УДК 621.914.22

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО СИГНАЛА ТЕРМОЭДС

А.С. СЕРГЕЕВ, аспирант,
Н.Г. ЗАЙЦЕВА, аспирант,
А.Л. ПЛОТНИКОВ, доктор техн.наук, профессор,
(*ВолгГТУ, г. Волгоград*)

Статья поступила 15 июня 2012 года

Сергеев А.С. – 400005, г. Волгоград, ул. Советская, 29, корпус 4,
Волгоградский государственный технический университет, e-mail: sergeevapp@mail.ru

Рассматривается модифицированная математическая модель расчета параметра шероховатости R_a при точении конструкционных, углеродистых и низколегированных сталей на станках с ЧПУ. Описана методика применения оперативного сигнала термоЭДС для оценки физико-механических и теплофизических параметров контактной пары «инструмент – деталь». Приведены результаты экспериментальной проверки модифицированной математической модели.

Ключевые слова: математическая модель, шероховатость, точение, термоЭДС.

Введение

В практике металлообработки лезвийным инструментом часто имеет место ситуация, когда расчетное значение параметра шероховатости, заложенное в технологический процесс на стадии его проектирования, не совпадает с измеренным. Если измеренные значения параметра шероховатости превышают расчетные, то он выходит за пределы допустимого. В этом случае требуется уменьшение подачи, что снижает производительность. Для обеспечения требуемой шероховатости обрабатываемых поверхностей необходимо управлять процессом формирования высоты микронеровностей при механической обработке деталей на автоматизированном станочном оборудовании. Применение компьютерных технологий в металлообработке предполагает широкое использование систем автоматизированного проектирования на стадии подготовки технологического процесса (САПР ТП). В структуре САПР ТП в обязательном порядке содержится модуль расчета режимов обработки, в котором алгоритмы расчета основных параметров обработки построены на использовании математических моделей, содержащихся в справочно-нормативной литературе. Для эффективного использования САПР ТП, перенесенной в систему ЧПУ, требуется адекватная математическая модель, с помощью которой можно определить выходной параметр шероховатости поверхности после механической обработки детали на этапе проектирования (разработки) технологического процесса.

Анализ состояния вопроса по расчету высоты микронеровностей при обработке деталей на станках с ЧПУ

В настоящее время существует широкий спектр научной и справочно-нормативной литературы, в которой описаны математические зависимости для расчета параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей и методики их оценки [1–5]. Такие зависимости позволяют рассчитывать параметры шероховатости обрабатываемых поверхностей в зависимости от технологических параметров обработки (скорость резания V, глубина резания t, подача s) и факторов, влияющих на процесс лезвийной обработки в целом (рабочие углы инструмента, характер резания и т.д.). Зачастую в таких математических зависимостях используются усредненные поправочные коэффициенты для оценки режущих свойств обрабатываемого и инструментального материала.

Однако реальный диапазон колебания только режущих свойств твердосплавных инструментов одной марки как внутри партии, так и между партиями спекания одного завода-изготовителя или разных заводов достигает двукратного уровня и более. При этом все партии твердосплавных инструментов укладываются в установленные допуски. Для автоматизированного станочного оборудования такая неоднородность режущих свойств твердосплавного инструмента резко снижает стабильность, производительность, а самое главное качество обработки [9].

Одной из наиболее универсальных математических зависимостей, позволяющей учитывать технологические параметры обработки, геометрические характеристики процесса резания и марку обрабатываемого материала, является формула, описанная в работе [1]:

$$R_a = K\frac{S^{0,85}(90+\gamma)^{0,65}}{r^{0,36}V^{0,15}}, \qquad (1)$$

где S – продольная подача (0,05...0,43), мм/об; V – скорость резания (71...282), м/мин; r – радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок (0,5...2), мм; γ – передний угол резца (+4…(-4)), град.; K – усредненный поправочный коэффициент.

Недостатком формулы (1) является то, что она справедлива для обрабатываемых сталей (Ст3, стали 20, 45, 70) и не учитывает влияние марки инструментального материала на параметр шероховатости R_a, а такое влияние имеется [6]. При смене марки инструментального материала изменяется его теплопроводность. Влияние теплопроводности контактируемых пар на шероховатость проявляется через передачу количества выделенного при резании тепла в инструмент и стальную заготовку, т. е. через коэффициент теплоусвоения, представляющий собой отношение теплофизических характеристик инструмента и стальной заготовки. Количество тепла, усвоенного объемом срезаемого металла, определяет долю хрупкого и вязкого разрушения в механизме стружкообразования и оказывает влияние на механизм образования микронеровностей и количественное значение параметра шероховатости R_a через температурную прочность металла.

Указанный недостаток приводит к тому, что рассчитанное значение параметра шероховатости R_a на стадии проектирования технологического процесса токарной обработки по формуле (1) не дает приемлемого совпадения с фактическим – это значение выходит за пределы допуска по показателю шероховатости, что приводит или к браку по качеству обработанной поверхности, или к недоиспользованию резерва повышения производительности (увеличения подачи s). При существующем разбросе свойств (как между марочным составом, так и внутри его) инструментального материала и обрабатываемых сталей определение параметра шероховатости R_a с ориентацией на среднее (справочное) значение этих свойств (коэффициент K) приводит к значительным ошибкам.

Задача настоящего исследования состоит в модификации математической зависимости (1) с целью повышения точности расчета параметра шероховатости R_a при обработке углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей за счет оперативного определения величины поправочного коэффициента K_0 на основе использования сигнала термоЭДС, учитывающего физико-механические и теплофизические свойства каждой контактной пары режущего инструмента и обрабатываемой детали.

Появление сигнала термоЭДС естественной термопары при контакте режущей кромки пластины с деталью позволяет непосредственно перед обработкой по величине термоЭДС пробного прохода (на фиксированных режимах резания) получить необходимую информацию о состоянии контактной пары «инструмент–деталь». Методика измерения сигнала термоЭДС контактной пары «инструмент–деталь» при токарной обработке описана в работах [9, 10].

Методика получения модифицированной математической зависимости

Эксперименты проводились на токарном станке с ЧПУ 16К20Ф3 при токарной обработке марок сталей 45, 40Х, ШХ15 твердосплавными инструментами марок Т15К6, Т5К10, ТТ7К12, ТН20 на режимах получистовой и чистовой обработки.

Технологические режимы получистовой обработки: глубина резания t = 1 мм; подача S = 0,26... 0,34 мм/об; скорость резания V = 80...120 м/мин; радиус закругления резца r = 1,2 мм; передний угол γ = –4°; главный угол в плане φ = 75°; вспомогательный угол в плане φ_1 = 15°. Технологические режимы чистовой обработки: глубина резания t = 0,5 мм; подача S = 0,11...0,21 мм/об; скорость резания V = = 140...180 м/мин; радиус закругления резца r = 1,2 м; передний угол γ = –4°; главный угол в плане φ = 75°; вспомогательный угол в плане φ_1 = 15°. Расчетные значения высоты микронеровностей сравнивались с измеренными профилографом – профилометром «Абрис-ПМ7». Измерение сигнала термоЭДС контактной пары «инструмент-деталь» проводилось в соответствии с методикой, описанной в работах [9, 10]. В процессе резания на режимах пробного прохода (V = = 100 м/мин, S = 0,1 мм/об, t = 1 мм) между изолированным инструментом и обрабатываемой заготовкой измерялся сигнал термоЭДС, для чего на торце шпинделя устанавливался сухой токосъемник. В качестве прибора для регистрации сигнала термоЭДС использовался цифровой осциллограф *Velleman* модели *PCS*500.

Для определения параметра шероховатости R_a на токарных станках с ЧПУ при получистовой и чистовой обработке металла твердосплавным инструментом предварительно осуществляют кратковременный пробный проход резцом по детали (см. работу [9]), измеряют термоЭДС, по которой определяют поправочный коэффициент K_0 на физико-механические свойства контактируемой пары по формуле

$$K_0 = A + \kappa E, \qquad (2)$$

где A – постоянная, определяющая вид обработки (A = 0,474 – для получистовой обработки, A = 0,1 –

для чистовой обработки); κ – коэффициент, определенный экспериментальным путем (κ = 0,11); E – значение термоЭДС контактной пары «инструмент-деталь», мВ.

Тогда с учетом формулы (2) формула (1) принимает следующий вид:

$$R_a = (A + 0{,}11E)\frac{S^{0,85}(90+\gamma)^{0,65}}{r^{0,36}V^{0,15}}. \quad (3)$$

Методика определения поправочного коэффициента K_0 осуществлялась следующим образом. Перед началом обработки детали по разработанному технологическому процессу производят кратковременный (4–5 с) пробный проход твердосплавными инструментами по выбранным сталям на режимах резания (V = 100 м/мин, S = 0,1 мм/об, t = 1 мм), измеряют и фиксируют величину термоЭДС контактной пары «инструмент–деталь», а затем этими же инструментами производят обработку сталей на выбранных технологических режимах (V, S, t) и измеряют параметр шероховатости R_a. По его измеренным значениям обратным пересчетом определяют значения коэффициента K_0 :

$$K_0 = R_a \frac{r^{0,36}V^{0,15}}{S^{0,85}(90+\gamma)^{0,65}} \quad (4)$$

и строят зависимость K_0 – величина термоЭДС пробного прохода E, по которой определяют численное значение постоянной A и величину коэффициента κ в уравнении прямой, связывающей зависимость K_0 от термоЭДС пробного прохода. Таким образом, при обработке конструкционных, углеродистых и низколегированных сталей данный коэффициент определяется в соответствии с формулой (2), а параметр шероховатости R_a определяют с использованием измеренного значения термоЭДС, рабочих параметров процесса резания (S, V) и геометрических параметров резца (r, γ) по формуле (1).

Результаты экспериментов

Экспериментальная проверка модифицированной математической модели (3) по определению точности расчета параметра шероховатости R_a производилась при токарной обработке марок сталей 45, 40Х, ШХ15 твердосплавными инструментами марок Т15К6, Т5К10, ТТ7К12, ТН20 на режимах получистовой и чистовой обработки. Диапазоны технологических режимов обработки описаны в методике определения поправочного коэффициента. Точение проводилось резцами, оснащенными пятигранными сменными неперетачиваемыми пластинами (СНП).

В таблице приведены данные экспериментальной проверки расчета параметра шероховатости R_a при получистовой и чистовой обработке стали 45 твердо-

Сравнение результатов эксперимента и расчета для стали 45

Скорость резания V, м/мин	Подача S, мм/об	Глубина резания t, мм	Шероховатость R_a, мкм			Шероховатость R_a, мкм		
			Расчетная по прототипу	Измеренная по прототипу	Процент относительной ошибки	Расчетная по предлагаемому способу	Измеренная по предлагаемому способу	Процент относительной ошибки
80	0,26	1	7,5	4,3	75	4,8	4,3	11
	0.3	1	8,4	4,9	72	5,6	4,9	14
	0,34	1	9,3	5,8	60	6,0	5,8	4
100	0,26	1	7,2	3,5	104	4,6	3,5	31
	0.3	1	7,9	4,6	71	5,3	4,6	15
	0,34	1	8,7	5,7	42	5,8	5,7	2
120	0,26	1	6,8	3,4	100	4,5	3,4	32
	0.3	1	7,6	4,8	58	5,2	4,8	8
	0,34	1	8,4	4,7	78	5,6	4,7	19
140	0,11	0,5	3,5	1,8	94	2,08	1,8	11
	0,15	0,5	4,4	2,4	83	2,7	2,4	12
	0,21	0,5	5,7	2,7	110	3,5	2,7	29
160	0,11	0,5	3,3	1,5	124	2,08	1,5	33
	0,15	0,5	4,3	2,03	113	2,7	2,03	35
	0,21	0,5	5,5	2,3	139	3,5	2,3	34
180	0,11	0,5	3,3	1,7	105	2,0	1,7	18
	0,15	0,5	4,1	2,3	78	2,7	2,3	17
	0,21	0,5	5,3	3,3	60	2,6	3,3	21

сплавным инструментом марки Т15К6 с величиной термоЭДС пробного прохода E = 10,8 мВ.

Максимальная относительная погрешность определения параметра R_a по формуле (1) достигает 58...139 %. Ошибка имеет отрицательный знак и не приводит к браку обработки (фактическое значение шероховатости меньше расчетного), но при этом не используется резерв увеличения подачи (производительности обработки). Погрешность расчета параметра шероховатости R_a по полученной математической зависимости (3) лежит в пределах 2...35 % и позволяет использовать резерв повышения производительности.

Выводы

Для определения параметра шероховатости R_a при токарной обработке предложено использовать не справочное значение поправочного коэффициента K, учитывающего среднестатистическое значение физико-механических свойств контактируемых пар «инструмент–деталь», а модифицированное значение поправочного коэффициента K_0 на основе оперативного сигнала термоЭДС.

Использование в модифицированной математической зависимости определения параметра шероховатости R_a сигнала термоЭДС пробного прохода контактной пары повышает точность его определения, так как удельная составляющая термоЭДС, входящая в общую формулу полного значения ЭДС пары, зависит от физико-механических, химических и теплофизических свойств конкретной контактной пары [7].

Расчет параметра шероховатости R_a по полученной модифицированной математической зависимости (3) повышает точность определения R_a при работе токарных станков с ЧПУ и создает возможность производить это определение автоматизированным (программным) путем.

Полученная модифицированная математическая зависимость (3) может быть положена в основу построения блок-схемы алгоритма автоматизированного расчета высоты микронеровностей в САПР ТП [8].

Список литературы

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

2. *Демкин Н.Б.* Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

3. *Шифрин А.Ш.* Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов/ А.Ш. Шифрин, Л.М. Резницкий. – М.; Л.: Машиностроение, 1964. – 448 с.

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

5. *Безъязычный, В. Ф.* Расчет режимов резания: учеб. пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.

6. *Зорев Н.Н.* Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1967 – 416 с.

7. *Епифанов Г.И.* Физика твердого тела: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 288 с.

8. *Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Фролов Е.М., Крылов Е.Г.* Новая методика построения модулей расчета режимов резания в САПР ТП механической обработки // СТИН. – 2009. – № 2. – С. 19–25.

9. *Плотников А.Л.* Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: монография / А.Л. Плотников, А.О. Таубе. – Волгоград: РПК «Политехник», 2003. – 184 с.

10. *Патент №2117557* Россия, С1 В 23 В 25/06. Способ съема термоЭДС естественной термопары «инструмент–деталь» / А.Л. Плотников. – Бюл. № 23, 1998.

The mathematical model of the surface roughness formation at turning of steels based on the operational signal thermoEMF

A.S. Sergeev, N.G. Zaitseva, A.L. Plotnikov

We consider a modified mathematical model for calculating the roughness parameter Ra when turning structural steel, carbon and low alloy steels for CNC machines. A technique of rapid thermal electromotive force signal to estimate the physico-mechanical and thermophysical parameters of the contact pair «tool – a detail.» The results of experimental verification of the modified the mathematical model.

Key words: mathematical model, surface roughness, turning, thermoEMF.