



Обзорная статья
УДК 621.914
doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39

Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки

Александр Леонтьевич Плотников¹, д.т.н., **Юлий Львович Чигиринский²**, д.т.н.,
Жанна Сергеевна Тихонова³, к.т.н., **Евгений Михайлович Фролов⁴**, к.т.н.,
Дмитрий Вадимович Крайнев⁵, к.т.н.

^{1,2,3,4,5} Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

¹plotnikov.alexander1939@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2825-8586>

²Julio-Tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

³tikhonovazhs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5047-0244>

⁴eltar1983@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-5910>

⁵krainevdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

***Аннотация.** На примере токарной обработки рассмотрена проблема определения надёжных значений базового параметра – скорости резания при работе станков с ЧПУ. Указано на необходимость предварительного диагностирования свойств контактных пар, как способа обеспечения надёжности протекания процесса резания в условиях неопределённости их физико-механических свойств. Рассмотрен вариант выбора режимов обработки автоматизированным путём.*

***Ключевые слова:** точность расчёта, контактная пара, пробный проход, надёжность процесса резания, термо-э.д.с.*

***Для цитирования:** Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Тихонова Ж.С., Фролов Е.М., Крайнев Д.В. Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 32-39. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39.*

Review article

Training of CNC system for solving a process task of ranging reliable values of metalworking operation parameters

Alexander L. Plotnikov¹, Dr. Sc. Tech., **Yulius L. Tchigirinsky²**, Dr. Sc. Tech., **Zhanna S. Tikhonova³**, Can. Sc. Tech.,
Evgeny M. Frolov⁴, Can. Sc. Tech., **Dmitriy V. Kraynev⁵**, Can. Sc. Tech.

^{1,2,3,4,5} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹plotnikov.alexander1939@yandex.ru, ²Julio-Tchigirinsky@yandex.ru,

³tikhonovazhs@gmail.com, ⁴eltar1983@yandex.ru, ⁵krainevdv@mail.ru

***Annotation.** As in the case of lathe machining, the problem of determining reliable values of the basic parameter such as cutting speed when working with CNC machines has been viewed. The necessity of preliminary diagnostics of contact pairs characteristics as a means of cutting process reliability control under conditions of indeterminacy of their physical and mechanical properties is indicated. The selection of processing conditions with autoatically-controlled method is described.*

***Keywords:** computational accuracy, contact pair, test run, reliability control of the cutting process, thermo-emf.*

***For citation:** Plotnikov A.L., Tchigirinsky Yu.L., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M., Krainev D.V. Training of CNC system for solving a process task of ranging reliable values of metalworking operation parameters. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.3 (129), pp. 32-39. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39.*

На вопрос, вынесенный в заголовок статьи, может быть дан такой ответ: сначала мы сами должны научиться определять наиболее выгодные, надёжные режимы обработки и только потом «учить» систему ЧПУ. Ни для первого, ни для второго этапа проблема окончательно ещё не решена.

Сравнительный анализ технологических возможностей каждого нового поколения систем ЧПУ, как отечественных, так и зарубежных, за последние 50 лет на примере токарной обработки показал, что уровень автоматизированного решения геометрических задач формообразования деталей программным (автоматизированным) путём в отечественных и зарубежных системах ЧПУ высокий, что свидетельствует об изученности и достаточной проработке методик решения этих задач.

В тоже время, уровень решения технологических задач управления в системах ЧПУ пока ещё низкий. Это относится, прежде всего, к возможности определения программным путём самой системой ЧПУ надёжных значений параметров процесса металлообработки таких как скорость резания, составляющих силы резания, показателей качества обработки, показателей точности и ряда других величин. Под надёжностью выбранных режимов обработки будем принимать совпадение их расчётных значений с действительными в пределах установленного допуска.

Анализ состояния вопроса показывает, что справочники технолога-машиностроителя ранних лет и справочники, изданные в 21 веке, содержат математические модели расчёта всех (или почти всех) параметров металлообработки. Казалось бы, бери калькулятор, считай, составляй алгоритм автоматизированного расчёта, привлекай искусственный интеллект, учи систему ЧПУ «думать». И вот здесь стоит задуматься самим: почему математические модели определения параметров процесса резания давно известны, а алгоритмов автоматизированного (программного) расчёта их на сегодняшний день в системах ЧПУ нет? Не хватает вычислительных возможностей? Нет, их в современных системах ЧПУ, построенных на базе мощных компьютеров, в избытке.

Проблема использования существующих математических моделей для выбора на первом этапе рациональных, а затем и оптимальных условий обработки состоит в том, что многие из них неадекватно отражают влияние

изменяющихся условий обработки и взаимосвязи многих факторов на количественные значения расчётных величин в диапазоне высоких скоростей резания, применяемых для твёрдосплавных инструментов (60...300 м/мин и более). При неизбежном, но допустимом по техническим условиям изготовления диапазоне разброса свойств со стороны сталей и особенно инструмента, они дают большую погрешность, достигающую двукратного иногда и более значения. При наличии такой погрешности говорить о возможности обеспечения надёжности расчёта или оптимизации процесса резания на основе этих моделей не приходится.

О проблематичности применения существующих методик расчета режимов резания для автоматизированного станочного оборудования указано в работе Горанского Г. К. с соавторами [1], где подчёркнуто, что «определение оптимальных режимов резания затрудняется в связи с отсутствием достоверных сведений о значении многочисленных физических констант, показателей степеней и коэффициентов, входящих в расчётные формулы определения элементов режима резания...».

Подураев В.Н. в монографии [2] отмечает, что «в широко известных эмпирических зависимостях значения показателей степеней и коэффициентов достаточно точны для тех условий обработки, в которых они были определены. В первую очередь эти недостатки проявляются при рационализации процессов резания на станках с программным управлением и адаптивными системами, при использовании ЭВМ для оптимизации процесса обработки».

Якобс Г. Ю., Якоб Э., Кохан Д. в работе [3] указывают, что используемые в настоящее время справочные данные для выбора скорости резания, подачи и глубины резания, взятые из различных источников для идентичных условий резания, сильно отличаются друг от друга и не позволяют обоснованно назначать способ обработки.

Можно возразить, что эти работы были опубликованы 40...50 лет тому назад, что они устарели и не отражают современного состояния дел в металлообработке. Однако в статье [4] авторы ещё раз подтвердили ранее установленный факт, что расчёт скорости резания для одинаковых условий токарной обработки с использованием различных справочников приводит к полутора-двукратному

расхождению её значений. Для справочной инженерной литературы это своего рода «нон-сенс», вносящий неопределённость при выборе источника расчёта и построения алгоритма их автоматизированного выбора.

Сегодня в металлообработке мы имеем обилие марочного состава сталей и такое же обилие марочного состава твёрдосплавных инструментов. И здесь мы сталкиваемся с проявлением металлургической аксиомы: чем сложнее химический состав сталей, тем больше диапазон разброса их физико-механических свойств. Со стороны твёрдосплавных инструментов «против нас» действует материаловедческий фактор неоднородности свойств кобальтовой связки. Он проявляется в том, что связующая кобальтовая фаза всех без исключения марок, в том числе и сплавов с покрытием, представляет собой твёрдый раствор вольфрама и углерода в кобальте с ограниченным интервалом концентрацией. Это связано с природой образования твёрдых растворов из-за различия атомных радиусов составляющих их элементов. Атомный радиус вольфрама равен 1,4 ангстрема, у кобальта он равен 1,25. Растворимость вольфрама в кобальтовой связке в процессе спекания зависит от содержания углерода в сплаве и лежит в интервале 2...20 %, что и определяет различное качество кобальтовой связки, её фазовый состав и режущие свойства твёрдосплавного инструмента внутри его марки.

Третьяковым В. И. в работе [5] на примере рассмотрения свойств сплава ВК10 приведены границы существования трех разных по фазовому и химическому составу областей кобальтовой связки, определяющие режущие свойства сплава.

Наилучшими режущими свойствами обладает двухфазная область кобальтовой связки ($WC+\gamma$). Это раствор вольфрама и углерода в кобальте, содержащий примерно от 17 до 5 % растворённого в связке вольфрама без дополнительной η_1 -фазы (её наличие не допускается по ТУ из-за повышенной хрупкости твёрдого сплава) и дополнительной фазы графита.

Трёхфазная область ($WC+\gamma+C$) – раствор, содержащий около 2...4 % вольфрама в кобальтовой связке, и содержащая свободный графит (сажу). Это допускаемая по ТУ область с пониженными режущими свойствами. При точении сталей это менее работоспособный, а значит и менее надёжный, инструмент по причине низкого качества связки. Но, со-

гласно ТУ, это не брак.

Трёхфазный сплав с содержанием графита не следовало бы применять при обработке стальных заготовок на станках с ЧПУ, где он проявляет себя как «самое слабое» звено технологического процесса. Особенность технологического процесса спекания твёрдосплавных режущих пластин состоит в том, что очень узкие по допустимому содержанию углерода области, составляющие десятые доли процента (0,1...0,5 %) приводят к широкому пределу изменения физико-механических свойств кобальтовой связки и режущих свойств сплава в целом.

При выборе марки инструмента на этапе проектирования процесса токарной обработки технолог-программист ориентирован на некое «среднее» качество связки и «средние» режущие способности марки твёрдого сплава. Высокие они, низкие или средние, оператор-станочник узнаёт после запуска техпроцесса в работу. Корректировать расчётные значения техпроцесса (в основном скорость резания) у цехового технолога нет возможности, это вынужден делать оператор-станочник. Он и делает это, используя свой опыт или интуицию, или какие-то известные ему сопутствующие эффекты процесса резания. То есть между разработчиком и исполнителем технологического процесса сложился вполне приемлемый компромисс из-за неопределённости входных данных о состоянии инструмента и стальной заготовки. У этого подхода к обеспечению надёжности протекания процесса резания есть существенный недостаток – субъективизм каждого оператора при оценке состояния контактной пары и нахождение рациональных режимов обработки методом «проб и ошибок».

В поисках ответа на вопрос – почему в наш, компьютерный век в системах ЧПУ металлообрабатывающими станками не используются ранее полученные математические зависимости для выбора оптимальных (рациональных) режимов резания мы указали на неадекватность расчётных моделей и что это проявляется в значительном несовпадении расчётных и фактических значений величин параметров процесса резания. Рассмотрим это на примере определения такого важного параметра как скорость резания при заранее известных значениях глубины резания, подачи и заданной стойкости для условий токарной обработки углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей с использованием математи-

ческой модели, приведенной в справочной литературе [6].

Как известно, для расчёта скорости резания применяют два основных подхода: использование аналитических зависимостей и использование табличного способа расчёта. Их математические модели могли бы служить основой для построения алгоритмов автоматизированного расчёта этой важной величины процесса резания. Однако эти два способа дают между собой значительное (до 60...90 %) расхождение в результатах расчёта скорости резания для одних и тех же условий обработки, что вносит неопределённость при выборе источника расчёта.

Остановимся на аналитической модели расчёта, которая учитывает большее количество факторов, влияющих на конечный результат расчёта. Расчёт скорости резания при токарной обработке ведётся по зависимости (1):

$$v = \frac{C_v}{T^{m_t} x^m y^y} K_v, \quad (1)$$

где C_v – безразмерный коэффициент; T – задаваемая стойкость, мин; m , x , y – показатели степени; K_v – результирующий поправочный коэффициент, равный произведению ряда поправочных коэффициентов, которые учитывают следующее: K_φ – изменение главного угла резца в плане φ ; $K_{\varphi 1}$ – изменение вспомогательного угла резца в плане φ_1 ; K_r – радиус при вершине резца r ; $K_{И}$ – марку (режущие свойства) инструментального материала; K_M – механические свойства обрабатываемого материала.

В свою очередь, поправочный коэффициент на механические свойства обрабатываемых сталей K_{MV} определяется по выражению:

$$K_{MV} = K_r \cdot \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{n_v}, \quad (2)$$

где K_r – коэффициент обрабатываемости группы сталей; n_v – показатель степени (при использовании твёрдосплавного инструмента принимается равным единице); σ_b – временное сопротивление материала заготовки, МПа.

Какие величины, определяющие надёжность выбора скорости резания при токарной обработке сталей в аналитической модели расчёта (1), могут вносить значительные погрешности в конечный результат? Таких значащих величин несколько:

1) скоростной безразмерный коэффициент C_v , рекомендованные значения которого различны в разных справочниках;

2) поправочный коэффициент $K_{И}$, характеризующий режущие свойства инструментального твёрдосплавного материала. Значения коэффициента $K_{И}$ во всех справочниках по расчёту режимов резания для каждой марки твёрдого сплава приняты постоянными. То есть, в справочниках принято условие, что режущие свойства твёрдосплавного инструмента внутри его марочного состава имеют постоянное значение. Это входит в противоречие с техническими условиями на изготовление твёрдосплавного инструмента (ОСТ-48-99-84), которые допускают изменение режущих свойств внутри каждой марки при переходе от двухфазного состава кобальтовой связки к фазе с содержанием графита в среднем в два раза. Ещё раз подчеркнём, что различие твёрдого сплава по фазовому составу (неоднородность) неизбежный металлургический фактор, который влияет на надёжность протекания процесса резания, но не учитывается в существующих методиках назначения скорости резания.

3) Поправочный коэффициент на механические свойства обрабатываемых сталей K_{MV} . Его значение рекомендовано определять по выражению (2) на основе выборочных лабораторных или цеховых испытаний образцов сталей на разрыв. Мероприятие длительное по времени, трудоёмкое, но в то же время, не дающее гарантии, что результаты выборочных механических испытаний принадлежат всей партии поставки. Как правило, такие испытания проводят при обработке ответственных или особо-ответственных деталей. В остальных случаях разработчики технологического процесса используют данные, взятые из справочников, с их ориентацией на среднее значение прочностных свойств сталей.

Здесь следует иметь в виду, что, хотя диапазон допуска на механические характеристики углеродистых, конструкционных и малолегированных сталей составляет $\pm 10...12\%$, их обрабатываемость колеблется в значительно больших пределах.

Вульф А. М. [7] указывает, что нестабильность физико-механических свойств одной и той же марки стали наблюдается тем больше, чем сложнее её состав. В работе показано, что обрабатываемость металла, выражаемая количеством обработанных деталей до наступле-

ния предельной величины износа инструмента, колебалась для одной плавки в пределах 20 %, а средний разброс стойкости инструмента при обработке заготовок разных плавок выражался отношением 4:1 при постоянных условиях резания.

В целом по зависимости (1) отсутствие возможности учёта разброса режущих свойств твёрдосплавного инструмента и разброса обрабатываемости сталей в партиях поставки приводит к значительному расхождению фактического периода стойкости инструмента с заданным, что не позволяет считать модель расчёта адекватной.

Особо следует остановиться на вероятностном характере сочетания свойств контактных пар «твёрдосплавный инструмент – стальная заготовка». Разброс режущих свойств твёрдосплавных пластин и обрабатываемости сталей может носить случайный характер и подчиняться различным законам распределения (например, нормальному). Контактная пара «твёрдосплавный инструмент – стальная заготовка» в процессе металлообработки «собирается» случайным образом, а сочетание её физико-механических свойств определяют характер контактных процессов и численную величину параметров процесса резания. При этом возникают критические ситуации, при которых стальная заготовка из партии поставки, обладающая худшей обрабатываемостью сочетается с твёрдосплавным инструментом, обладающим низкими режущими свойствами, что оборачивается простоем оборудования по причине преждевременного износа инструмента.

В статье [8] описан механизм влияния фазового состава твёрдосплавного инструмента на интенсивность его износа. У трёхфазного сплава с содержанием графита кобальтовая связка слабо легирована вольфрамом. В процессе обработки стальной заготовки на скоростях резания выше зоны наростообразования в условиях преобладающего диффузионного износа железо интенсивно проникает в кобальтовую связку, слабо легированную вольфрамом, увеличивает в них растягивающие напряжения и интенсивно разупрочняет связку. В то же время из этих сплавов углерод глубже проникает в приграничные объёмы стружки и в большей степени легирует их, что приводит к увеличению касательных напряжений и способствует большей интенсивности вырыва и уноса отдельных зерен карбидов из разупрочнённой связки. Для двухфазных

сплавов эти явления проявляются в значительно меньшей степени, что и обеспечивает их лучшие режущие свойства.

Методика проектирования технологического процесса с использованием существующей расчётной модели скорости резания (1) не представляет возможности учитывать фазовый состав твёрдосплавного инструмента и допустимый разброс физико-механических характеристик обрабатываемых сталей. Ориентация на постоянство поправочных коэффициентов внутри определённой марки стали и твёрдого сплава приводит к тому, что фактическое отклонение периода стойкости от заданного достигает 50...100 %.

Отсюда следует вывод – модель определения скорости резания, которая могла бы использоваться для построения алгоритма её автоматизированного (программного) расчёта в системах ЧПУ, как в современных, так и в перспективных, наделённых искусственным интеллектом, должна дополнительно содержать оперативную информацию о теплофизических свойствах сменных контактных пар.

Этот вывод лежит в русле выдвинутой в работе Старкова В. К. [9] концепции обеспечения надёжности выбора параметров процесса резания на основе получения предварительной информации о свойствах каждого резца и свойствах каждой стальной заготовки. В этом случае, предпочтительным выглядел бы предварительный неразрушающий контроль свойств каждой контактной пары на станке, результаты которого можно было бы использовать для автоматизированного (программного) расчёта режимной части управляющих программ станков с ЧПУ, т.е. научить систему ЧПУ умению «думать» и выбирать наиболее выгодные режимы обработки.

Как же можно, хотя бы поэтапно, научить систему ЧПУ «думать» при решении технологических задач и добиваться успехов в «искусстве резать металлы». Алгоритм обучения определён – научиться самим грамотно решать конкретную технологическую задачу с учётом состояния инструмента и заготовки, а затем подключать искусственный интеллект. Одно из направлений обучения также определено – это предварительное получение информации о теплофизических свойствах каждой сменной контактной пары неразрушающим способом, непосредственно у станка и затем использование этой информации для обеспечения точности расчёта режимов обработки и обеспечения надёжности самого про-

цесса резания.

Реализация выдвинутой концепции ставит задачу разработки (отыскания) и использования в условиях работы станка такого способа, который позволяет получить комплексную информацию о теплофизических свойствах контактной пары «твёрдосплавный инструмент – стальная заготовка», что, в свою очередь, способствовало бы обеспечению стабильности и качества протекания процесса в оптимальных условиях.

Необходимость иметь предварительную информацию о теплофизических свойствах каждой контактной пары связана с тем, что при обработке сталей на высоких скоростях (выше зоны наростообразования), когда происходит смена вида контактного взаимодействия и внешнее трение заменяется внутренним, температура в зоне резания (тепловыделение и теплораспределение) оказывает решающее влияние на контактные характеристики процесса резания, его надёжность.

Тепловыделение и теплораспределение в зоне резания взаимосвязаны с теплопроводностью инструментального и обрабатываемого материала по зависимости: чем выше их теплопроводность, тем больше длина полного контакта, больше силовые нагрузки, выше интенсивность диффузионных процессов, выше интенсивность износа инструмента.

Комплексная предварительная оценка теплофизических свойств контактной пары – это получение оперативной информации о химическом, фазовом составе, структуре стали, её теплопроводности и получение такой же информации о свойствах инструмента непосредственно у станка до начала осуществления рабочего процесса. Анализ существующих способов контроля свойств контактной пары показал, что для этого можно использовать всегда сопутствующие процессу резания эффекты: акустический, виброакустический, термоэлектрический, дающие возможность вести 100 %-ный контроль сочетания свойств контактных пар из всего допустимого диапазона разброса.

Первые два способа контроля, акустический и виброакустический, бесконтактные, что является их преимуществом перед термоэлектрическим, но они требуют применения специальной аппаратуры и специальной методики расшифровки и преобразования сигнала и предназначены для контроля состояния инструмента в процессе резания.

Известным, доступным, не требующим специальной аппаратуры для преобразования сигнала, является способ использования всегда сопутствующего электрического сигнала естественной термопары «инструмент – стальная заготовка» в режиме кратковременного (4...5 с) пробного прохода на определенных и всегда постоянных режимах обработки для всех сменных контактных пар ($v = 100$ м/мин; $s = 0,1$ мм/об; $t = 1$ мм) с измерением и запоминанием возникающей термо-э.д.с., которая затем вводится в структуру модели расчёта параметра процесса резания [10].

Физической основой разработок является способность контактной составляющей термо-э.д.с. пробного прохода нести информацию о разности электрохимического потенциала контактных пар через разность работ выхода электронов из стали и твёрдосплавного инструмента, которая чувствительна к объёмным изменениям в сплавах при изменении состава, структуры и образования новых фаз. Работа выхода отражает, наряду с другими свойствами металлов (плотностью, температурой плавления, модулем упругости, электропроводностью, теплопроводностью) силу межатомной связи. В предложенном способе величина термо-э.д.с. пробного прохода используется не как традиционная информация о температуре резания, а как информация о теплофизических свойствах сменных контактных пар при обработке сталей твёрдосплавным инструментом.

Новизной в предлагаемой методике расчёта допустимой скорости резания для стадий черновой, получистовой и стадии тонкого чистового точения, является то, что значения скоростного коэффициента C_v определяются не на основе рекомендаций справочно-нормативной литературы, а на основе измерения термоэлектрических свойств конкретной пары «сталь-твёрдый сплав» программным путем. Расчёту допустимой скорости резания предшествует операция пробного резания, т.е. предварительно обрабатывают металл (стальную заготовку) и измеряют термо-э.д.с. в паре «инструмент-деталь» и по величине термо-э.д.с. данной пары и рабочим параметром технологического процесса (T , s , t) определяют допустимую скорость резания по следующей формуле:

$$V = \frac{A - kE}{T^{0,2} \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}}, \quad (3)$$

где E – термо-э.д.с. пары «твёрдосплавный инструмент – обрабатываемый металл», мВ; A – постоянная, $A = 202$ при черновом точении, $A = 378$ при получистовом и чистовом, $A = 239$ при тонком чистовом точении; K – коэффициент, равный для стадий черновой обработки 1,8; для получистовой и чистовой 16,2 и для тонкого чистового точения 6,0, соответственно.

Использование в предлагаемом способе определения допустимой скорости резания термо-э.д.с. пары «инструмент – обрабатываемый металл», как информации о теплофизических свойствах контактных пар повышает точность расчёта скорости резания. Ошибка расчёта не превышает 10...12 % в то время как ошибка расчёта по существующей модели лежит в интервале 50...110 %.

Новизна предложенной формулы (3) по сравнению с существующей (1) проявляется ещё и в том, что она позволяет решить как прямую задачу выбора надёжного значения скорости резания, так и обратную, т.е., по выбранной скорости резания, принятым величинам подачи, глубины резания и величине термо-э.д.с. пробного прохода определять (прогнозировать) время работы резца до допустимого износа. Преобразованная модель определения (прогнозирования) периода стойкости T инструмента при токарной отработке сталей с учётом дополнительно введённого оперативного параметра термо-э.д.с. пробного прохода выглядит следующим образом:

$$T = \left(\frac{A - kE}{v \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}} \right)^5 \quad (4)$$

Использование расчётной модели (4) для прогнозирования периода стойкости T стало возможным после того, как в структуру предложенной модели скорости резания (3) был введён дополнительный параметр, характеризующий теплофизические свойства сменных контактных пар.

На основе предложенных моделей (3) и (4) были разработаны алгоритмы определения режимов резания и прогнозирования стойкости инструмента автоматизированным (программным) путём. Полученные значения через последовательный порт RS232 были введены в систему ЧПУ токарного станка *Okuma Genos L300-M* для решения технологических задач управления при обработке стали 40X твёрдосплавным инструментом T5K10, что показало

возможности расширения круга решаемых задач.

Возможность прогнозирования ресурса работоспособности резца перед началом его эксплуатации на основе использования расчётной модели (4) это пример развития интеллектуальных способностей систем ЧПУ в плане того, как обеспечить надёжность процесса резания и научить систему решать технологические задачи. Сегодня становится очевидным, что наращивание интеллектуальных возможностей систем ЧПУ при решении технологических задач управления напрямую связано с получением предварительной информации о теплофизических свойствах контактных пар доступным для заводской практики способом, а это может вывести системы управления на новую, более высокую ступень.

Выводы

1. Подтверждено, что причиной больших погрешностей расчёта скорости резания по аналитической модели является отсутствие в её структуре оперативного учёта теплофизических свойств случайно собранных на станке сменных контактных пар «твёрдосплавный инструмент – стальная заготовка» и ориентация модели на использование поправочных коэффициентов, представляющих среднее значение их свойств из неизбежного, но допустимого диапазона разброса.

2. Показано, что введение в модель расчёта дополнительной информации о теплофизических свойствах контактных пар обеспечивает точность расчёта в пределах обоснованного допуска и позволяет системе ЧПУ станка назначать наиболее выгодные режимы обработки, переводя её в разряд «думающей системы», способной решать технологические задачи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров и др. / М.: Машиностроение, 1970. – 224 с.

2. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

3. Якобс, Г.Ю., Якоб, Э., Кохан, Д. Оптимизация резания: Параметризация способов обработки резанием с использованием технологии оптимизации. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

4. Плотников, А.Л., Сергеев, А.С., Уварова, Т.В., Бровкин, И.И. Проблемы обеспечения точности расчёта скорости резания и силы резания при проектировании технологического процесса токарной обработки сталей и пути их решения // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. – Волгоград, 2016. – №8 (187). – С. 41-46.

5. Третяков, В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1976. – 527 с.

6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова – 5-е изд. исправленное – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с.

7. Вульф, А.М. Резание металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.

8. Плотников, А.Л., Сергеев, А.С., Тихонова, Ж.С., Уварова, Т.В. Вероятностная природа образования контактных пар при металлообработке и её влияние на надёжность процесса // Вестник машиностроения. – 2018. – №4. – С. 48-54.

9. Старков, В.К. Физика и оптимизация режимов резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

10. Пат. 2063307 Россия, С1 6 В 23 В 25/06. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твёрдосплавным инструментом / А.Л. Плотников. – Заявка № 94010673/08 от 29.03.94. – Оpubл. Бюл. №19 от 10.07.96

REFERENCES

1. Computer -aided automatisatoin of technical rate setting for metal-cutting machines operation. /G.K. Goransky, E.V. Vladimirov et. al., Moscow: Mashinostroenie, 1970, 224 p.

2. Poduraev V.N. Avtomaticheskii reguliruemye i kombinirovannye protsessy rezaniya [Automatically adjusted and

combined cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 304 p. (in Russian).

3. Jacobs, G.Yu., Jacob, E., Kohan, D. Optimizatsiya rezaniya. Parametrizatsiya sposobov obrabotki rezaniem s ispol'zovaniem tekhnologicheskoi optimizatsii [Parameterization of Cutting Methods by Technological Optimization], Moscow: Mashinostroenie, 1981, 279 p. (in Russian).

4. Plotnikov, A.L., Sergeev, A.S., Uvarova, T.V., Brovkin, I.I. Problems of the assurance of cutting speed and force computational accuracy in the technological process design for lathe machining of steel and ways to solve them. / Izvestia VolgSTU, issue: Progressive technologies in mechanical engineering, Volgograd, 2016, no. 8 (187), pp. 41-46.

5. Tret'yakov, V.I. Osnovy metallovedeniya i tehnologii proizvodstva spechennykh tverdykh splyavov. [Fundamentals of physical metallurgy and production technology of sintered hard alloys], 2nd ed., updated and revised, Moscow: Metallurgiya, 1976, 527 p. (in Russ).

6. Reference book of a mechanic engineer-technologist in 2 volumes, vol. 1, ed. by A.M. Dalsky, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakova, A.G. Suslov, 5th edition, revised, Moscow: Mashinostroenie, 2003, 912 p.

7. Wolf, A.M. Metal cutting, 2nd ed., reprinted and enlarged, Leningrad: Machinostroenie, 1973, 496 p.

8. Plotnikov, A.L., Sergeev, A.S., Tikhonova, Zh.S., Uvarova, T.V. Probabilistic nature of the contact pair formation in metalworking and its influence on process reliability. /Bulletin of Machine Building, 2018, no. 4, pp. 48-54.

9. Starkov, V.K. Physics and optimization of cutting modes of materials. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 640 p.

10. Pat. 2063307 the RF, C1 6 V 23 V 25/06. A method for determining the permissible cutting speed when machining a part with a carbide tool / A.L. Plotnikov. - Application No. 94010673/08 dated from 29.03.94, publ. bul. no. 19 dated from 10.07.96.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.12.2021; одобрена после рецензирования 24.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 05.12.2021; approved after reviewing 24.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.