

А. Л. Плотников, Ж. С. Тихонова, А. А. Жданов

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ
«ИНСТРУМЕНТ – СТАЛЬНАЯ ЗАГОТОВКА» И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tikhonovazhs@gmail.com

Проведен анализ методов оценки свойств контактных пар «твердосплавный инструмент – стальная заготовка» с целью использования их для повышения надежности выбора режимов токарной обработки в поколениях систем ЧПУ, оснащенных техническим интеллектом. Скорректированы модели расчета скорости резания, составляющих силы резания, величины шероховатости Ra путем введением в их структуру дополнительной информативной величины о свойствах каждой контактной пары – термоЭДС пробного прохода.

Ключевые слова: точность расчета, свойства контактных пар, пробный проход, термоЭДС, надежность процесса резания.

A. L. Plotnikov, Zh. S. Tikhonova, A. A. Zhdanov

**METHODS FOR ESTIMATING THERMOPHYSICAL PROPERTIES
OF THE "TOOL - STEEL WORKPIECE" CONTACT PAIR AND THE POSSIBILITY
OF THEIR USE IN CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE TURNING PROCESS**

Volgograd State Technical University

The analysis of methods for assessing the properties of contact pairs "hard alloy tool - steel workpiece" with the aim of improving the reliability of the choice of turning modes in generations of CNC systems equipped with technical intelligence. The models for calculating the cutting speed, the cutting force, the value of roughness Ra , have been corrected by introducing into their structure an additional informative value about the properties of each contact pair - the thermoEMF of the trial cut.

Keywords: calculation accuracy, properties of contact pairs, trial cut, thermoEMF, reliability of the cutting process.

Введение

В технической литературе, касающейся методик расчета базовых параметров процесса резания при обработке сталей твердосплавным инструментом, таких как скорость резания, составляющие силы резания, показатели качества и точности обработки указывается, что приня-

тые методики не обладают достаточной точностью расчета и не обеспечивают высокой надежности протекания процесса резания. Ошибки, допускаемые при расчете, порой достигают 50–150 % [1, 2, 3]. Это отрицательно сказывается на производительности процесса резания, приводит к большим потерям времени работы

станка с ЧПУ из-за вынужденной остановки его для неплановой замены инструмента, поиску оператором методом проб и ошибок рациональных условий обработки для выполнения требований, заложенных в технологическом процессе.

Большинство авторов невысокую надежность выбранных режимов связывают с тем, что существующие методики расчета не адекватно отражают взаимосвязанные явления, происходящие в контактной зоне на расчетные величины параметров процесса резания. Они не учитывают вероятностный характер образования контактных пар из всего допустимого диапазона разброса свойств инструмента и стальных заготовок, используя в расчетах среднестатистические (постоянные) значения поправочных коэффициентов и всевозможных констант. В. К. Старков в работе [2] в целях обеспечения выбора надежных режимов обработки выдвигает концепцию, что такие режимы резания могут быть получены только на основе предварительной информации о свойствах каждого резца и каждой стальной заготовки, т. е. на основе оценки свойств каждой контактной пары. Иными словами, В. К. Старков предлагает отказаться от использования понятия «средняя температура по больнице» при лечении больных и пользоваться индивидуальной информацией о температуре каждого больного. Авторы статьи привели этот, в гротесковой форме пример, для описания ситуации с выбором надежных значений параметров процесса металлообработки, когда имеем дело с неизбежным, но допустимым по техническим условиям изготовления, диапазоне разброса режущих свойств инструмента ($\pm 50\%$) [4] и разбросе физико-механических свойств обрабатываемых сталей (около $\pm 10\%$) [5]. Эта неизбежность связана с особенностями металлургического производства, продуктом которого являются твердые сплавы и обрабатываемые стали и с закономерностями образования твердых металлических растворов на основе углерода.

Предложенная В. К. Старковым [2] принципиально новая методика расчета параметров процесса металлообработки с привлечением оперативной информации о свойствах каждой, случайно собранной контактной пары основывается на возможности получения такой информации. Располагает ли на сегодняшний день теория и практика металлообработки такими способами неразрушающего контроля

свойств контактных пар, на сколько реально их использование в станочной практике?

Чтобы ответить на эти вопросы проведем анализ методов оценки теплофизических свойств контактной пары «инструмент – стальная заготовка» и возможность их использования при расчете параметров процесса токарной обработки. Оставим вне обзора способы отдельного контроля свойств инструментального материала и свойств обрабатываемых сталей. При несомненной полезности, такой предварительный отдельный контроль не обеспечивает высокий уровень надежности определения параметров процесса резания. Предпочтительнее использовать предварительную или текущую информацию о свойствах каждой контактной пары и на этой основе рассчитывать (корректировать) режимы обработки.

Первое, что надо отметить – промышленно разработанных способов оценки свойств контактных пар «твердосплавный инструмент – стальная заготовка» в практике металлообработки нет. В технической литературе есть описание экспериментальных лабораторных установок на базе токарных станков, где проводились исследования по разработке таких способов (методов) на основе использования сопутствующих процессу резания акустических (виброакустических) и термоэлектрических эффектов.

В работе В. Н. Подураева, А. А. Базарова, А. В. Сибальченко [6] описан метод активного контроля износа инструмента при механической обработке с использованием сигнала акустической эмиссии. В работе В. Л. Заковоротного, И. В. Ладника [7] описана работа системы диагностики состояния процесса обработки на основе виброакустического сигнала из зоны резания. В этих и подобных работах используется информация об акустических (виброакустических) свойствах конкретной контактной пары резец-заготовка с целью прогнозирования износа инструмента и поднастройки режима резания. Следует заметить, что описанные способы получения информации о свойствах контактных пар требуют создания специализированной акустической станции и надежных методик расшифровки сигналов. В этом плане использование термоэлектрического эффекта естественной термопары наиболее доступно и не требует применения дорогостоящего оборудования.

Ю. М. Соломенцев [8], С. В. Васильев [9], использовали величину термоЭДС естествен-

ной термопары для качественной (лучше – хуже) оценки режущих способностей твердосплавных инструментов. В. В. Трусовым [10] разработана система диагностики состояния инструмента по контактной температуре резания с учетом изменяющихся свойств контактных пар. С. Ф. Корндорф, Е. Е. Мельник [11], использовали термоэлектрический эффект естественной термопары для контроля и диагностики состояния режущего твердосплавного инструмента. В указанных выше работах использовалась косвенная оперативная информация о свойствах сменных контактных пар, что обеспечивало повышенную надежность систем управления (контроля) процессом резания. Использование количественных величин акустического сигнала или сигнала термоЭДС для коррекции математических моделей расчета параметров процесса металлообработки рассмотренные выше способы не предусматривали.

Основная часть

Впервые количественная величина термоЭДС естественной термопары, измеренная в условиях кратковременного (4–5 секунд) предварительного пробного прохода была использована для коррекции принятой модели расчета скорости резания и описана в работе [12]. Величина термоЭДС была введена в структуру расчетной модели как дополнительная информация о свойствах контактных пар. Скорректированная формула расчета скорости резания для условий полустойкого точения конструкционных и низколегированных сталей твердосплавными резцами выглядит следующим образом:

$$V = \frac{A - kE}{T^{0,2} \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}} \text{ (м/мин)}. \quad (1)$$

Отличие формулы (1) от рекомендованной справочно-нормативной литературой [13] состоит в том, что постоянное значение скоростного безразмерного коэффициента C_V представлено как функция от термоЭДС пробного прохода, переменная величина которой зависит от физико-механических свойств контактной пары и описывается уравнением прямой:

$$C_V = A - kE, \quad (2)$$

где A – постоянная, определенная из условий стойкостных испытаний, $A = 378$; $k = 16,2$ – угловой коэффициент, E – термоЭДС пробного прохода, T , s , t – соответственно стойкость, подача, глубина резания в формуле (1). Формула (1) была проверена на обеспечение задаваемой стойкости T в диапазоне 15–60 минут, при из-

менении подачи s от 0,2 до 0,5 мм/об, изменении глубины резания t от 1 до 3 мм при наружном продольном точении сталей марок 45, 40Х, 20ХН3А, У7, 18ХГТ, 25ХГТ, ШХ15. резцами марок Т15К6, Т14К8, Т5К10.

Для всех проверенных пар «твердосплавный инструмент – обрабатываемые стали» максимальная ошибка по определению действительной стойкости не превышала 15 %, что может быть принято как приемлимый уровень точности расчета по сравнению с ошибками расчета по существующим методиками (50–150 %).

Пробный проход с измерением величины термоЭДС на строго фиксированных, одинаковых для всех контактных пар режимах токарной обработки ($V = 100$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 1$ мм) это своеобразный тестовый прием. Он позволяет оценить физико-механические свойства случайно собранных на станке сменных контактных пар за счет всегда сопутствующего термоэлектрического эффекта естественной термопары. При этом, величина термоЭДС пробного прохода используется не как информация о температуре резания, а как косвенный показатель свойств контактных пар, составленных из твердосплавного инструмента и обрабатываемой стальной заготовки. Физической основой способа оценки свойств контактных пар является способность контактной составляющей удельной термоЭДС нести информацию о разности работ выхода электронов из стали и твердого сплава [14]. Работа выхода, в свою очередь, чувствительна к объемным изменениям в сплавах при изменении состава, структуры и образования новых фаз [15]. Различная величина термоЭДС пробного прохода отражает изменение физико-механических свойств каждой новой контактной пары.

Еще одна отличительная особенность скорректированной формулы расчета скорости резания (1) по сравнению с существующими проявляется в том, что она позволяет решать, как прямую задачу выбора надежного значения скорости резания, так и обратную. Т. е. по выбранной скорости резания, принятым величинам подачи и глубины резания и величине термо-э.д.с пробного прохода можно определять (прогнозировать) время надежной работы резца по зависимости:

$$T = \left(\frac{A - kE}{V \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}} \right)^5 \text{ (мин)}. \quad (3)$$

Такой прогноз о времени работоспособности резца всегда необходим оператору-станочнику при корректировке режимов реза

Методика получения и использования предварительной информации о свойствах контактных пар с целью повышения точности расчета была проверена при расчете составляющих силы резания. Их точное значение необходимо при расчете стрелы прогиба деталей типа «вал» с целью обеспечения точности обработки, расчете зажимных усилий автоматизированного зажимного патрона и т. п. Формула расчета составляющих силы резания P_x , P_y , P_z взятая из источника [13] выглядит следующим образом:

$$P_{z,y,x} = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot V^{n_p} \cdot K_p \text{ (Н)}, \quad (4)$$

где C_p , x_p , y_p , n_p – коэффициент и показатели степени при глубине резания, подаче и скорости резания; K_p – поправочный коэффициент, представленный как произведение поправок на механические свойства стали и поправок на геометрию инструмента.

Следует подчеркнуть и такую особенность существующих методик определения составляющих силы резания, как отсутствие поправочного коэффициента, учитывающего марку твердого сплава. То есть в существующих методиках принято условие, что, обрабатывая определенную марку стали инструментами из твердосплавных материалов разных марок (при прочих равных условиях) мы получим одинаковую силу резания. Однако практика опровергает эти положения. О влиянии марки твердосплавного инструмента на уровень контактных нагрузок на режущее лезвие отмечено во многих работах и указано на причину: различная теплопроводность, определяющая длину полного контакта стружки и в, конечном итоге, нагрузку на режущее лезвие. Неадекватность расчетной модели приводит к значительным ошибкам расчета, достигающим 100 % и более. Особенно это проявляется при расчете горизонтальных составляющих силы резания.

В скорректированных зависимостях по определению составляющих силы резания при обработке углеродистых и конструкционных сталей, коэффициенты C_{Pz} , C_{Py} , C_{Px} , учитывающие условия резания и свойства контактируемых пар приняты не постоянными, как в справочной литературе, а выражены как переменные от термо-э.д.с. пробного прохода и определены уравнениями: $C_{Pz}=(A_z+k_z \cdot E)$; $C_{Py}=(k_y \cdot E+A_y)$; $C_{Px}=(k_x \cdot E+A_x)$. Введение в модели расчета составляющих силы резания величины термо-э.д.с. пробного прохода повышает точность их определения в условиях существующего разброса физико-механических

и теплофизических свойств со стороны твердого сплава и обрабатываемых сталей. Скорректированные математические зависимости по определению составляющих силы резания выглядят следующим образом [16]:

$$P_z = (A_z + K_z \cdot E) \cdot t^1 \cdot S^{0,75} \cdot V^{-0,15}, \quad (5)$$

$$P_y = (A_y + K_y \cdot E) \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3}, \quad (6)$$

$$P_x = (A_x + K_x \cdot E) \cdot t^1 \cdot S^{0,5} \cdot V^{-0,4}, \quad (7)$$

где A_z , A_y , A_x – постоянные, соответственно равные 320; 300; 360, определенные из условий предварительной обработки; K_z , K_y , K_x – коэффициенты, соответственно равные 5,5; 10; 7.

Использование в скорректированных зависимостях по определению составляющих силы резания значения термоЭДС пробного прохода твердосплавным инструментом по стали, повышает точность определения, т. к. термоЭДС используется как оперативная информация о физико-механических (теплофизических) свойствах контактируемых пар. Точность расчета составляющих силы резания проверялась при обработке заготовок из сталей марок 20, У8А и 45 в условиях полустого точения инструментами марок Т30К4, Т15К6, Т5К10 и ТН20. Погрешность определения составляющих силы резания по скорректированным моделям не превышает 15 %.

Применимость принципиально новой методики была испытана при расчете параметра шероховатости R_a , значение которого закладывается в технологический процесс механической обработки на стадии проектирования. При этом задаваемая величина R_a в условиях полустого и чистового точения углеродистых и конструкционных сталей рассчитывается с учетом влияния скорости резания V , подачи S , переднего угла реза γ и радиуса при вершине реза r по зависимости [13]:

$$R_a = K_0 \frac{S^{K_1} (90 + \gamma)^{K_2}}{r^{K_3} \cdot V^{K_4}} \text{ (мкм)}, \quad (8)$$

где K_1 , K_2 , K_3 , K_4 – степенные коэффициенты, учитывающие влияние технологических величин на параметр шероховатости R_a ; K_0 – безразмерный поправочный коэффициент, меняющий свое значение при смене марки обрабатываемой стали и марки инструмента.

Недостатком приведенной зависимости (8) является то, что она имеет ограниченное применение по маркам обрабатываемых сталей (ст.3; ст.20; ст.45; ст.70) и не учитывает влияние марки инструментального материала на величину R_a , а такое влияние имеется.

Сравнение расчетных значений высоты микронеровностей по формуле (8) и измеренных показало значительные расхождения. Ошибка расчета составляла 70–120 %. При смене марки инструментального материала расхождение достигало двукратной величины.

В целях решения проблемы обеспечения точности расчета значения параметра шероховатости R_a автоматизированным (программным) путем для токарной обработки углеродистых и конструкционных сталей была поставлена задача скорректировать расчетную модель путем введения в ее структуру дополнительной информационной величины о свойствах контактных пар. В качестве такого информационного фактора использовалась величина термо-ЭДС пробного прохода [17]. Скорректированная модель имеет вид:

$$R_a = C_R \frac{S^{0,85} (90 + \gamma)^{0,65}}{r^{0,36} \cdot V^{0,15}} \text{ (мкм)}. \quad (9)$$

Коэффициент C_R предложено определять как функцию от величины термо-э.д.с. пробного прохода для условий получистового точения по зависимости:

$$C_R = 0,474 + 0,11E \quad (10)$$

и для чистового точения:

$$C_R = 0,10 + 0,11E. \quad (11)$$

Введение в расчетную формулу (9) дополнительной информационной величины о свойствах контактных пар позволило снизить величину ошибки расчета R_a до 12–15 %.

Выводы

1. На примере усовершенствования методик расчета скорости резания, составляющих силы резания и расчета величины шероховатости R_a путем введением в структуру моделей расчета дополнительной информативной величины о свойствах каждой контактной пары, экспериментально подтверждена концепция В. К. Старкова о повышении на этой основе надежности выбора режимов обработки.

2. Скорректированные расчетные модели скорости резания (1), прогнозирования стойкости инструмента (3), модели расчета составляющих силы резания (5), (6), (7) и величины шероховатости обработанной поверхности (9) могут быть использованы для построения алгоритмов их автоматизированного расчета в системах ЧПУ с дополнительными потоками информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иноземцев, А. Н.* Оптимизация режима резания с учетом надежности инструмента / А. Н. Иноземцев, С. А. Васин, Н. И. Пасько // СТИН. – 2000. – № 10. – С. 31–3.
2. *Старков, В. К.* Физика и оптимизация режимов резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. *Плесков, В. Г.* Разброс стойкости твердосплавного инструмента / В. К. Старков // РИТМ Машиностроения. – 2018. – № 4. – С. 86–92.
4. *Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент : справочник / В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйманс [и др.].* – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
5. *Вульф, А. М.* Резание металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. М. Вульф. – Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1973. – 496 с.
6. *Подураев, В. Н.* Активный контроль износа инструмента методом акустической эмиссии / В. Н. Подураев, А. А. Базаров, А. В. Сибальченко // Вестник машиностроения. – 1985. – № 4. – С. 14–19.
7. *Заковоротный, В. Л.* Построение информационной модели системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки / В. Л. Заковоротный, И. В. Ладник // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 4. – С. 75–81.
8. *Соломенцев, Ю. М.* Способ определения режущих способностей инструментов. А. С. № 347629 – Б.И. 1971, № 8.
9. *Васильев, С. В.* ТермоЭДС при резании как характеристика качества твердосплавных пластинок / С. В. Васильев // Станки и инструменты. – 1976. – № 5. – С. 27–28.
10. *Трусов, В. В.* Активная диагностика состояния режущего инструмента по контактной температуре резания / В. В. Трусов // Расчет режимов на основе общих закономерностей процесса резания : межвуз. сб. – Ярославль, 1982. – С. 86–95.
11. *Корндорф, С. Ф.* Термоэлектрический метод диагностики режущего инструмента / С. Ф. Корндорф, Е. Е. Мельник // Контроль. Диагностика – 2003. – № 1. – С. 44–46.
12. Пат. 2063307 Россия, С1 В 23 В 25/06. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твердосплавным инструментом / А. Л. Плотников. – Заявка № 94010673/08 от 29.03.94. – Оpubл. Бюл. №19 от 10.07.96.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
14. *Елифанов, Г. И.* Физика твердого тела : учеб. пособие / Г. И. Елифанов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1977. – 288 с.
15. Электрические и эмиссионные свойства сплавов / Е. М. Савицкий, М. В. Буров [и др.]. – М. : Наука, 1978. – 294 с.
16. Пат. № 2120354 Россия, С1 В 23 В 25/06. Способ определения составляющих силы резания на токарных станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, В. В. Еремеев. – № 97116947/20; Заявлено 14.10.97; Бюл. № 29, 1998.
17. Пат. 2492968 РФ, МПК В23В25/06. Способ определения параметра шероховатости на токарных станках с ЧПУ при получистовой и чистовой обработке металла твердосплавным инструментом / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева ; ВолгГТУ. – 2013.