 500-кратное увеличение.

Для определения глубины деформированного слоя выделялась граница между зоной

наклепа и исходной структурой металла. Затем производились измерения глубины наклепа с учетом масштаба полученной фотографии посредством САD-системы.

Результаты экспериментальных исследований показывают следующее:

1) после точения новой режущей кромкой глубина наклепа лежит в диапазоне $0,019 \dots 0,022$ мм (рис. 3);

2) после точения изношенной режущей кромкой значение глубины наклепа находится в диапазоне $0,04 \dots 0,043$ мм (рис. 4).

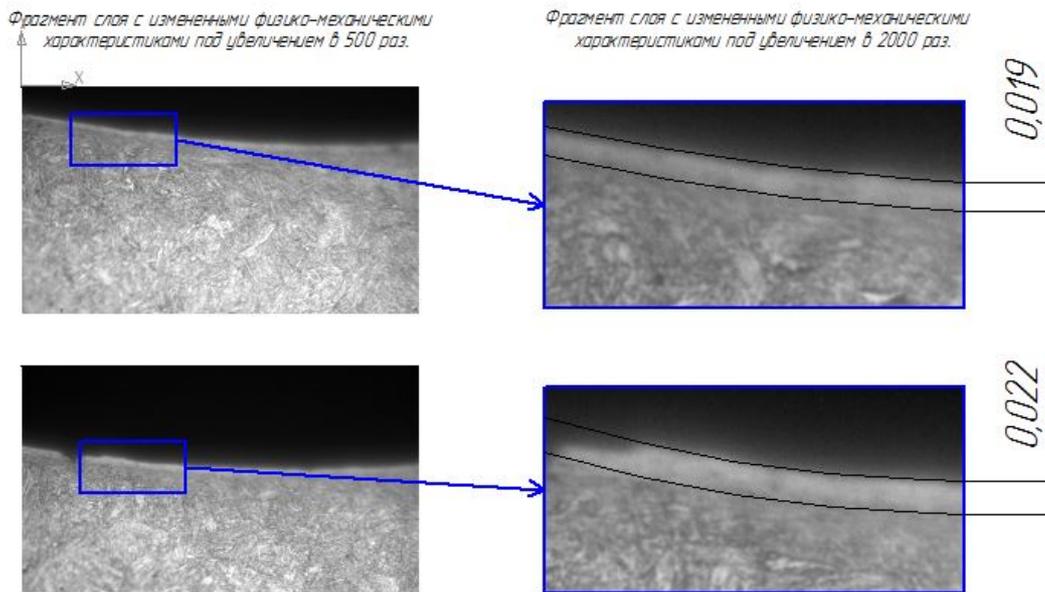


Рис. 3. Фотографии образцов ($\times 500$ и $\times 2000$) с выделенной зоной металла, которая обладает измененными физико-механическими характеристиками после токарной обработки инструментом с не изношенной режущей кромкой

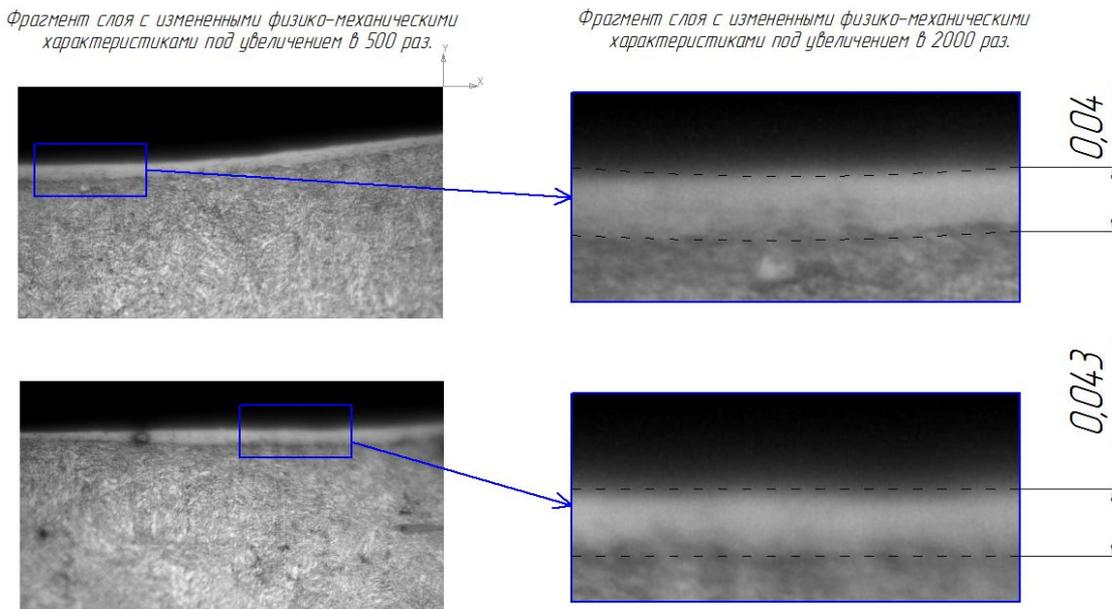


Рис. 4. Фотографии образцов ($\times 500$ и $\times 2000$) с выделенной зоной металла, которая обладает измененными физико-механическими характеристиками после токарной обработки инструментом с изношенной режущей кромкой

Из этого следует, что при прочих равных режимах и условиях обработки изменение силы резания за счет изнашивания инструмента, колебаний припуска, структуры и твердости материала детали влечет за собой изменение глубины наклепа. В рассмотренном случае увеличение силы резания за счет износа инструмента повлекло за собой увеличение глубины деформированного слоя почти в 2 раза. В этой связи, адаптивное управление по величине силы резания позволяет обеспечить стабильность физико-механических характеристик поверхностного слоя обработанных деталей.

В дальнейшем было выполнено исследование поверхностной микротвердости, глубины и степени наклепа с использованием микротвердомера мод. KB-30S, интегрированного с ПК. В силу неглубокого залегания тонких поверхностных слоев деформированного металла после операций механической лезвийной и абразивной обработки изготавливались косые шлифы, плоскость которых расположена под острым углом к поверхности образца. Для экспериментальных исследований применялись образцы габаритами 27×60×7 мм, содер-

жащие фрагмент окружности наружной поверхности диска Ø 60 мм. На радиусной поверхности образцов выполнялась наклонная лыска 0,57 мм × 5°.

Оценка степени наклепа производилась по следующей методике:

$$U_n = \left(\frac{H_{\mu 0} - H_{\mu \text{исх}}}{H_{\mu \text{исх}}} \right) \times 100, \% \quad (10)$$

где $H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость после обработки; $H_{\mu \text{исх}}$ – исходная микротвердость материала [9].

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о следующем: микротвердость поверхностного слоя образцов, обработанных свежей режущей кромкой, составила 526 HV 0,1, а после обработки изношенным резцом – 549 HV 0,1; степень наклепа обработанной поверхности относительно исходной твердости материала заготовки в соответствии с формулой (10) составляет изношенным резцом около 37 %, а новым – примерно 31 %.

На рис. 5 и 6 приведены результаты, согласно которым после точения новой режущей кромкой глубина наклепа равна 0,026 мм, а после точения изношенной – 0,044 мм.

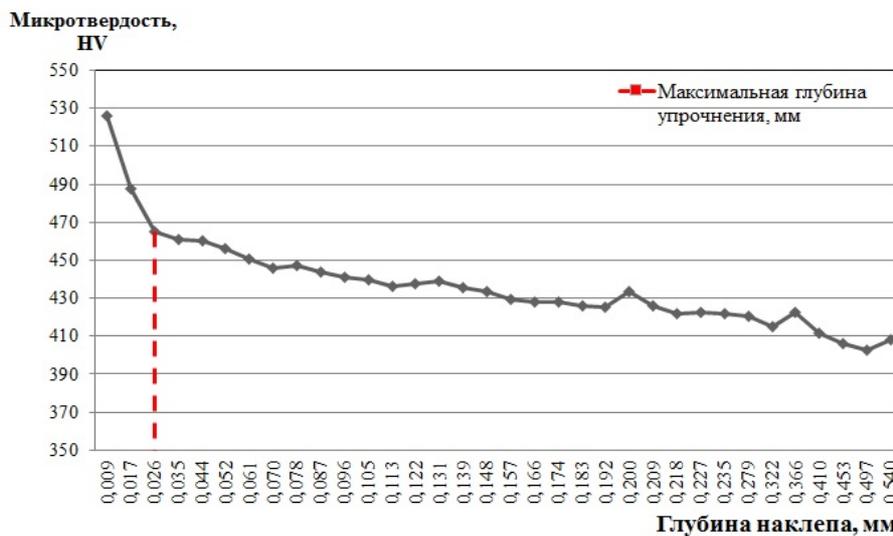


Рис. 5. Распределение микротвердости в поверхностном слое детали, после ее токарной обработки инструментом с не изношенной режущей кромкой

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности адаптивного управления стабильностью деформированного состояния поверхностного слоя обработанных деталей по величине силы резания. При прочих равных режимах и условиях обработки в экспериментах смоделировано изнашивание режущего инструмента, существующее при механической обработке наряду с колебаниями припуска, твердости и структуры материала

заготовки. Увеличение силы резания в приведенном примере способствует росту глубины наклепа в 2 раза. При этом экспериментальные значения, полученные при измерениях на микроскопе мод. МЕТАМ ЛВ-41 (см. рис. 3 и 4) и микротвердомере мод. KB-30S (см. рис. 5 и 6), демонстрируют достаточную близость, что свидетельствует о корректности выбранной методике исследований.

Следует отметить, что экспериментально

полученные значения степени наклепа U_H (31...37 %) лежат в границах (10...50 %), определенных в справочной литературе [7, 9]. Кроме этого, в допустимый справочный диапазон (0,2...0,5 мм) [7, 9, 15] укладываются экспериментально полученные величины глубины наклепанного слоя (0,019...0,044 мм). В этой связи, адаптивное управление процессом

резания по величине действующей силы P_z обеспечивает стабильность упрочненного состояния обработанных поверхностей, что является методом повышения эффективности технологических процессов для производственных систем, использующих автоматизированное оборудование, в частности, для ЦПС.

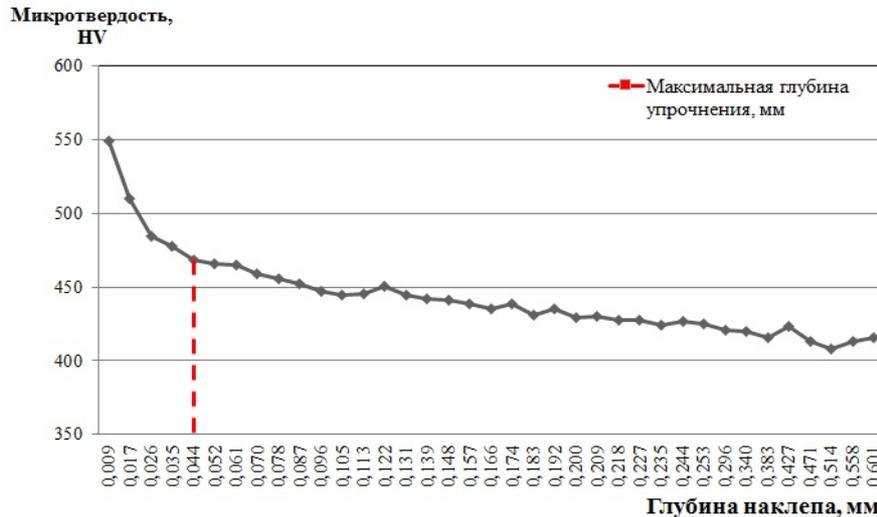


Рис. 6. Распределение микротвердости в поверхностном слое детали, после ее токарной обработки инструментом с изношенной режущей кромкой

Таким образом, разработанные расчетные формулы позволяют определять значения силы резания P_z при точении и фрезеровании и предназначены для технологической подготовки производства и для адаптивного управления автоматизированным оборудованием с ЧПУ в ЦПС для механической обработки. Анализ разработанных математических моделей обнаружил закономерности формирования силы резания, т.е. нагрузки на инструмент, с позиции теории резания и температурно-деформационных закономерностей высокоскоростного пластического деформирования.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность управления стабильностью упрочненного состояния получаемых поверхностей деталей и работы режущего инструмента с помощью разработанных моделей. Описанные модели предназначены для построения элементов ЦПС для механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. Повышение эффективности процессов механообра-

ботки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 184 с.

3. Суслов, А.Г. Технологии обработки заготовок на самообучающихся станках с адаптивным управлением / А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин // Научные технологии в машиностроении / колл. авт.; под. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – С.233-268.

4. Condition monitoring of CNC machining using adaptive control / B. S. Prasad [and other] // International Journal of Automation and Computing. – 2013. – Vol. 10. – P. 202-209.

5. Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process / F. Cus [and other] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 17, iss. 1-2. – P. 237-240.

6. Fuzzycontrol strategy for an adaptive force control in end-milling / U. Zuperl, F.Cus, M. Milfelner // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 164-165. – P. 1472-1478.

7. Справочник технолога/ под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

8. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 2. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 944 с.

9. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

10. **Режимы** резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
11. **Korloy**. Metal cutting tools: catalogue. – South Korea: Korloy Publ., 2017. – P. 1060.
12. **Big Daishowa**. High precision toolholders: catalogue. – Japan: Big Daishowa Seiki Ltd., 2016. – P. 324.
13. **Ингеманссон, А.Р., Бондарев, А.А.** Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 12(102). – С.28-35.
14. **Талантов, Н.В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
15. **Технологическая** наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: МАИ, 2000. – 364 с.

REFERENCES

1. Starkov, V.K. *Physics and Material Cutting Optimization*. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 640.
2. *Machining effectiveness increase based on approaches of artificial intelligence and non-linear dynamics* / Yu.G. Kabbaldin [et al.]. – М.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2018. – pp. 184.
3. Suslov, A.G. *Workpiece processing technologies on self-trained machines with adaptive control* / A.G. Suslov, D.E. Petreshin // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / author's group under the editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 233-268.
4. *Condition monitoring of CNC machining using adaptive control* / B. S. Prasad [and other] // *International Journal of Automation and Computing*. – 2013. – Vol. 10. – P. 202-209.

5. *Adaptive controller design for feed rate maximization of machining process* / F. Cus [and other] // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2006. – Vol. 17, iss. 1-2. – P. 237-240.

6. *Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling* / U. Zuperl, F.Cus, M. Milfelner // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164-165. – P. 1472-1478.

7. *Technologist's Reference Book* / under of general editorship of A.G. Suslov. – М.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.

8. *Technologist-Mechanician's*: in 2 Vol., Vol.2. / under the editorship of A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov. – 5-th edition revised and supplemented. – М.: Mechanical Engineering-1, 2001. – pp. 944.

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

10. *Cutting Modes for Hard-to-Machine Materials: Reference Book* / Ya.L. Gurevich [et al.]. – 2-d edition revised and supplemented. – М.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 240.

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

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

13. Ingemansson, A.R., Bondarev A.A. *Calculation procedure for definition of heat conductivity of modern multi-layer hard-alloy tools* // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.12 (102). – pp. 28-35.

14. Talantov, N.F. *Physical Fundamentals of Cutting, Tool Wear and Destruction*. – М.: Mechanical Engineering, 1992. – pp. 240.

15. *Technological Inheritance in Engineering Production* / A.M. Dalsky, B.M. Bazrov, A.S. Vasiliev [et al.]; under the editorship of A.M. Dalsky. – М.: МАИ, 2000. – pp. 364.

Рецензент д.т.н. Г.А. Сухочев

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

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 17.04.2020. Выход в свет 30.04.2020.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+