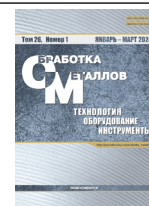




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Полуэмпирическое моделирование температуры резания и шероховатости поверхности при точении конструкционных материалов твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN

Нилеш Патил^{1, а, *}, Атул Сараф^{2, б}, Атул Кулкарни^{3, в}

¹ Технологический институт Маратвада, Аурангабад-431010, штат Махараштра, Индия

² Национальный технологический институт Сардара Валлабхбая, Сурат, Гуджарат 395007, Индия

³ Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, штат Махараштра, Индия

^а <https://orcid.org/0000-0002-4884-4267>, nileshgpatil@rediffmail.com; ^б <https://orcid.org/0000-0003-4776-6874>, atul.saraf001@gmail.com;

^в <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, atul.kulkarni@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 20 сентября 2023

Рецензирование: 31 октября 2023

Принята к печати: 22 января 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2024

Ключевые слова:

Полуэмпирическая модель

Регрессионная модель

Температура

Шероховатость поверхности

АННОТАЦИЯ

Введение. В производстве получение заданной шероховатости поверхности обрабатываемых деталей имеет большое значение для выполнения функциональных требований. Однако на шероховатость поверхностей оказывает существенное влияние тепло, выделяемое в процессе обработки, что может привести к снижению размерной точности. Шероховатость поверхности существенно влияет на усталостные характеристики детали, а срок службы режущего инструмента определяется температурой резания. **Цель работы.** Целью данного исследования является создание полуэмпирических моделей для прогнозирования шероховатости поверхности и температуры различных рабочих материалов. Повышение производительности резания достигается за счет точного определения температуры резания в обрабатываемой зоне. Однако расчет температуры резания для каждого конкретного случая сопряжен с трудностями с точки зрения трудовых ресурсов и финансовых вложений. В этой статье представлена комплексная эмпирическая формула, предназначенная для прогнозирования как теоретической температуры, так и шероховатости поверхности. **Методика.** Показатели шероховатости поверхности и температуры оценивались для материалов EN 8, Al 380, SS 316 и SAE 8620 при их обработке твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN. Покрытие TiAlN было получено методом физического осаждения из паровой фазы (PVD). Для подготовки прогнозирующих моделей использовалась методология поверхности отклика. Скорость резания (от 140 до 340 м/мин), подача (от 0,08 до 0,24 мм/об) и глубина резания (от 0,6 до 1 мм) использовались в качестве входных параметров для измерения характеристик всех материалов с точки зрения шероховатости поверхности и температуры резки. Температуру на границе раздела стружка-инструмент определяли с помощью термопары. Для установления связи между электродвижущей силой (ЭДС), возникающей во время обработки, и температурой резания была разработана новая калибровочная установка. **Результаты и обсуждение.** Было замечено, что энергия, необходимая для механической обработки, в значительной степени преобразовалась в тепло. Самая высокая температура резания была зафиксирована при обработке стали SS 316, а затем стали SAE 8620 и стали EN 8. Однако при обработке AL 380 наблюдалась низкая температура, которая в основном определялась теплопроводностью материала. Самая низкая шероховатость поверхности наблюдалась у материалов SAE 8620, EN 8, а затем SS 316 и AL 380. Полуэмпирический метод и уравнения регрессионной модели хорошо соответствовали друг другу. Статистический анализ нелинейной оценки показывает, что скорость резания, подача и плотность материала в большей степени влияют на шероховатость поверхности, тогда как глубина резания в большей степени влияет на изменение температуры. Исследование будет очень полезно для прогнозирования производительности в промышленности при обработке материалов EN 8, AL 380, SS 316 и SAE 8620 твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN.

Для цитирования: Патил Н.Г., Сараф А.Р., Кулкарни А.П. Полуэмпирическое моделирование температуры резания и шероховатости поверхности при точении конструкционных материалов твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 155–174. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-155-174.

*Адрес для переписки

Кулкарни Атул П., к.т.н., профессор

Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек),

Пуне – 411048,

штат Махараштра, Индия

Тел.: 91-2026950419, e-mail: atul.kulkarni@viit.ac.in

Список условных обозначений

List of symbols

Обозначение / Symbol	Описание / Description
f	Подача, мм
V_c	Скорость резания, мм/мин
doc	Глубина резания, мм
R_a	Шероховатость поверхности, мкм
MRR	Скорость съема материала, мм ³ /оборот
HSM	Высокоскоростная обработка
F_c	Сила резания, Н
ρ	Плотность, кг/м ³
C_p	Удельная теплоёмкость, Дж/кг · К
K	Теплопроводность, Вт/м · К
σ	Предел текучести, Н/м ²
α	Коэффициент линейного расширения, мм/м · К
Θ	Температура, °С
SS 316	Нержавеющая сталь SS 316
SAE 8620	Конструкционная легированная сталь SAE 8620
EN 8	Конструкционная сталь EN 8
Al 380	Алюминиевый сплав
\emptyset	Постоянная Пи-теоремы
$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5$	Энергетические показатели
$b_1 b_2 b_3 b_4 b_5$	Энергетические показатели
$M L T \Theta$	Габариты
CBN	Кубический нитрид бора
RSM	Методология поверхности отклика
CCD	Центральный композиционный план
ANN	Нейронная сеть искусственного интеллекта
LM	Левенберг – Марквардт

Введение

Чистовая обработка поверхности имеет решающее значение для обеспечения качества, поскольку она напрямую влияет на внешний вид, функциональность и эксплуатационные качества обрабатываемых компонентов. Точная механическая обработка имеет большое значение, особенно в аэрокосмической и медицинской промышленности, где требуется определенная обработка поверхности для снижения трения, повышения износостойкости или улучшенной коррозионной стойкости. Влияние качества поверхности на трибологические характеристики, такие как трение и смазывание, имеет решающее значение для достижения максимальной производительности и долговечности. Повышение температуры во время обработки оказывает существенное влияние на износ инструмента, целостность материала и точность размеров. Контроль температуры имеет решающее значение для продления срока службы инструмента и поддержания структурной целостности обрабатываемых деталей. Прогнозное моделирование оптимизирует процессы, определяя оптимальные параметры для экономии затрат за счет увеличения срока службы инструмента, снижения процента брака и повышения эффективности. Использование смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при токарной обработке деталей высокой твердости не рекомендовано, так как при повышенных температурах при обработке СОЖ материалов твердостью от 48 до 68 HRC в зоне резания начинается кипение. Явление кипения способствует термическим деформациям, тем самым снижая как R_a (шероховатость поверхности), так и срок службы режущего инструмента [1].

В случае обработки различных материалов их обрабатываемость оценивалась с использованием определенных параметров процесса, таких как стойкость инструмента, скорость съема материала, сила резания, энергопотребление, морфология стружки и шероховатость обработанной поверхности. Использование высокоскоростной обработки (HSM) при сохранении целостности поверхности и соблюдении пределов допусков требует оптимального согласования таких факторов, как сила резания (F_c), параметров процесса и станка. Правильное сочетание этих

параметров имеет решающее значение для повышения эффективности высокоскоростной обработки без снижения качества обрабатываемых поверхностей или превышения установленных пределов допуска. Этот баланс гарантирует, что процесс обработки на высоких скоростях будет протекать без ущерба для точности и качества поверхности, что способствует общему успеху операций высокоскоростной обработки [2].

Чжао и др. (Zhao et al.) [3] измерили температуру резания Inconel 718 при помощи двухцветного инфракрасного термометра инструментом, упрочненным керамическими нитевидными кристаллами, и пришли к выводу, что большое количество тепла, выделяемого во время обработки, ухудшает качество поверхности обрабатываемого материала. Из-за повышения температуры в зоне резания во время механической обработки качество поверхности ухудшалось [4]. Высокий износ инструмента и температура, повышающаяся в процессе обработки закаленной стали AISI 4340, могут быть устранены с помощью биоСОЖ [5]. Для суперсплавов необходимы постмеханические операции для улучшения качества поверхности [6]. Кумар и др. (Kumar et al.) [7] сравнили модель на основе метода поверхности отклика (RSM) с моделью на основе метода, использующего искусственные нейронные сети (ANN), для анализа характеристик при точении стали AISI D2 и пришли к выводу, что прогнозная модель на основе RSM является более точной по сравнению с моделью ANN для прогнозирования качества поверхности и температуры резания. Госай (Gosai) и Бхавсар (Bhavsar) [8] использовали математические модели и уравнения, сгенерированные RSM на основе CCD для прогнозирования температуры резания.

Скорость съема материала в процессе токарной обработки была выше по сравнению с другими традиционными процессами механической обработки. Абханг и др. (Abhang et al.) [9] экспериментально измерили температуру сплава EN-31 при токарной обработке пластинами из карбида вольфрама, используя метод естественной термопары. Подача f оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности: при увеличении f шероховатость увеличивается, а при увеличении V_c шероховатость уменьшается [10–12]. Бхопале и др. (Bhopale et al.) [13] использовали RSM с CCD для точения аустенизирован-

ного высокопрочного чугуна твердосплавным инструментом и обнаружили, что V_c оказывает более существенное влияние на шероховатость поверхности. Ауичи и др. (Aouici et al.) [14] использовали эльборовый инструмент для точения стали AISI H11, а также математическую модель на основе RSM для R_a и F_c , однако при обработке материалов, армированных частицами, морфология поверхности была изменена. Лонгботтом (Longbottom) и Лэнхэм (Lanham) [15] провели обзор устройств для измерения температуры и обнаружили, что измеряемая температура варьировалась в разных местах. Коркут и др. (Korkut et al.) [16] сопоставили модель ANN и модель RA и обнаружили, что обучающая модель ANN с алгоритмом LM продемонстрировала более высокую скорость прогнозирования и была полезна при измерении температуры резания при проверке квалифицированным методом RA при механической обработке. Дхар (Dhar) и Камруззаман (Kamruzzaman) [17] обнаружили, что повышение температуры значительно влияет на износ инструмента и шероховатость поверхности, а использование криогенного охлаждения дает хорошие результаты. Патил (Patil) и Брахманкар (Brahmankar) [18] разработали модель для шероховатости поверхности, учитывающую входные параметры, свойства материала, размер керамических частиц и их объемную долю, и обнаружили, что объемная доля и размер частиц существенно влияют на выходные параметры, а также что присутствие керамических частиц влияет на шероховатость поверхности. Патель (Patel) и Киран (Kiran) [19] использовали линейную регрессионную модель для анализа оценки шероховатости поверхности при обработке стали AISI 1040. Патель (Patel) и Ганди (Gandhi) [20] обрабатывали сталь AISI D2 эльборовым инструментом и разработали математическую модель, основанную на одновременном воздействии f , V_c и радиуса закругления вершины режущего инструмента и хорошо совпадающую с экспериментальными значениями. Однако никто из них не взял более одного материала для экспериментов, за исключением Родригеса и др. (Rodriguez et al.) [21], использовавших материалы SS 304, 316L и 420 для точения и разработавших модель температуры резания с учетом теплопроводности и максимальной прочности. Согласно рассмотренной литературе, параметры

резания, в частности скорость резания и подача, оказывают существенное влияние на температуру поверхности контакта стружки с инструментом. Были разработаны различные прогнозные модели, но каждая модель предсказывала результаты в определенной области параметров. Кроме того, сообщалось о нескольких исследованиях влияния параметров резания и покрытия TiAlN на температуру резания и шероховатость поверхности при точении материалов EN 8, Al 380, SS 316 и SAE 8620.

В настоящем исследовании для измерения температуры была разработана наиболее простая и экономичная методика, предполагающая использование естественной термопары. Далее были разработаны модели поверхности отклика для температуры резания и шероховатости этих материалов, изучено влияние технологических параметров и теплофизических свойств материалов обрабатываемых деталей на параметры отклика, а также разработана полуэмпирическая модель для прогнозирования температуры резания и шероховатости поверхности.

Материалы и методы

Результаты эксперимента были получены на токарном станке с ЧПУ. Параметры V_c , f и doc были тремя регулируемыми факторами при токарной обработке. В настоящей работе использовали заготовки из четырех материалов, а именно из мягкой стали EN 8 диаметром 75 мм, из алюминиевого сплава Al 380 диаметром 50 мм, из нержавеющей стали SS 316 диаметром 75 мм и из низколегированной стали SAE 8620 диаметром 75 мм. Длина каждой заготовки составляла 300 мм, и все они были обработаны механически. Для определения химического состава вышеуказанных материалов был проведен спектроскопический анализ, результаты которого представлены в табл. 1. Поскольку в литературе указано, что твердосплавный инструмент с TiAlN-покрытием имеет минимальную R_a и износ инструмента, то в работе использовали твердосплавные пластины с покрытием Sandvik PVD (TiAlN) с восемью режущими кромками, обозначенными маркой CNMG-120408 MS PR1310 (радиус закругления вершины 0,8 мм) в течение 20 испытаний в сухих условиях. Место контакта инструмента и заготовки во время обработки было горячим, в то

Таблица 1

Table 1

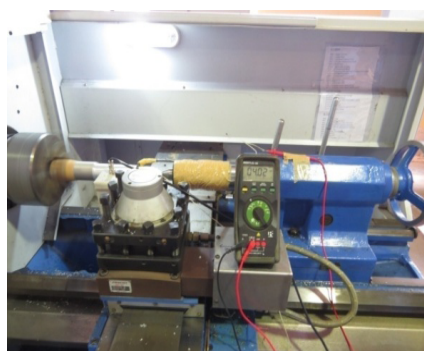
Химический состав рабочего материала
Chemical composition of work material

Элемент, %	SS 316	EN 8	SAE 8620	Al 380
C	0,07	0,39	0,22	—
Mn	0,16	0,87	0,8	0,5
Si	0,9	0,22	0,28	8,5
P	0,05	0,04	0,031	—
S	0,02	0,05	0,04	—
Cr	18,50	—	0,49	—
Mo	2,25	—	0,22	—
Ni	12,23	—	0,52	0,5
Mg	—	—	—	0,1
Cu	—	—	—	3,6
Sn	—	—	—	0,35
Zn	—	—	—	3
Fe	Остальное	Остальное	Остальное	1,3
Al	—	—	—	Остальное

время как угольная щетка, касающаяся заготовки, оставалась холодной. Заготовка была установлена в трехкулачковый патрон, между заготовкой и патроном была предусмотрена изоляция. Экспериментальная установка, калибровочная установка для измерения температуры и материал заготовки показаны на рис. 1, а, б и в соответственно. Параметры резания, используемые для механической обработки, приведены в табл. 2.

Результаты и их обсуждение

Для основных экспериментов использовался центральный композитный план метода поверхности отклика. В табл. 3 приведены результаты экспериментов. Целью экспериментального анализа было определить значимый фактор, который оказывает большее влияние на переменные отклика, и разработать обобщенную эмпириче-



а



б



в

Рис. 1. Установка для механической обработки (а); установка для калибровки температуры (б); рабочие материалы (в)

Fig. 1. Machining setup (a); temperature calibration setup (b); work materials (c)

Таблица 2

Table 2

Параметры процесса и экспериментальные уровни

Process parameters and experimental levels

Параметры / Уровни	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5
V_c , м/мин	140	190	240	290	340
f , мм/об	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
doc , мм	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Таблица 3

Table 3

Экспериментальные данные по R_a и температуре для материалов SS 316, EN 8, SAE 8620 и Al 380

Experimental data of R_a and temperature for SS 316, EN 8, SAE 8620 and Al 380 materials

Нормер прохода	Скорость, V_c , м/мин	Подача, f , мм/об	doc , d , мм	SS 316 R_a	EN 8 R_a	SAE 8620 R_a	Al 380 R_a	SS 316 темп.	EN 8 темп.	SAE 8620 темп.	Al 380 темп.
1	190	0,12	0,7	0,73	0,84	0,63	2,88	635	636	629	243
2	290	0,12	0,7	0,56	0,66	0,50	1,73	812	657	733	264
3	190	0,2	0,7	1,39	1,54	1,60	3,56	643	654	648	247
4	290	0,2	0,7	1,22	1,31	1,25	2,24	997	672	741	318
5	190	0,12	0,9	0,74	0,92	0,55	2,95	782	647	675	236
6	290	0,12	0,9	0,62	0,74	0,59	1,93	1082	665	782	271
7	190	0,2	0,9	1,47	1,6	1,42	4,08	815	664	735	274
8	290	0,2	0,9	1,27	1,42	1,27	2,52	1157	679	818	334
9	140	0,16	0,8	1,08	1,32	1,12	4,25	732	644	595	229
10	340	0,16	0,8	0,78	1,03	0,80	1,86	1243	689	837	323
11	240	0,08	0,8	0,3	0,59	0,47	2,01	619	629	625	216
12	240	0,24	0,8	1,86	2,06	1,96	2,92	883	666	718	306
13	240	0,16	0,6	0,91	0,92	0,98	2	646	644	693	289
14	240	0,16	1	1,07	1,02	1,04	2,88	1082	653	791	310
15	240	0,16	0,8	1,01	0,95	0,99	2,12	805	649	704	283
16	240	0,16	0,8	0,92	1	0,96	2,24	766	642	694	291
17	240	0,16	0,8	0,93	0,94	1,00	2,31	775	644	699	293
18	240	0,16	0,8	0,99	0,94	1,00	2,09	764	645	701	296
19	240	0,16	0,8	0,96	0,94	1,00	2,1	769	644	703	298
20	240	0,16	0,8	0,98	0,95	1,00	2,08	765	643	701	297

скую модель для прогнозирования шероховатости поверхности и температуры, генерируемых с использованием π -теоремы Бекингема. Статистический анализ шероховатости поверхности и повышения температуры был проведен с использованием RSM.

Основной целью данной статьи является разработка полуэмпирических формул с использованием метода Левенберга – Марквардта для прогнозирования шероховатости поверхности и температуры различных материалов. С использованием значений из табл. 2 были составлены

отдельные уравнения регрессии, а из регрессии извлечены полные значения факториала. Эти значения полного факториала используются для вывода полуэмпирической формулы.

Уравнения регрессии шероховатости поверхности материалов приведены ниже:

$$\begin{aligned} SSR_a = & 0,60 + 0,00018V_c + \\ & + 2,7f - 1,37d - 0,000003V_c^2 + \\ & + 19,03f + 0,79d^2 - 0,0050V_cxf + \\ & + 0,00050V_cxd + 1,87fxd; \end{aligned} \quad (I)$$

$$\begin{aligned} SAER_a = & 0,31 - 0,00202V_c + \\ & + 10,01f - 1,20d - 0,00005V_c^2 + \\ & + 31,61f^2 - 0,11d^2 - 0,2604V_cxf + \\ & + 0,00908V_cxd - 5,1fxd; \end{aligned} \quad (II)$$

$$\begin{aligned} ENR_a = & 3,135 - 0,01331V_c - \\ & - 9,76f - 1,09d + 0,000023V_c^2 + \\ & + 59,66f^2 + 0,670d^2 - 0,00312V_cxf + \\ & + 0,00125V_cxf + 0,31fxd; \end{aligned} \quad (III)$$

$$\begin{aligned} AIR_a = & 14,32 - 0,0478V_c - \\ & - 12,4f - 12,97d + 0,000093V_c^2 + \\ & + 53,7df^2 + 7,97d^2 - 0,0444V_cxf - \\ & - 0,0027V_cxd + 16,6fxd. \end{aligned} \quad (IV)$$

Уравнения регрессии температуры материалов приведены ниже:

$$\begin{aligned} SSTemp = & 3517 - 2,74V_c + \\ & + 696f - 8645d + 0,01054V_c^2 + \\ & + 3963f^2 + 699d^2 + 6,6V_cxf - \\ & - 1,57V_cxd - 3281fxd; \end{aligned} \quad (V)$$

$$\begin{aligned} SAETemp = & 1073 + 0,57V_c + \\ & + 457f - 1899d + 0,00210V_c^2 - \\ & - 3672f^2 + 1175d^2 - 2,14V_cxf - \\ & - 0,175V_cxd + 2156fxd; \end{aligned} \quad (VI)$$

$$\begin{aligned} ENTemp = & 748 - 0,787V_c + \\ & + 87f - 175d + 0,002436V_c^2 + \\ & + 838d^2 + 159f^2 - 0,375V_cxf - \\ & - 0,150V_cxd - 63fxd; \end{aligned} \quad (VII)$$

$$\begin{aligned} AlTemp = & 239 + 0,579V_c + \\ & + 39f - 353d - 0,001918V_c^2 - \\ & - 5341d^2 + 108f^2 + 4,69V_cxf - \\ & - 0,075V_cxd + 1344fxd; \end{aligned} \quad (VIII)$$

π-теорема Бекингема

В этом исследовании используется принцип размерной однородности π-теоремы Бекингема [22]. В табл. 4 приведены механические свойства материалов.

Величины различной природы не могут быть однородными. Применяя размерный анализ, шероховатость поверхности может быть задана уравнением вида

$$R_a = f(F, V, D, \theta, \sigma, K, C_p, \rho, \alpha), \quad (1)$$

где фундаментальными размерностями являются ρ , L , T и Θ . Следовательно, поскольку общее количество переменных равно десяти, то фундаментальных размерностей четыре.

Количество зависимых и независимых переменных равно $n = 10$, а количество повторяющихся переменных равно $m = 4$. Следовательно, ни один из членов π в настоящем исследовании не будет равен $n - m = 6$.

Таким образом:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0. \quad (2)$$

Обратите внимание, что уравнение (2) также можно записать как

$$\pi_1 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6), \quad (3)$$

$$\pi_1 = R_a / F; \quad (4)$$

$$\pi_2 = \left(\frac{C_p \theta}{V^2} \right)^{a_1}; \quad (5)$$

$$\pi_3 = \left(\frac{K \theta}{F V^3 \rho} \right)^{a_2}; \quad (6)$$

Таблица 4

Table 4

Единицы измерения, размеры и свойства обрабатываемых материалов

Units, dimensions and properties of the machined materials

Параметр	Единица измерения	Обозначение	Размерная величина	Свойства заготовок			
				SS 316	EN 8	SAE 8620	Al 380
Подача	мм	f	L	–	–	–	–
Скорость	м/мин	V_c	LT^{-1}	–	–	–	–
Глубина резания	мм	doc	L	–	–	–	–
Шероховатость поверхности	мкм	R_a	L	–	–	–	–
Плотность	кг/м ³	ρ	ML^{-3}	8000	7850	7845	2760
Удельная теплоемкость	Дж/кг · К	C_p	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$	0,5	0,475	1,6	0,963
Теплопроводность	Вт/м · К	K	$ML T^{-3} \Theta^{-1}$	16,3	46,6	27	109
Предел текучести	Н/м ²	σ	$M^{-1} T^{-2}$	240	560	450	159
ТКЛР	м/м · К	α	$L \Theta^{-1}$	$16,18 \cdot 10^{-6}$	$12,2 \cdot 10^{-6}$	$11,6 \cdot 10^{-6}$	$12,1 \cdot 10^{-6}$
Температура	°С	Θ	Θ	1371	2600	1400	650

$$\pi_4 = \left(\frac{\alpha \theta}{F} \right)^{a_3}; \quad (7)$$

$$\pi_5 = \left(\frac{\sigma}{V^2 \rho} \right)^{a_4}; \quad (8)$$

$$\pi_6 = \left(\frac{D}{F} \right)^{a_5}. \quad (9)$$

Следовательно, окончательный вид уравнений можно записать как

$$R_a = \varnothing \cdot F \left(\frac{C_p \theta}{V^2} \right)^{a_1} \left(\frac{K \theta}{F V^3 \rho} \right)^{a_2} \times \left(\frac{\alpha \theta}{F} \right)^{a_3} \left(\frac{\sigma}{V^2 \rho} \right)^{a_4} \left(\frac{D}{F} \right)^{a_5}. \quad (10)$$

Аналогично повышение температуры (T) может быть задано уравнением вида

$$\theta = f(F, V, \sigma, K, C_p, \rho, \alpha); \quad (11)$$

$$\pi_1 = \alpha \theta / F; \quad (12)$$

$$\pi_2 = \left(\frac{F C_p}{\alpha V^2} \right)^{b_1}; \quad (13)$$

$$\pi_3 = \left(\frac{K}{\alpha V^2 \rho} \right)^{b_2}; \quad (14)$$

$$\pi_4 = \left(\frac{R_a}{F} \right)^{b_3}; \quad (15)$$

$$\pi_5 = \left(\frac{\sigma}{V^2 \rho} \right)^{b_4}; \quad (16)$$

$$\pi_6 = \left(\frac{D}{F} \right)^{b_5}. \quad (17)$$

Таким образом, окончательный вид уравнения можно записать как

$$\theta = F/a \cdot \varnothing \left(\frac{F C_p}{\alpha V^2} \right)^{b_1} \left(\frac{K}{\alpha V^3 \rho} \right)^{b_2} \times \left(\frac{R_a}{F} \right)^{b_3} \left(\frac{\sigma}{V^2 \rho} \right)^{b_4} \left(\frac{D}{F} \right)^{b_5}. \quad (18)$$

Хотя α появляется неоднократно, их влияние на R_a представляется весьма значительным. В данной работе энергетические показатели определяются с помощью методики Левенберга – Марквардта (табл. 5). Адекватность модели

Таблица 5

Table 5

Коэффициенты и энергетические показатели R_a и температурной моделиCoefficients and energy indices of R_a and temperature model

Энергетические показатели	Шероховатость поверхности	Энергетические показатели	Температура
\emptyset	1,687688	\emptyset	0,098376
a_1	0,118057	b_1	-0,186434
a_2	0,322659	b_2	-0,384552
a_3	-0,591654	b_3	-0,177437
a_4	-0,272547	b_4	0,407445
a_5	0,548434	b_5	0,660121

дополнительно анализируется путем сопоставления регрессии R_a и прогнозируемых значений полуэмпирической модели.

Сравнение шероховатости поверхности SS 316, EN 8, SAE 8620 и Al 380

Чтобы получить полное представление о влиянии входных параметров на шероховатость поверхности, путем изменения технологических параметров для всех режущих материалов построены трехмерные поверхностные диаграммы. Для обеспечения точности в этих визуальных представлениях используются эмпирически полученные уравнения. На рис. 2 показаны трехмерные диаграммы поверхности, иллюстрирующие изменения шероховатости поверхности в процессе точения SS 316, EN 8, SAE 8620 и Al 380 инструментами с PVD-покрытием (TiAlN), сгенерированные с помощью уравнений (I–IV).

Из рис. 2 становится ясно, что на шероховатость поверхности в первую очередь влияет подача. Однако этот эффект можно рассматривать как более значительный для Al 380 и SS 316. В процессе обработки алюминиевых сплавов происходит образование наростов за счет прилипания стружки к режущему инструменту, что приводит к увеличению шероховатости поверхности. В случае SS 316 наблюдается тенденция к образованию сливной стружки, которая вращается вокруг обрабатываемого материала, повреждая новую поверхность, и это может быть причиной плохой шероховатости поверхности.

Материалы EN 8 и SAE 8620 кажутся хорошо подходящими для механической обработки, главным образом из-за низкой твердости в горячем состоянии и легкой обрабатываемости. Следовательно, шероховатость этих материалов выше по сравнению с другими. Было также замечено, что по мере увеличения скорости резания наблюдается тенденция к улучшению шероховатости поверхности для всех материалов. В литературе сообщается, что при высокой скорости резания длина контакта стружки инструмента уменьшается, что обеспечивает минимизацию вибраций режущего инструмента и улучшение шероховатости поверхности. Кроме того, на повышенных скоростях происходит повышение температуры резания, способствующее размягчению материала. Это, в свою очередь, помогает снизить силу резания, тем самым сводя к минимуму вибрации и улучшая шероховатость поверхности.

На рис. 3, а показано влияние f на R_a при $V_c = 140$ м/мин и $d_{oc} = 0,6$ мм как для регрессионных, так и для полуэмпирических значений. Алюминиевый материал имеет плохую чистоту поверхности, поскольку по сравнению с другими материалами в алюминии образуется больше непрерывной стружки. Кроме того, эта непрерывная стружка повреждает уже готовые детали [23].

На рис. 3, б показано влияние f на R_a при $V_c = 190$ м/мин и $d_{oc} = 0,7$ мм. С увеличением f величина R_a увеличивается по сравнению с другими материалами, теплопроводность SS 316 меньше, за счет повышения температуры материал стано-

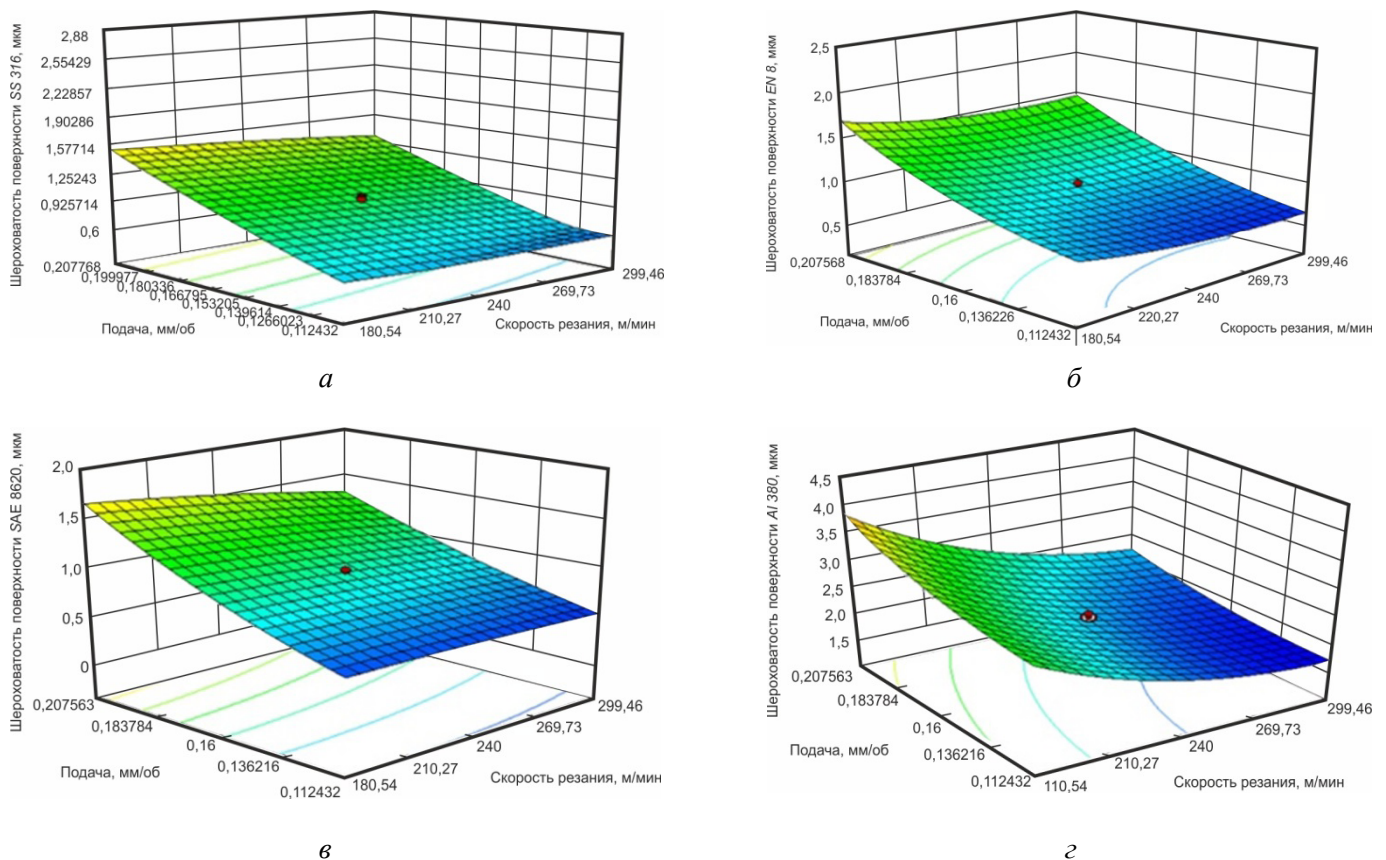


Рис. 2. Трехмерная диаграмма шероховатости поверхности материалов: SS 316 (а), EN 8 (б), SAE 8620 (в) и Al 380 (г)

Fig. 2. Surface roughness 3D plot for SS 316 (a), EN 8 (б), SAE 8620 (в) and Al 380 (г)

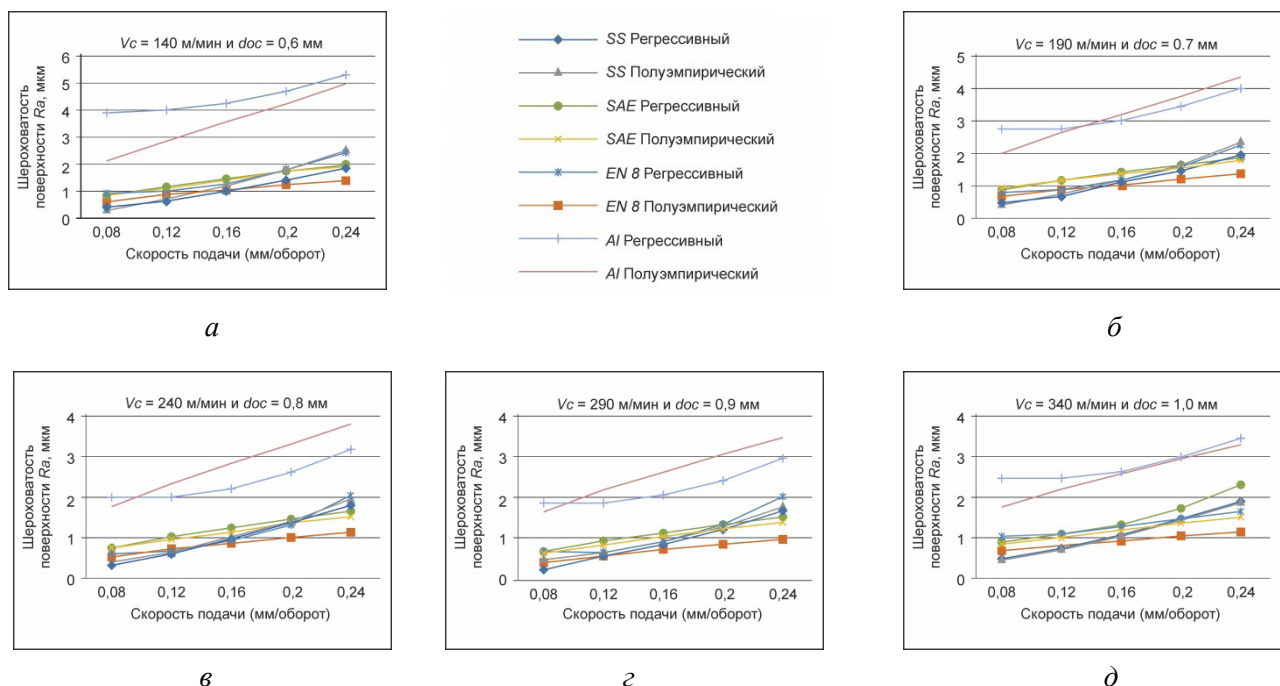


Рис. 3. Влияние скорости подачи на шероховатость поверхности при различной скорости резания и глубине резания для всех материалов с использованием инструмента с покрытием TiAlN

Fig. 3. Effect of feed rate on surface roughness at different cutting speed and depth of cut for all materials using TiAlN coated tool

вится более пластичным при резке и возможен более гладкий рез, что приводит к лучшему качеству поверхности [11]. Минимальная R_a достигается при увеличении V_c с 240 до 340 м/мин и doc с 0,8 до 1 мм, как показано на рис. 3, в–д, поскольку ожидается, что при более высоком V_c скорость деформации в зоне сдвига будет высокой и приведет к росту температуры [2]. С увеличением V_c и f температура увеличивается, поскольку время рассеивания тепла уменьшается, а большая площадь контакта стружки с инструментом увеличивает трение. Параметры V_c и doc являются значимыми факторами повышения температуры инструмента для SS 316 и SAE 8620; R_a уменьшается за счет увеличения скорости деформации [24].

На рис. 4, а–д четко видно, что более высокая V_c обеспечивает хорошую шероховатость поверхности почти для всех материалов. Однако по мере увеличения f и doc шероховатость поверхности сначала увеличивается для SS 316, а затем для Al 380. Материал EB 8 показывает еще лучшие результаты благодаря низкому выделению тепла в зоне резания, что сохраняет стабильность формы инструмента. Поскольку теплопроводность SS 316 меньше по срав-

нению с другими материалами, он становится более пластичным во время резки из-за повышения температуры, и возможен более гладкий рез за счет лучшего качества поверхности [2]. Значение параметра R_a оказалось худшим при обработке Al 380 и превосходило значения для SS 316 и SAE 8620. Вязкость материала Al 380 приводит к образованию шероховатой поверхности. Наросты возникают из-за того, что материал легко сцепляется с режущей кромкой, что в конечном итоге изменяет геометрию инструмента, и R_a увеличивается [12].

На рис. 5, а–д показано влияние doc на различные материалы. Замечено, что doc не оказывает существенного влияния на R_a . Это может быть связано с увеличением объема деформации с увеличением doc . Таким образом, сильная деформация заготовки приводит к образованию большего количества неровностей на поверхности и, следовательно, к плохому качеству поверхности. Зоу и др. (Zou et al.) [25] также получили аналогичные результаты. Фактор doc менее значителен для R_a , чем V_c и f [11]. При более высоких значениях технологических параметров увеличивается тепловой износ инструмента и шероховатость поверхности [3].

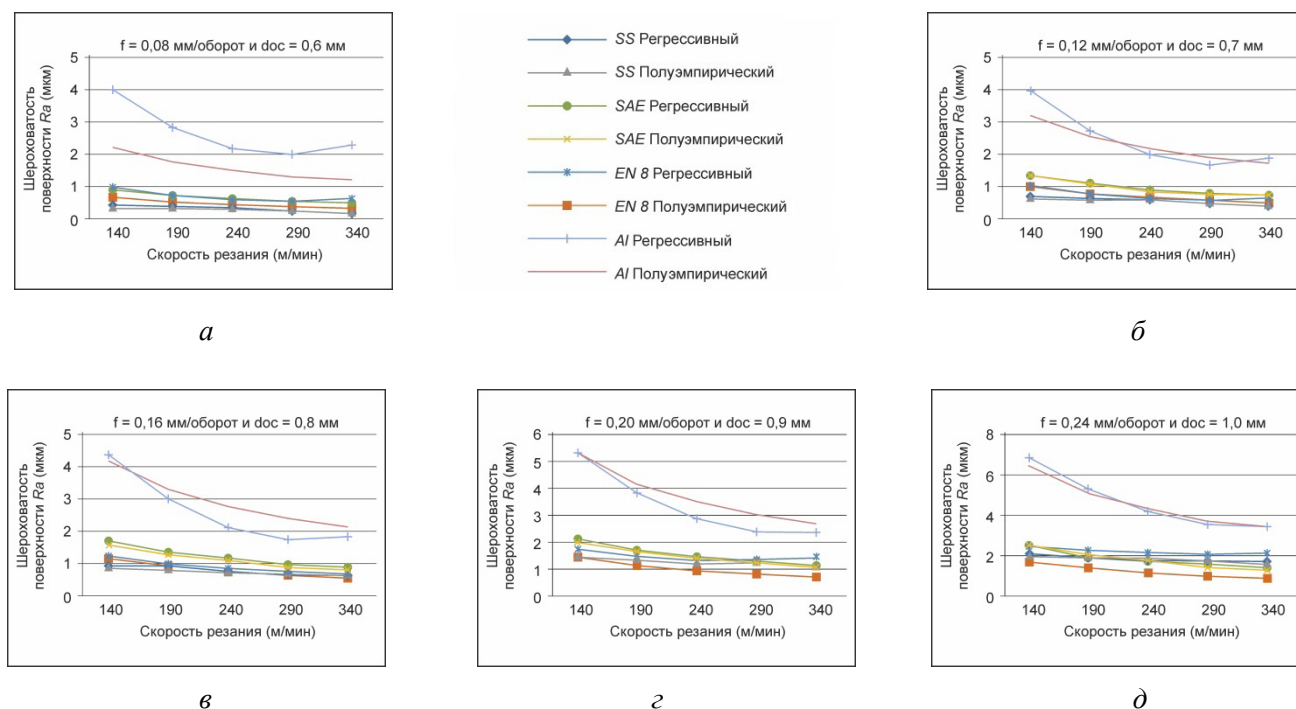


Рис. 4. Влияние скорости резания на шероховатость поверхности при различной подаче и глубине резания при обработке всех материалов с использованием инструмента с покрытием TiAlN

Fig. 4. Effect of cutting speed on surface roughness at different feed rate and depth of cut for all materials using TiAlN coated tool

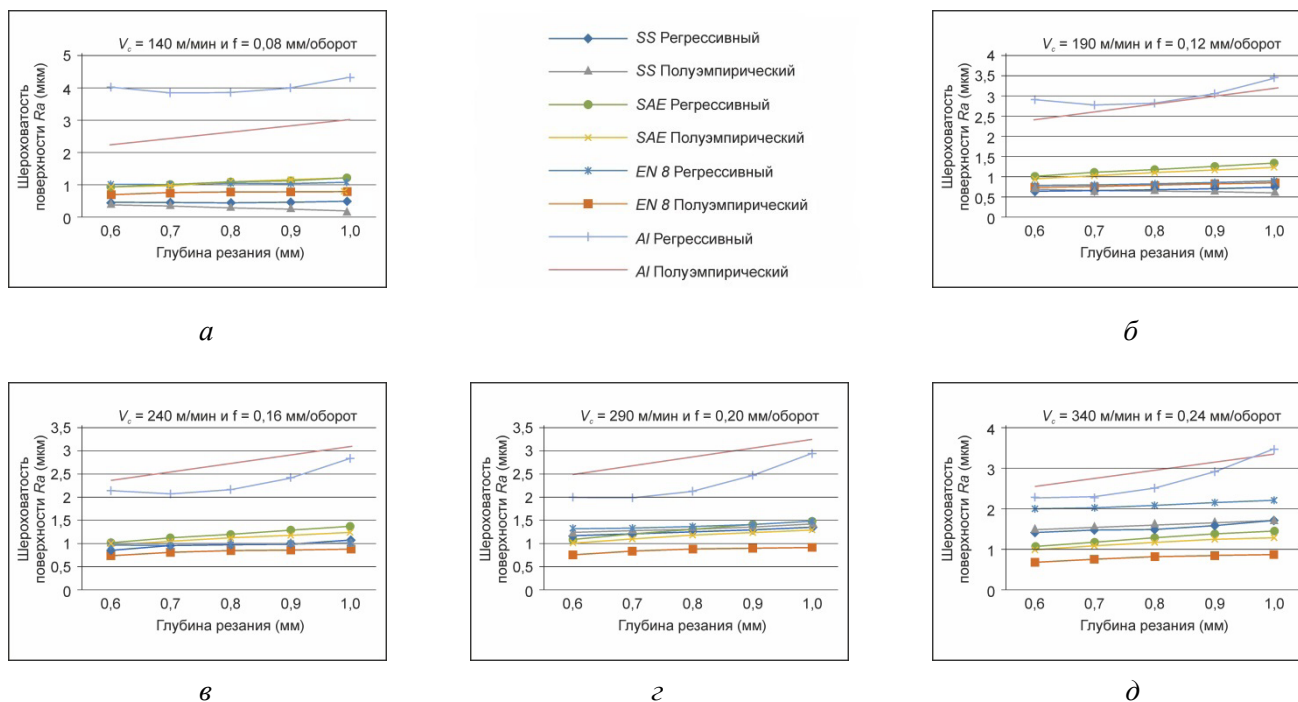


Рис. 5. Влияние глубины резания на шероховатость поверхности при различной подаче и скорости резания при обработке всех материалов инструментом с покрытием TiAlN

Fig. 5. Effect of depth of cut on surface roughness at different feed rate and cutting speed for all materials using TiAlN coated tool

Сравнение температуры резания SS 316, EN 8, SAE 8620 и Al 380

Чтобы получить полное представление о влиянии входных параметров на температуру резания, построены трехмерные (3D) поверхностные диаграммы путем изменения параметров процесса для всех режущих материалов. В этих визуальных представлениях для обеспечения точности используются уравнения, полученные эмпирическим путем. На рис. 6 показаны трехмерные диаграммы, иллюстрирующие изменения температуры резания в процессе токарной обработки нержавеющей стали SS 316, EN 8, SAE 8620 и Al 380 для инструментов с PVD-покрытием (TiAlN), полученные с помощью уравнений (V–VIII).

В случае температуры резания f не оказывает существенного влияния (рис. 6, а–г). По сравнению с другими материалами в Al 380 происходит менее существенное повышение температуры. В материалах SS 316, SAE 8620 и EN 8 повышение температуры имеет линейную форму, низкая теплопроводность и удельная теплоемкость ответственны за большие колебания повышения температуры в SS 316. Следовательно, темпера-

тура во время обработки SS 316 повышается по мере увеличения параметров процесса. Результаты высокоскоростной обработки при высокой температуре были получены с увеличением V_c . Большая часть тепла уносится стружкой, а в заготовку уходит мало тепла. Видно, что f влияет на температуру незначительно, но постепенно температура продолжает повышаться с увеличением f . Тот же результат был получен Дессоли и др. (Dessoly et al.) [26] с использованием модели FEM и ИК-камеры. На рис. 7, а, б показано, что с увеличением f температура повышается, поскольку соприкасается большая площадь поверхности заготовки и инструмента. Алюминий имеет самый низкий предел текучести, поэтому выделение тепла в алюминии меньше по сравнению с другими материалами.

На рис. 7, в–д показано, как температура повышается с увеличением f , doc , и V_c . Увеличение f повышает температуру из-за большого контакта стружки с инструментом и связанного с ним трения [27]. В алюминии температура повышается в меньшей степени, поскольку из-за более высокой теплопроводности передача тепла происходит быстрее, благодаря чему материал остается в одном и том же состоянии повсюду, мате-

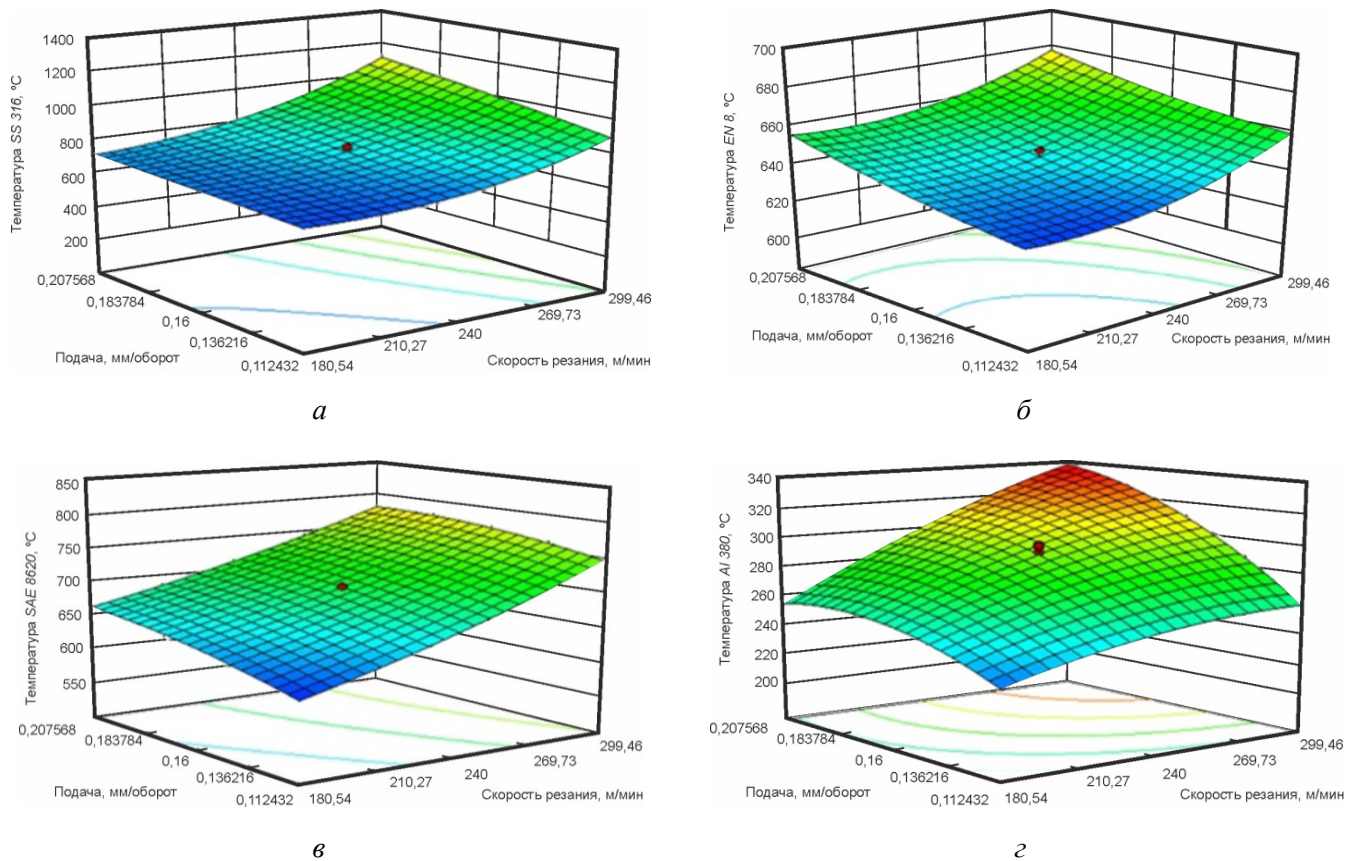


Рис. 6. Трехмерная диаграмма температуры резания материалов: SS 316 (а), EN 8 (б), SAE 8620 (в) и Al 380 (г)

Fig. 6. Cutting Temperature 3D plot for materials SS 316 (a), EN 8 (b), SAE 8620 (c) and Al 380 (d)

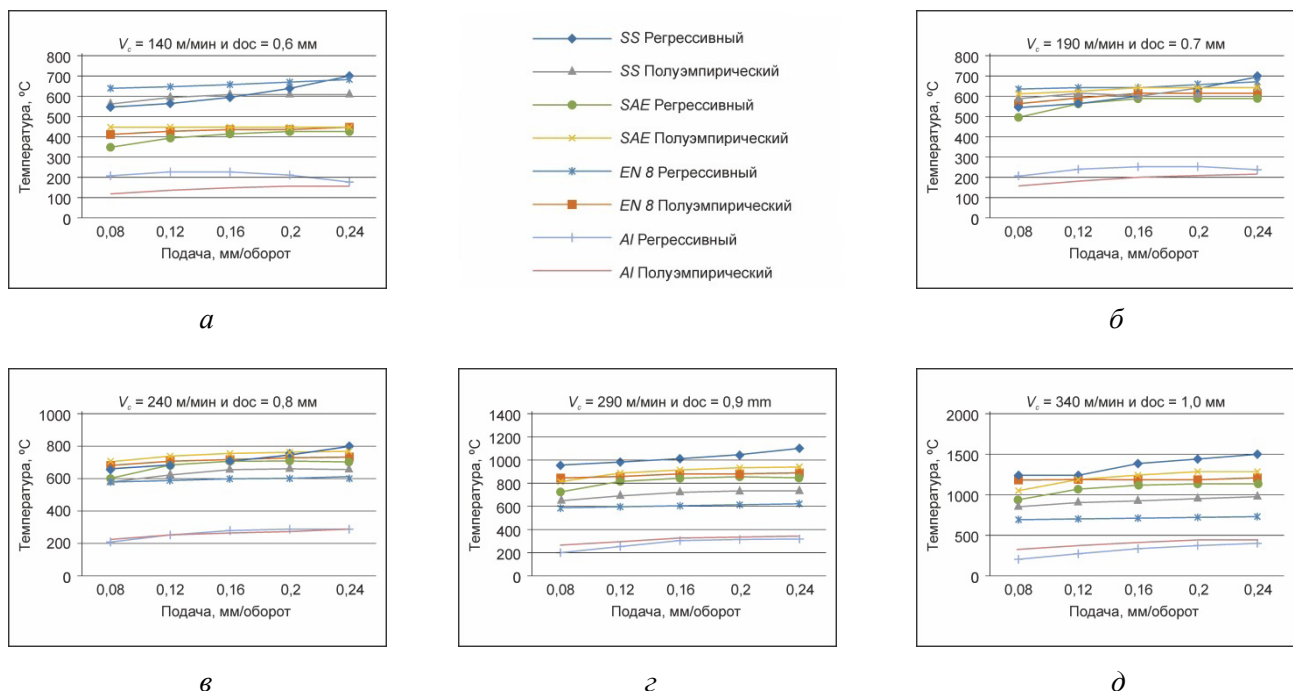


Рис. 7. Влияние подачи на температуру резания при различной скорости и глубине резания при обработке всех материалов инструментом с покрытием TiAlN

Fig. 7. Effect of Feed rate on cutting temperature at different cutting speed and depth of cut for all materials using TiAlN coated tool

риал не становится более пластичным, а трение между заготовкой и режущим инструментом уменьшается [12]. С увеличением параметров процесса температура возрастает. Китагава и др. (Kitagawa et al.) [28] использовали керамические инструменты для точения Inconel 718 и обнаружили, что температура резания продолжает повышаться с увеличением параметров процесса, поскольку обрабатываемый материал деформируется в стружку режущими инструментами. Деформация заготовки, сцепление или трение стружки о переднюю поверхность инструмента приводит к сильному нагреву [3].

С увеличением V_c температура продолжает расти. В результате качество поверхности снижается и повышается износ инструмента [1]. На рис. 8 температура резания прямо пропорциональна скорости резания. Однако это также зависит от других факторов: f , doc , ширины резания и условий работы станка [27]. На рис. 8, а–д показано влияние doc на температуру резания. Температура продолжает повышаться с увеличением doc , поскольку при максимальной подаче и doc выделяется большое количество тепла из-за трения между обрабатываемым материалом и режущим инструментом,

что приводит к термическому разупрочнению материала [29]. Согласно полуэмпирическим результатам и результатам регрессии, doc является более значимым параметром температуры, чем f и V_c [1].

На рис. 9, а–д заготовка или инструмент увеличены из-за выделяемого тепла. Температура резания сильно влияет на механические свойства заготовки и силы, действующие на заготовку и инструмент [30]. Большая часть общего тепла передается стружке, а также это общее количество тепла в потоке стружки выделяется за счет сдвига и трения на границе стружки и инструмента. Изменение doc оказывает большее влияние на температуру резки по сравнению с f и V_c [8].

На всех рисунках представлены результаты значений регрессии, взятых из эмпирической модели, и экспериментальных значений RSM для температуры и шероховатости поверхности, которые оказались сопоставимыми. Все значения выходных параметров RSM и значения эмпирической модели хорошо согласуются друг с другом. Поэтому уравнения (10) и (18) можно использовать для определения теоретического значения R_a и температуры при различных

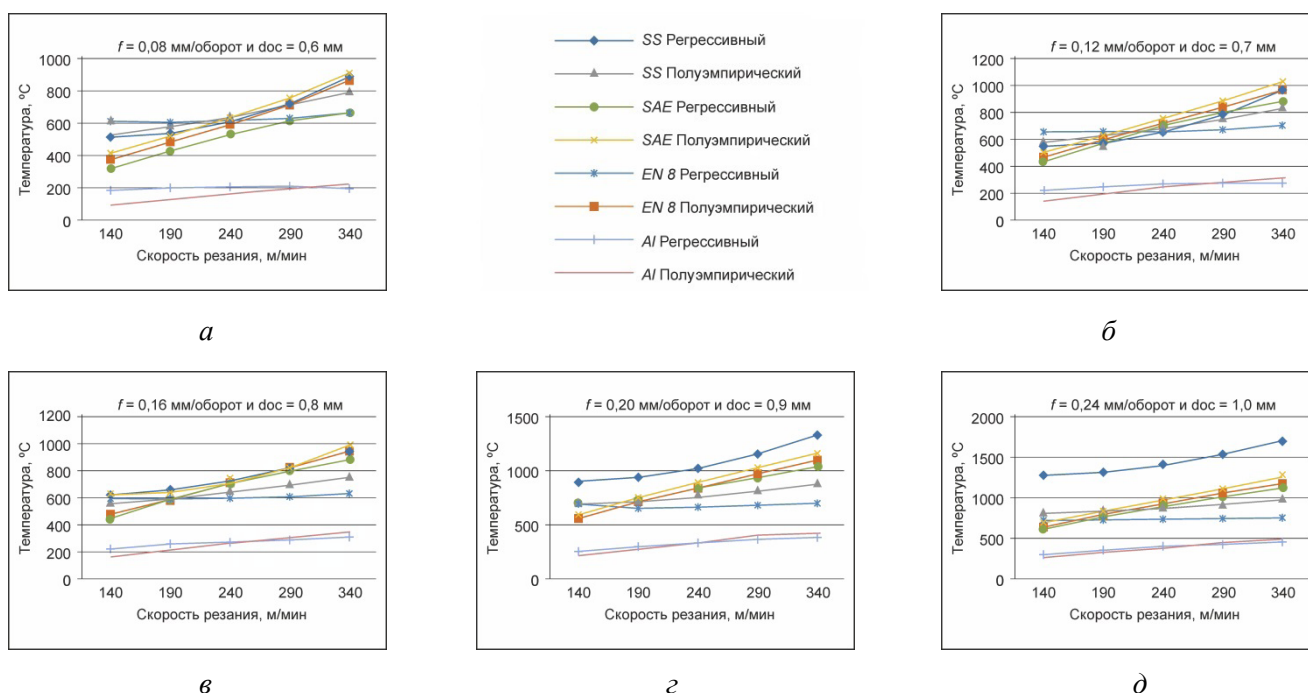


Рис. 8. Влияние скорости резания на температуру резания при различной величине подачи и глубине резания инструментом с покрытием TiAlN для всех материалов

Fig. 8. Effect of cutting speed on cutting temperature at different feed rate and depth of cut for all material using TiAlN coated tool

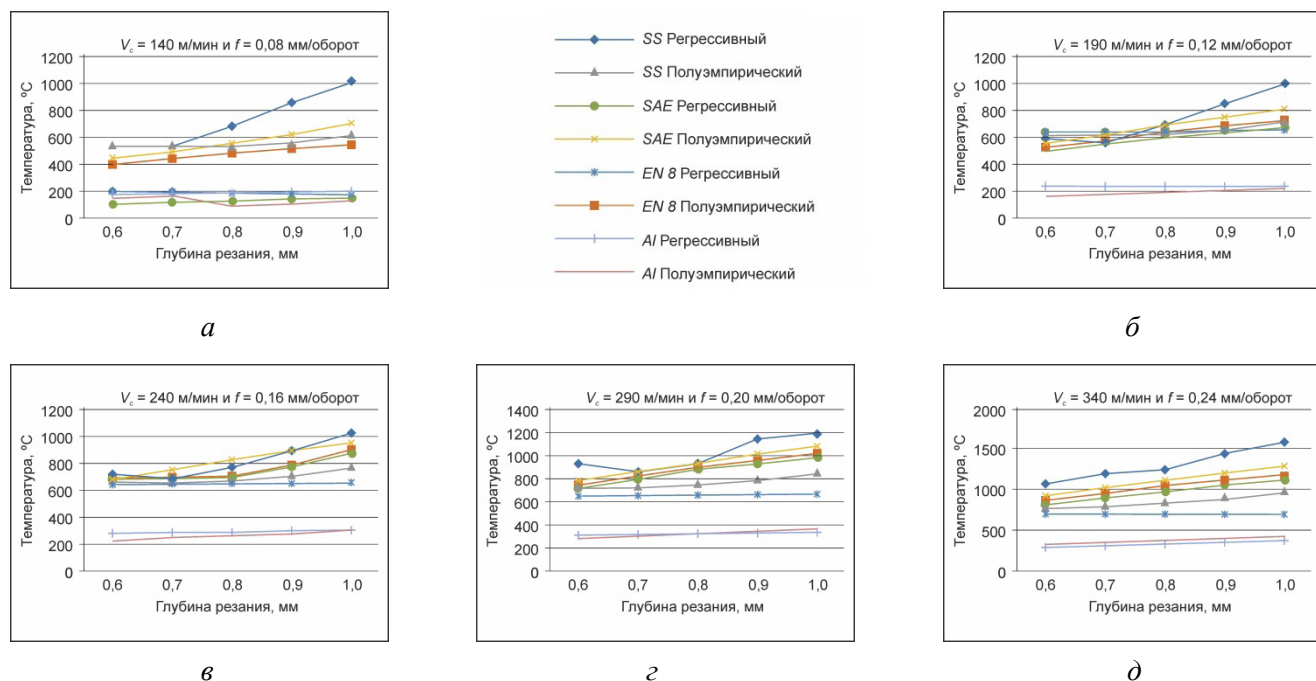


Рис. 9. Влияние глубины резания на температуру резания при различной величине подачи и скорости резания инструментом с покрытием TiAlN для всех материалов

Fig. 9. Effect of depth of cut on cutting temperature at different feed rate and cutting speed for all material using TiAlN coated tool

параметрах резания для разных обрабатываемых материалов с твердосплавными инструментальными пластинами, покрытыми TiAlN.

Выводы

Предложен полуэмпирический метод с учетом размерностей свойств материала для оценки температуры резания и шероховатости поверхности при точении заготовок из SS 316, SAE 8620, EN 8 и Al 380 твердосплавными пластинами с PVD-покрытием (TiAlN). Кроме того, был проведен мультилинейный регрессионный анализ и на основе анализа результатов регрессионной и полуэмпирической модели были сделаны следующие выводы.

- При более высокой подаче для всех материалов наблюдалась малая шероховатость поверхности. Однако по мере увеличения подачи и глубины резания шероховатость поверхности имеет тенденцию увеличиваться в большей степени при обработке SS 316, затем в случае Al 380. Материал EN 8 показывает лучшие результаты благодаря низкому выделению тепла в зоне резания, что сохраняет стабильность формы инструмента.

- Быстрое упрочнение стружки в случае SS 316, вязкость материала стружки и наростов, стабильность формы инструмента в случае EN 8 и SAE 8620 являются основной причиной качества шероховатости поверхности.

- Более высокая температура резания была получена при обработке SS 316, а более низкая температура резания – при обработке Al 380. Это объясняется существенной разницей в теплопроводности указанных материалов.

- При обработке EN 8 и SAE 8620 диапазон температур резания оказался умеренным.

- Шероховатость поверхности оказалась наихудшей при обработке Al 380 и лучшей в случае SS 316 и SAE 8620.

- Кроме того, с использованием модели анализа размерностей разрабатывается обобщенная эмпирическая формула для прогнозирования шероховатости поверхности и температуры, возникающей во время резки металла. Было обнаружено, что эти модели хорошо согласуются с уравнениями регрессии, полученными на основе экспериментальных значений.

- Предложенную методику измерения шероховатости поверхности и температуры можно удобно использовать. Это полезный способ

экономичного способа оценки тепловыделения и шероховатости поверхности при точении различных материалов твердосплавными инструментами с TiAlN-покрытием.

Список литературы

1. Empirical modelling and optimization of temperature and machine vibration in CNC hard turning / P.S. Ghosh, S. Chakraborty, A.R. Biswas, N.K. Mandal // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (5). – P. 12394–12402. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.218.
2. *Groover M.P.* Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. – 4th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 1012 p. – ISBN 978-0470-467002.
3. Cutting temperature measurement using an improved two-color infrared thermometer in turning Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools / J. Zhao, Z. Liu, B. Wang, Y. Hua, Q. Wang // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44 (15). – P. 19002–19007. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.142.
4. *Kakade H.B., Patil N.G.* Comparative investigations into high speed machining of AB titanium alloy (Ti–6Al–4V) under dry and compressed CO₂ gas cooling environment // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2018 (1). – P. 20009-1–20009-9. – DOI: 10.1063/1.5058246.
5. *Gunjal S.U., Sanap S.B., Patil N.G.* Role of cutting fluids under minimum quantity lubrication: an experimental investigation of chip thickness // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 28 (2). – P. 1101–1105. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.090.
6. *Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г.* Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка-инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.
7. Modelling of flank wear, surface roughness and cutting temperature in sustainable hard turning of AISI D2 steel / R. Kumar, A.K. Sahoo, R.K. Das, A. Panda, P.C. Mishra // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 406–413. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.059.
8. *Gosai M., Bhavsar S.N.* Experimental study on temperature measurement in turning operation of hardened steel (EN36) // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 23. – P. 311–318. – DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.032.
9. *Abhang L.B., Hameedullah M.* Chip-tool interface temperature prediction model for turning process // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2 (4). – P. 382–393.
10. *Doniavi A., Eskanderzade M., Tahmasebian M.* Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology // *Journal of Applied Sciences*. – 2007. – Vol. 7 (17). – P. 2509–2513. – DOI: 10.3923/jas.2007.2509.2513.
11. *Verma V., Kumar J., Singh A.* Optimization of material removal rate and surface roughness in turning of 316 steel by using full factorial method // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 25. – P. 793–798. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.029.
12. Investigation on surface roughness and chip reduction coefficient during turning aluminium matrix composite / D. Das, R.F. Ali, B.B. Nayak, B.C. Routara // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 5 (11). – P. 23541–23548. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.142.
13. *Bhople N., Patil N., Mastud S.* The experimental investigations into dry turning of austempered ductile iron // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 227–232. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.033.
14. Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization / H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J.F. Rigal // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45 (3). – P. 344–353. – DOI: 10.1016/j.measurement.2011.11.011.
15. *Longbottom J.M., Lanham J.D.* Cutting temperature measurement while machining – a review // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 2005. – Vol. 77 (2). – P. 122–130. – DOI: 10.1108/00022660510585956.
16. *Korkut I., Acir A., Boy M.* Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool–chip interface temperature in machining // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – Vol. 38 (9). – P. 11651–11656. – DOI: 10.1016/j.eswa.2011.03.044.
17. *Dhar N.R., Kamruzzaman M.* Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47 (5). – P. 754–759. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018.
18. *Patil N.G., Brahmankar P.K.* Semi-empirical modeling of surface roughness in wire electro-discharge machining of ceramic particulate reinforced Al matrix composites // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 280–285. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.286.
19. *Patel D.R., Kiran M.B.* A non-contact approach for surface roughness prediction in CNC turning using a linear regression model // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 26. – P. 350–355. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.029.
20. *Patel V.D., Gandhi A.H.* Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool // *Measurement*. – 2019. – Vol. 138. – P. 34–38. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.077.

21. *Rodríguez J., Munoz-Escalona P., Cassier Z.* Influence of cutting parameters and material properties on cutting temperature when turning stainless steel // *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. – 2011. – Vol. 26 (1). – P. 71–80.

22. *Rajput R.K.* A textbook of fluid mechanics and hydraulic machines. – New Delhi: S. Chand, 2004. – ISBN 9789385401374.

23. Optimization of CNC turning parameters on aluminum alloy 6063 using Taguchi Robust Design / A. Saravanakumar, S.C. Karthikeyan, B. Dhamotharan, V. Gokul kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 8290–8298. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.520.

24. *Smith W.F.* Structure and properties of engineering alloys. – New York: McGraw-Hill, 1981. – 512 p. – ISBN 0070585601. – ISBN 978-0070585607.

25. *Zou B., Chen M., Li S.* Study on finish-turning of NiCr20TiAl nickel-based alloy using Al_2O_3 /TiN-coated carbide tools // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 53 (1). – P. 81–92. – DOI: 10.1007/s00170-010-2823-z.

26. *Dessoly V., Melkote S.N., Lescallier C.* Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. –

Vol. 44 (14). – P. 1463–1470. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.05.007.

27. *Rezende B.A., Magalhaes F.C., Rubio J.C.C.* Study of the measurement and mathematical modelling of temperature in turning by means equivalent thermal conductivity // *Measurement*. – 2020. – Vol. 152. – P. 107275. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107275.

28. *Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K.* Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn // *Wear*. – 1997. – Vol. 202 (2). – P. 142–148. – DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07255-9.

29. *Pawade R.S., Joshi S.S.* Analysis of acoustic emission signals and surface integrity in the high-speed turning of Inconel 718 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2012. – Vol. 226 (1). – P. 3–27. – DOI: 10.1177/0954405411407656.

30. Prediction of surface roughness and cutting zone temperature in dry turning processes of AISI304 stainless steel using ANFIS with PSO learning / M. Aydın, C. Karakuzu, M. Uçar, A. Cengiz, M.A. Çavuşlu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 67 (1). – P. 957–967. – DOI: 10.1007/s00170-012-4540-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Semi empirical modeling of cutting temperature and surface roughness in turning of engineering materials with TiAlN coated carbide tool

Nilesh Patil^{1, a, *}, Atul Saraf^{2, b}, Atul Kulkarni^{3, c}

¹ Marathwada Institute of Technology, Aurangabad-431010, Maharashtra State, India

² National Institute of Technology, Surat, Gujarat 395007, India

³ Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune – 411048, Maharashtra, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-4884-4267>, nileshgpatil@rediffmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-4776-6874>, atul.saraf001@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, atul.kulkarni@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 September 2023

Revised: 31 October 2023

Accepted: 22 January 2024

Available online: 15 March 2024

Keywords:

Semi-empirical model

Regression model

Temperature

Surface roughness

Introduction. In manufacturing, obtaining a given surface roughness of the machined parts is of great importance to fulfill functional requirements. However, the surface roughness significantly affected by the heat generated during the machining process, which can lead to a decrease in dimensional accuracy. The surface roughness significantly affects the fatigue characteristics of the part, and the service life of the cutting tool is determined by the cutting temperature generation. **The purpose of the work.** The purpose of this study is to create semi-empirical models for predicting surface roughness and temperature of various work materials. Enhanced cutting performance is achieved by accurately determining the cutting temperature in the machined zone. However, calculating the cutting temperature for each specific case is fraught with difficulties in terms of labor resources and financial investments. This paper presents a comprehensive empirical formula designed to predict both theoretical temperature and surface roughness. **Methodology.** The performance of the surface roughness and temperature generation was evaluated for the EN 8, Al 380, SS 316 and SAE 8620 materials when processed with TiAlN-coated carbide tools. The TiAlN coating was obtained by Physical Vapor Deposition (PVD) technique. Response surface methodology was used to prepare predictive models. Cutting speed (from 140 to 340 m/min), feed (from 0.08 to 0.24 mm/rev) and depth of cut (from 0.6 to 1 mm) were used as input parameters to measure the characteristics of all materials in terms of surface roughness and cutting temperature. The tool-work thermocouple principle was used to measure the temperature at the chip-tool interface. Novel Calibration Setup was developed to establish the relationship between the Electromotive Force (EMF) generated during machining and the cutting temperature. **Results and Discussion.** It is observed that the energy required for mechanical processing was largely converted into heat. The highest cutting temperature is recorded with SS 316, followed by SAE 8620 and EN 8. However, low temperature was reported during machining of Al 380 and it was mainly governed by the thermal conductivity of the material. The lowest surface roughness is observed for SAE 8620, EN 8, followed by SS 316 and Al 380. The semi-empirical method and regression model equations are in good agreement with each other. Statistical analysis of the nonlinear evaluation reveals that cutting speed, feed rate, and material density have a greater influence on the surface roughness, whereas depth of cut has a greater influence on the temperature change. The study will be very useful for predicting industrial performance when machining EN 8, Al 380, SS 316 and SAE 8620 materials with TiAlN-coated carbide tools.

For citation: Patil N.G., Saraf A.R., Kulkarni A.P Semi empirical modeling of cutting temperature and surface roughness in turning of engineering materials with TiAlN coated carbide tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 155–174. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-155-174. (In Russian).

References

1. Ghosh P.S., Chakraborty S., Biswas A.R., Mandal N.K. Empirical modelling and optimization of temperature and machine vibration in CNC hard turning. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (5), pp. 2394–12402. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.218.

* Corresponding author

Kulkarni Atul P., Ph.D. (Engineering), Professor
Vishwakarma Institute of Information Technology,
Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk),
Pune – 411048, Maharashtra, India
Tel.: 91-2026950419, e-mail: atul.kulkarni@viit.ac.in

2. Groover M.P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 4th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 1012 p. ISBN 978-0470-467002.
3. Zhao J., Liu Z., Wang B., Hua Y., Wang Q. Cutting temperature measurement using an improved two-color infrared thermometer in turning Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools. *Ceramics International*, 2018, vol. 44 (15), pp. 19002–19007. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.142.
4. Kakade H.B., Patil N.G. Comparative investigations into high speed machining of AB titanium alloy (Ti-6Al-4V) under dry and compressed CO₂ gas cooling environment. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2018 (1), pp. 20009-1–20009-9. DOI: 10.1063/1.5058246.
5. Gunjal S.U., Sanap S.B., Patil N.G. Role of cutting fluids under minimum quantity lubrication: an experimental investigation of chip thickness. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 28 (2), pp. 1101–1105. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.090.
6. Kulkarni A.P., Chincharikar S., Sargade V.G. Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 47–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64. (In Russian).
7. Kumar R., Sahoo A.K., Das R.K., Panda A., Mishra P.C. Modelling of flank wear, surface roughness and cutting temperature in sustainable hard turning of AISI D2 steel. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 406–413. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.059.
8. Gosai M., Bhavsar S.N. Experimental study on temperature measurement in turning operation of hardened steel (EN36). *Procedia Technology*, 2016, vol. 23, pp. 311–318. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.032.
9. Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-tool interface temperature prediction model for turning process. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (4), pp. 382–393.
10. Doniavi A., Eskanderzade M., Tahmasebian M. Empirical modeling of surface roughness in turning process of 1060 steel using factorial design methodology. *Journal of Applied Sciences*, 2007, vol. 7 (17), pp. 2509–2513. DOI: 10.3923/jas.2007.2509.2513.
11. Verma V., Kumar J., Singh A. Optimization of material removal rate and surface roughness in turning of 316 steel by using full factorial method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 25, pp. 793–798. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.029.
12. Das D., Ali R.F., Nayak B.B., Routara B.C. Investigation on surface roughness and chip reduction coefficient during turning aluminium matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 5 (11), pp. 23541–23548. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.142.
13. Bhople N., Patil N., Mastud S. The experimental investigations into dry turning of austempered ductile iron. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 227–232. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.033.
14. Aouici H., Yaltese M.A., Chaoui K., Mabrouki T., Rigal J.F. Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 2012, vol. 45 (3), pp. 344–353. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.11.011.
15. Longbottom J.M., Lanham J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, vol. 77 (2), pp. 122–130. DOI: 10.1108/00022660510585956.
16. Korkut I., Acir A., Boy M. Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool-chip interface temperature in machining. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38 (9), pp. 11651–11656. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.03.044.
17. Dhar N.R., Kamruzzaman M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47 (5), pp. 754–759. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018.
18. Patil N.G., Brahmanekar P.K. Semi-empirical modeling of surface roughness in wire electro-discharge machining of ceramic particulate reinforced Al matrix composites. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 280–285. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.286.
19. Patel D.R., Kiran M.B. A non-contact approach for surface roughness prediction in CNC turning using a linear regression model. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pp. 350–355. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.029.
20. Patel V.D., Gandhi A.H. Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool. *Measurement*, 2019, vol. 138, pp. 34–38. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.077.
21. Rodríguez J., Muñoz-Escalona P., Cassier Z. Influence of cutting parameters and material properties on cutting temperature when turning stainless steel. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 2011, vol. 26 (1), pp. 71–80.

22. Rajput R.K. *A textbook of fluid mechanics and hydraulic machines*. New Delhi, S. Chand, 2004. ISBN 9789385401374.
23. Saravanakumar A., Karthikeyan S.C., Dhamotharan B., Gokul kumar V. Optimization of CNC turning parameters on aluminum alloy 6063 using Taguchi Robust Design. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (2), pp. 8290–8298. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.520.
24. Smith W.F. *Structure and properties of engineering alloys*. New York, McGraw-Hill, 1981. 512 p. ISBN 0070585601. ISBN 978-0070585607.
25. Zou B., Chen M., Li S. Study on finish-turning of NiCr20TiAl nickel-based alloy using $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ -coated carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 53 (1), pp. 81–92. DOI: 10.1007/s00170-010-2823-z.
26. Dessoly V., Melkote S.N., Lescallier C. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44 (14), pp. 1463–1470. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.05.007.
27. Rezende B.A., Magalhaes F.C., Rubio J.C.C. Study of the measurement and mathematical modelling of temperature in turning by means equivalent thermal conductivity. *Measurement*, 2020, vol. 152, pp. 107275. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107275.
28. Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn. *Wear*, 1997, vol. 202 (2), pp. 142–148. DOI: 10.1016/S0043-1648(96)07255-9.
29. Pawade R.S., Joshi S.S. Analysis of acoustic emission signals and surface integrity in the high-speed turning of Inconel 718. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, vol. 226 (1), pp. 3–27. DOI: 10.1177/0954405411407656.
30. Aydın M., Karakuzu C., Uçar M., Cengiz A., Çavuşlu M.A. Prediction of surface roughness and cutting zone temperature in dry turning processes of AISI304 stainless steel using ANFIS with PSO learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67 (1), pp. 957–967. DOI: 10.1007/s00170-012-4540-2.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).