



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Моделирование рабочих характеристик и мультикритериальная оптимизация при токарной обработке нержавеющей стали AISI 304 (12X18H10T) резцами с износостойким покрытием и с износостойким покрытием, подвергнутым микропескоструйной обработке

Сатиш Чинчаникар^{a, *}, Махендра Гейдж^b

Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне - 411039, Махараштра, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchaniakar@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8603-8653>, Mahendra.gadge@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

История статьи:

Поступила: 15 августа 2023

Рецензирование: 05 сентября 2023

Принята к печати: 09 сентября 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

Ключевые слова:

AISI 304 (12X18H10T)

Сила резания

Срок службы инструмента

Резцы с износостойким покрытием

Шероховатость поверхности

Мультикритериальная оптимизация

АННОТАЦИЯ

Введение. Высокоскоростная механическая обработка нержавеющей стали уже давно находится в центре внимания исследований. Из-за таких характеристик, как низкая теплопроводность и склонность к деформационному упрочнению, сталь AISI 304 трудно обрабатывать механически. Индикаторы обрабатываемости дают важную информацию об эффективности и результативности процесса обработки, позволяя производителям оптимизировать параметры обработки для повышения производительности и точности. **Цель работы.** Для обработки нержавеющей стали AISI 304 чаще всего используют твердосплавные инструменты с покрытием. Между тем в немногих исследованиях изучалось влияние предварительной и постобработки твердосплавных инструментов с покрытием при высокоскоростном точении этих сплавов. Кроме того, лишь небольшое количество исследований одновременно оптимизировали параметры резания при использовании инструментов с предварительной и последующей обработкой. **Методы исследования.** В настоящей работе проводится сравнительная оценка эффективности резцов с износостойким покрытием, а также с износостойким покрытием на пескоструйной основе при точении нержавеющей стали AISI 304. Использовали резцы с двумя типами покрытий: 1) с покрытием AlTiN, нанесенным осаждением паров PVD-AlTiN; 2) с покрытием AlTiN, нанесенным осаждением паров (PVD-AlTiN) с микропескоструйной обработкой в качестве последующей обработки (покрытием на пескоструйной основе); 3) с покрытием TiCN/Al₂O₃, нанесенным умеренно-температурным химическим осаждением из газовой фазы (MTCVD-TiCN/Al₂O₃). Для прогнозирования и оптимизации характеристик токарной обработки были разработаны математические модели, основанные на экспериментальных данных. **Результаты и обсуждение.** В этом исследовании было обнаружено, что инструменты с покрытием PVD-AlTiN имеют самую низкую силу резания и обеспечивают низкую шероховатость поверхности; за ними следуют инструменты с покрытием PVD-AlTiN, подвергнутые микропескоструйной обработке, и инструменты с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃. Однако существенных различий при обработке инструментами с износостойкими покрытиями и покрытиями, подвергшимися микропескоструйной обработке, не наблюдалось. Было обнаружено, что сила резания увеличивается с увеличением подачи и глубины резания, но уменьшается со скоростью резания. Однако этот эффект был существенным для инструментов с покрытием MTCVD. С другой стороны, больший срок службы характерен для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃; на втором месте – инструменты с покрытием PVD-AlTiN и инструменты с покрытием PVD-AlTiN, подвергнутые микропескоструйной обработке. Срок службы инструмента во многом зависит от скорости резания. Однако для инструментов с покрытием PVD-AlTiN этот эффект проявляется более заметно. Модели с коэффициентами корреляции выше 0,9 можно использовать для прогнозирования реакции при точении нержавеющей стали AISI 304. Оптимизационный анализ позволил выявить, что при точении нержавеющей стали AISI 304 инструментами с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ и силой резания 18–27 Н минимальная шероховатость поверхности составляет 0,3–0,44 мкм, а срок службы инструмента выше 36–51 мин по сравнению с инструментами с покрытием PVD-AlTiN (C) и инструментами с покрытием PVD-AlTiN, подвергнутыми микропескоструйной обработке (CMB).

Для цитирования: Чинчаникар С., Гейдж М.Г. Моделирование рабочих характеристик и мультикритериальная оптимизация при токарной обработке нержавеющей стали AISI 304 (12X18H10T) резцами с износостойким покрытием и с износостойким покрытием, подвергнутым микропескоструйной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 117–135. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135.

Введение

Высокоскоростная механическая обработка нержавеющей стали уже давно находится в центре внимания исследований. Из-за таких характеристик, как низкая теплопроводность и склонность к деформационному упрочнению, сталь

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, к.т.н., профессор

Институт информационных технологий Вишвакармы,

Кондва (Бадрек), Пуне - 411039, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950441, e-mail: satish.chinchaniakar@viit.ac.in

AISI 304 трудно обрабатывать механически. Один из наиболее строгих индикаторов эффективности и результативности процесса обработки – это срок службы инструмента.

Хе и др. (He et al.) [1] показали, что температура резания инструмента с покрытием TiN была ниже, чем у инструмента без покрытия, и увеличивалась с увеличением параметров резания. Рао и др. (Rao et al.) [2] многопланово оптимизировали скорость съема материала и шероховатость во время токарной обработки стали SS 304. Кулкарни и др. (Kulkarni et al.) [3] заметили, что скорость резания значительно влияет на температуру поверхности раздела стружки и инструмента, а подача сильно влияет на силы резания во время точения стали SS 304. По данным Боузид и др. (Bouzid et al.) [4], при точении стали AISI 304 инструментами с покрытием $Ti(C,N)/Al_2O_3/TiN$ основным фактором, влияющим на износ по задней поверхности, была в первую очередь продолжительность резания, а затем – скорость резания.

Исследование Шарма (Sharma) и Гупта (Gupta) [5] показало, что твердосплавные инструменты с покрытием TiAlN/TiN значительно снижают износ инструмента и шероховатость во время токарной обработки стали SS 304. Пател и др. (Patel et al.) [6] заметили, что на механические свойства и производительность обработки влияет микроструктура металлокерамических инструментов. Дубовска и др. (Dubovska et al.) [7] провели исследование срока службы твердосплавных инструментов при точении аустенитной нержавеющей стали AISI 304. Шарма и др. (Sharma et al.) [8] реализовали точение стали AISI 304 с использованием гибридных наножилок при минимальном количестве смазки. В ходе их исследования были разработаны модели сил и шероховатости поверхности. Рао и др. (Rao et al.) [9] оптимизировали шероховатость поверхности с помощью алгоритма дифференциальной эволюции (ДЭ) при точении стали SS 304.

Чен и др. (Chen et al.) [10] точили сталь SS 304 с помощью инструментов, покрытых твердыми CrWN-пленками. Их исследование оптимизировало производительность с помощью алгоритма реляционного анализа «серых» систем (GRA). Патил и др. (Patil et al.) [11] оценили криогенно обработанные и необработанные твердосплав-

ные режущие инструменты для токарной обработки стали AISI 304. Меньшая шероховатость поверхности и износ инструмента наблюдались у криогенно обработанных инструментов. При точении стали SS 304 Сингх и др. (Singh et al.) [12] обнаружили, что скорость резания является доминирующим фактором, влияющим на шероховатость поверхности и глубину резания, а взаимодействие скорости резания и подачи существенно влияет на износ по задней поверхности.

Любис и др. (Lubis et al.) [13] получили данные о сроке службы инструмента и проанализировали износ инструментов с покрытием при точении нержавеющей стали AISI 304. Хан и др. (Khan et al.) [14] провели исследование влияния сверл с обработанной поверхностью и покрытием AlCrN на сверление стали SS 304 при различных скоростях резания. Беди и др. (Bedi et al.) [15] наблюдали лучшие результаты при обработке стали SS 304 с маслом из рисовых отрубей, чем с кокосовым маслом. Ратход и др. (Rathod et al.) [16] оптимизировали токарную обработку стали SS 304 твердосплавными резцами с покрытием, используя методы Тагу-чи и TOPSIS. Сивайя и др. (Sivaiah et al.) [17] проанализировали производительность инструментов с микроканавками при точении стали AISI 304. Текстурированные инструменты работали лучше по сравнению с нетекстурированными. Моганаприя и др. (Moganapriya et al.) [18] обнаружили улучшение производительности инструментов с покрытием TiAlSiN при обработке стали SS 304.

Группа исследователей оценила температуру на поверхности раздела «стружка – инструмент» во время обработки SS 304 [19–20]. Экспериментальные результаты показали значительное влияние скорости резания на температуру, возникающую во время обработки. Пател и др. (Patel et al.) [21] обнаружили, что на срок службы металлокерамических инструментов с покрытием на основе Ti существенное влияние оказывают составы покрытия. Озбек и др. (Özbek et al.) [22] обнаружили, что во время мокрого точения стали AISI 304 скорость подачи оказывает существенное влияние на износ инструмента и шероховатость поверхности.

Согласно анализу литературных данных, инструменты с покрытием чаще всего использовались исследователями для обработки нержавеющей

щей стали AISI 304. Между тем лишь немногие исследователи изучали влияние твердосплавных инструментов с покрытием до и после обработки при точении этих сплавов на высоких скоростях. Кроме того, лишь небольшое количество исследований было посвящено одновременной оптимизации параметров резания для повышения производительности обработки при использовании инструментов с предварительной и последующей обработкой. По этой причине в настоящем исследовании сравнивается и противопоставляется эффективность инструментов с износостойкими покрытиями и покрытиями, подвергшимися микропескоструйной обработке, при точении нержавеющей стали

AISI 304. Оценены обрабатывающие возможности инструментов с однослойным покрытием PVD-AlTiN, а также покрытием PVD-AlTiN, подвергнутому микропескоструйной обработке, и многослойным покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃. Для прогнозирования и улучшения характеристик точения были созданы экспериментально обоснованные модели.

Материалы и методы исследования

Эксперименты по точению проводились на прутке из нержавеющей стали AISI 304 диаметром 70 мм и длиной 500 мм. Химический состав материала приведен в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Процентный состав AISI 304
Percentage composition of AISI 304

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0,033	0,88	1,98	0,037	0,013	18,37	8,82	0,11	Остальное

На рис. 1 изображен высокоточный токарный станок с ЧПУ, применявшийся для экспериментов. Для исследования характеристик механической обработки в сухих условиях были проведены эксперименты с использованием однослойного покрытия PVD-AlTiN (далее называемого «покрытие»), однослойного покрытия, подвергнутого микропескоструйной обработке в качестве последующей обработки (далее называемого «покрытие с микропескоструйной обработкой»), и с многослойным покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (далее MTCVD). Через равные промежутки времени по длине разреза наблюдался износ по задней поверхности. На основании результатов пилотных испытаний, обзора литературы и рекомендаций производителя были выбраны параметры резки.

На твердосплавные пластины без покрытия, маркированные в соответствии с ISO как CNMG120408MS, методом физического осаждения из газовой фазы было нанесено покрытие из нитрида алюминия и титана (AlTiN) с учетом предварительной и последующей обработки, как описано в табл. 1. Пластины CNMG120408 ромбовидной формы с углом 80° и радиусом закру-

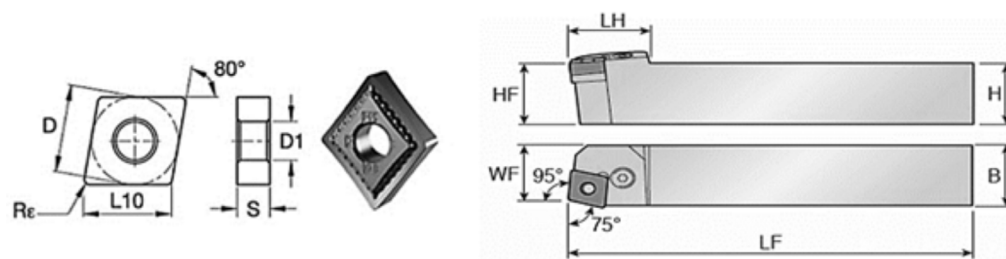


Рис. 1. Экспериментальная установка

Fig. 1. Experimental set-up

пления вершины 0,8 мм жестко закреплялись на державке, маркированной в соответствии с ISO как PCBNR2525M12 (рис. 2).

Параметры обработки были выбраны после тщательного изучения литературы, обзора каталогов и поисковых экспериментов. Матрица эксперимента представлена в табл. 2. Износ по боковой поверхности измерялся с помощью цифрового микроскопа Dino-Lite. Срок службы инструмента (T) получен при износе по задней поверхности 0,2 мм. На надежном высокоточном токарном станке с ЧПУ проводились эксперименты по продольному точению. Динамо-



Параметр	Параметры пластины					Параметры державки					
	D	L10	D1	S	Rε	HF	H	B	LF	LH	WF
Ед. измерения (мм)	12,7	12,9	5,16	4,76	0,8	25	25	25	150	28	22,5

Рис. 2. Параметры режущей пластины и державки инструмента

Fig. 2. Details of cutting insert and tool holder

Таблица 2

Table 2

Матрица эксперимента для нержавеющей стали *AISI 304* (V – скорость резания; f – подача; d – глубина резания)

Experimental matrix for *AISI 304* stainless steel (V : Cutting speed, f : Feed, and d : Depth of cut)

Параметры	Эксперимент														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V , м/мин	300	350	350	250	250	300	300	300	200	400	350	250	350	250	300
f , мм/оборот	0,1	0,08	0,12	0,08	0,12	0,05	0,1	0,15	0,1	0,1	0,08	0,12	0,12	0,08	0,1
D , мм	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1

метр токарного станка тензорезисторного типа использовался для измерения тангенциальной силы (F_c), силы подачи (F_f) и радиальной силы (F_r) во время процесса обработки. Тестер Taylor Hobson Surfronic использовался для оценки шероховатости поверхности.

Результаты и их обсуждение

Эксперименты по точению проводили на токарном станке с числовым программным управлением в режимах, приведенных в табл. 2. Измеряли шероховатость поверхности, три компонента силы резания – F_c , F_f и F_r , и стойкость инструмента T до тех пор, пока износ по боковой поверхности не достигал 0,2 мм. Результаты экспериментов с различными инструментами, а именно с покрытием PVD-AlTiN (C), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD), представлены в табл. 3.

Моделирование рабочих характеристик

Экспериментально обоснованные математические модели были созданы для рассмотренных в этом исследовании различных инструментов, чтобы лучше понять характеристики токарной обработки. С использованием программного обеспечения DataFit были созданы уравнения регрессии и рассчитаны значения их коэффициентов. Разработанные математические модели представлены в табл. 4, 5 и 6 для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (C), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) соответственно.

Разработанные модели имеют значения величины достоверности аппроксимации ближе к 0,95, что указывает на их надежность в прогнозировании ответов на основе пропорции изменения точек данных во время точения стали SS 304 при использовании инструментов с покрытием PVD-AlTiN (C) (уравнения 1–5),

Таблица 3

Table 3

Результаты экспериментов по точению стали AISI 304 различными инструментами
Experimental results in turning AISI 304 with different tools

Экспе- римент	Инструмент с покрытием PVD-AlTiN (C)					Инструмент с покрытием PVD-AlTiN после микропескоструй- ной обработки (CMB)					Инструмент с покрытием MTCVD-TiCN/Al ₂ O ₃ (MTCVD)				
	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин
1	108	44	17	0,93	8,1	118	48	21	0,88	9,81	111	55	26	1,14	18,4
2	69	27	15	0,62	10,3	69	33	16	0,57	11,2	78	38	21	0,69	14,4
3	98	41	16	0,68	7,6	98	43	21	0,74	6,8	118	53	26	0,85	9,3
4	78	31	16	0,72	14,4	88	36	17	0,77	16,4	98	40	22	0,85	21,3
5	88	51	18	0,87	11,2	137	51	23	0,96	11,1	137	56	27	1,05	14,3
6	59	22	13	0,47	18,1	49	18	12	0,45	19,5	49	22	17	0,55	24,6
7	69	33	14	0,65	12,6	69	35	18	0,65	13,9	88	40	24	0,74	18,8
8	88	47	17	0,83	10,4	98	46	26	0,81	10,3	121	59	34	0,97	14,6
9	78	34	16	0,96	15,1	88	38	20	0,93	15,9	98	45	26	0,99	22,1
10	59	29	15	0,42	6,8	69	33	18	0,50	7,2	78	40	23	0,62	9,4
11	48	19	11	0,39	14,8	39	22	14	0,42	16,4	39	29	21	0,47	18,6
12	61	33	14	0,66	15,3	59	40	19	0,70	16,3	78	40	27	0,72	20,8
13	56	31	13	0,51	10,6	59	33	18	0,52	11,8	59	45	26	0,65	15,7
14	54	23	12	0,57	17,6	39	28	14	0,61	21,8	49	28	22	0,62	26,6
15	39	17	10	0,37	16,4	29	24	13	0,40	17,4	29	23	21	0,46	22,6

Таблица 4

Table 4

Математические модели для инструмента с покрытием PVD-AlTiN (C)
Mathematical models for PVD-AlTiN coated (C) tool

Отклик	Разработанная модель	Величина достоверности аппроксимации	№ урав- нения
Тангенциальная составляющая силы (F_c)	$= 1271,76V^{-0,195} f^{0,426} d^{0,652}$	0,92	(1)
Сила подачи (F_f)	$= 3218,4V^{-0,321} f^{0,913} d^{0,547}$	0,95	(2)
Радиальная составляющая силы (F_r)	$= 121,93V^{-0,192} f^{0,263} d^{0,350}$	0,91	(3)
Шероховатость поверхности ()	$= 620,52V^{-0,902} f^{0,482} d^{0,5130}$	0,93	(4)
Срок службы инструмента (T)	$= 231,25V^{-0,853} f^{-0,618} d^{-0,371}$	0,91	(5)

с покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) (уравнения 6–10) и с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) (уравнения 11–15).

Далее для лучшего понимания на основании разработанных моделей построены графики сил резания (рис. 3–5), шероховатости поверхности (рис. 6) и срока службы инструмента (рис. 7),

Таблица 5

Table 5

Математические модели для инструмента с покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB)

Mathematical models for PVD-AlTiN coated-microblasted (CMB) tool

Отклик	Разработанная модель	Величина достоверности аппроксимации	№ уравнения
Тангенциальная составляющая силы (F_c)	$= 38\,002,71V^{-0,559}f^{0,821}d^{0,980}$	0,96	(6)
Сила подачи (F_f)	$= 2445,18V^{-0,333}f^{0,786}d^{0,432}$	0,95	(7)
Радиальная составляющая силы (F_r)	$= 369,13V^{-0,171}f^{0,739}d^{0,272}$	0,97	(8)
Шероховатость поверхности (R_a)	$= 543,49V^{-0,866}f^{0,524}d^{0,470}$	0,98	(9)
Срок службы инструмента (T)	$= 141,73V^{-0,754}f^{-0,647}d^{-0,348}$	0,92	(10)

Таблица 6

Table 6

Математические модели для инструмента с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD)

Mathematical models for MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated (MTCVD) tool

Отклик	Разработанная модель	Величина достоверности аппроксимации	№ уравнения
Тангенциальная составляющая силы (F_c)	$= 29\,772,68V^{-0,485}f^{0,932}d^{0,819}$	0,96	(11)
Сила подачи (F_f)	$= 927,66V^{-0,093}f^{0,874}d^{0,463}$	0,97	(12)
Радиальная составляющая силы (F_r)	$= 250,89V^{-0,142}f^{0,618}d^{0,079}$	0,92	(13)
Шероховатость поверхности (R_a)	$= 153,75V^{-0,602}f^{0,523}d^{0,554}$	0,95	(14)
Срок службы инструмента (T)	$= 551,62V^{-0,917}f^{-0,579}d^{-0,324}$	0,91	(15)

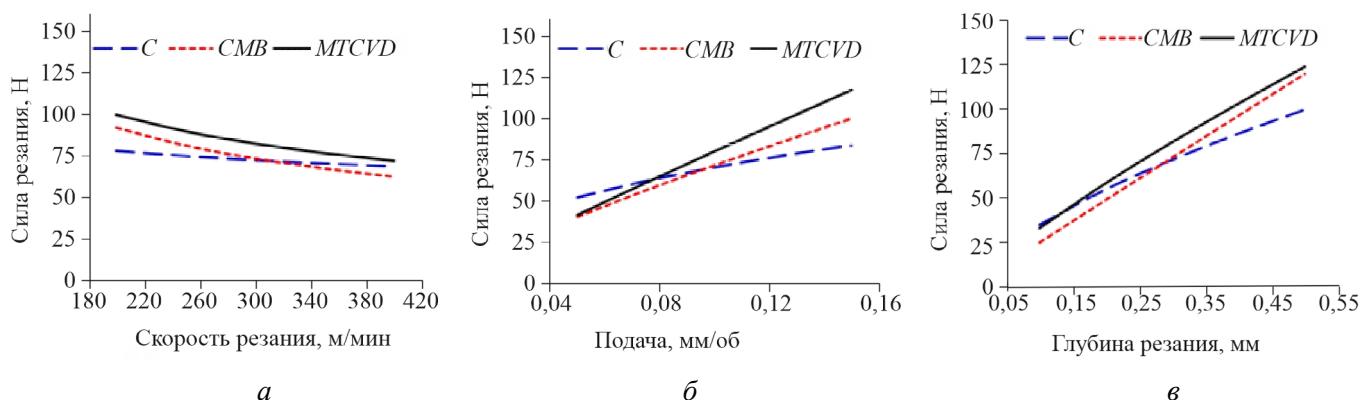


Рис. 3. Сила резания для различных инструментов, изменяющаяся в зависимости от V (а), f (б) и d (в)

Fig. 3. Tangential force (F_c) for different tools varying with (a) V , (б) f , and (в) d

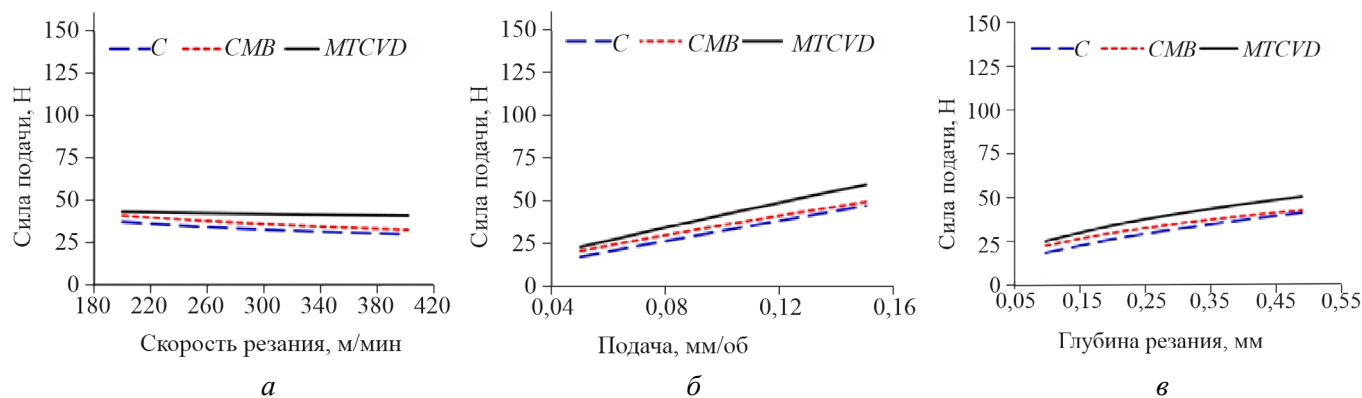


Рис. 4. Сила подачи для различных инструментов, изменяющаяся в зависимости от V (а), f (б) и d (в)

Fig. 4. Feed force (F_f) for different tools varying with (а) V , (б) f , and (в) d

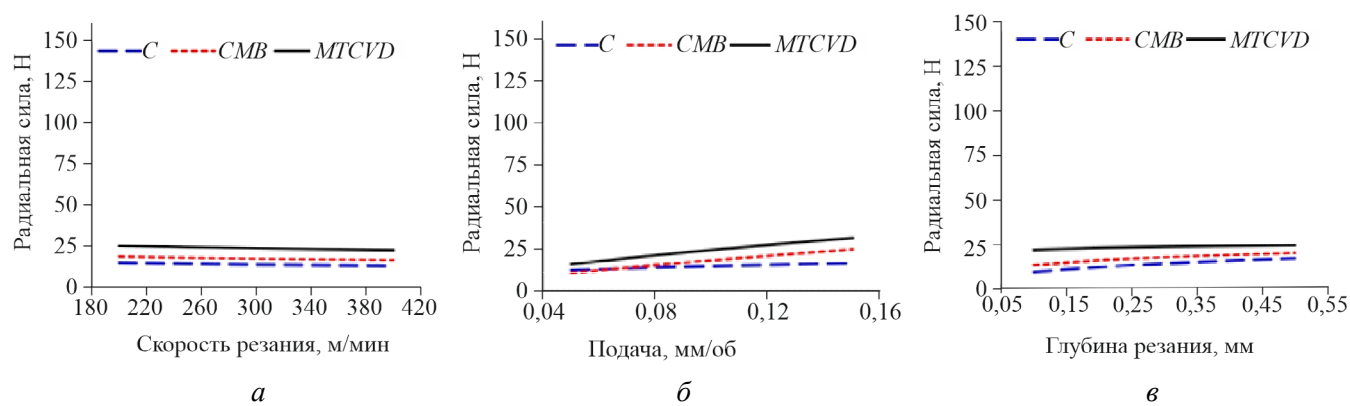


Рис. 5. Радиальная сила F_r , меняющаяся в зависимости от V (а), f (б), и d (в)

Fig. 5. Radial force (F_r) varying with (а) V , (б) f , and (в) d

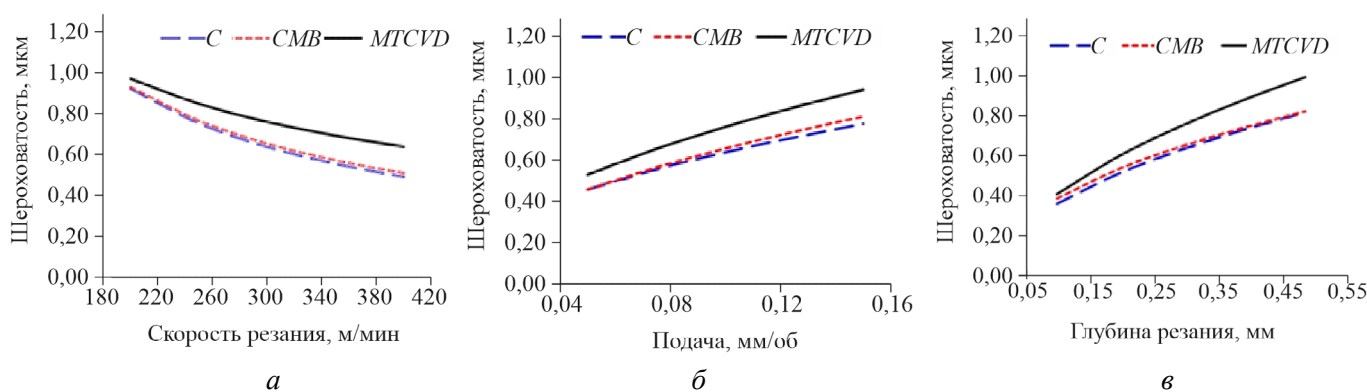


Рис. 6. Шероховатость поверхности R_a , меняющаяся в зависимости от V (а), f (б), и d (в)

Fig. 6. Surface roughness (R_a) varying with (а) V , (б) f , and (в) d

изменяющихся в зависимости от параметров резания для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (C), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). На рис. 3, а показаны силы резания для инструментов с различными покрытиями, изменяющиеся в зави-

симости от скорости резания при $f = 0,1$ мм/об и $d = 0,3$ мм соответственно. Видно, что силы резания уменьшаются с увеличением скорости резания. Это можно объяснить тем, что увеличение скорости резания повышает температуру резания, делая материал мягким и снижая силу резания. Меньшие силы резания наблюдаются

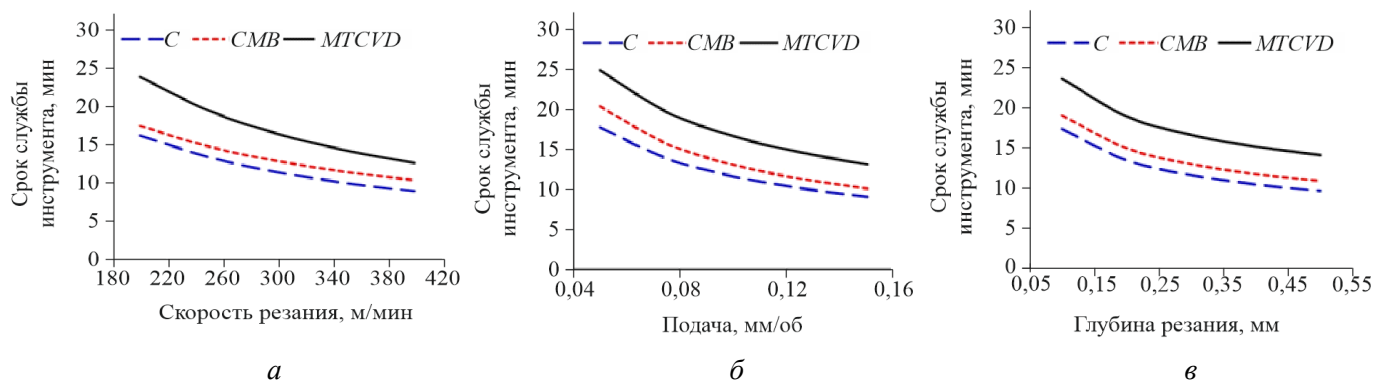


Рис. 7. Срок службы инструмента T , меняющийся в зависимости от V (*a*), f (*б*), и d (*в*)

Fig. 7. Tool life (T) varying with (*a*) V , (*б*) f , and (*в*) d

для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*), а более высокие – для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). Однако заметной разницы в тангенциальной составляющей силы резания для разных инструментов не наблюдается.

На рис. 3, *б* показаны силы резания, которые изменяются в зависимости от подачи для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) при $V = 300$ м/мин и $d = 0,3$ мм. На рис. 3, *в* показаны силы резания для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD), изменяющиеся в зависимости от глубины резания при $V = 300$ м/мин и $f = 0,1$ мм/об соответственно.

Силы резания возрастают с увеличением подачи и глубины резания, при этом для инструментов с покрытием MTCVD этот эффект более выражен, чем для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*) и покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB). Меньшие силы резания при использовании инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*) и покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) можно объяснить более низким коэффициентом трения и более острым радиусом кромки инструмента с однослойным покрытием PVD-AlTiN по сравнению с инструментами с многослойным покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). Явление более низкого трения для инструментов с покрытием PVD-AlTiN приводит к меньшей силе резания по сравнению с инструментами с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃.

На рис. 4, *a* и 5, *a* графически представлена зависимость силы подачи и радиальной составляющей силы резания от скорости резания для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) при $f = 0,1$ мм/об и $d = 0,3$ мм соответственно. На рис. 4, *б* и 5, *б* графически представлена зависимость силы подачи и радиальной силы от величины подачи при $V = 300$ м/мин и $d = 0,3$ мм. На рис. 4, *в* и 5, *в* графически представлена зависимость силы подачи и радиальной силы резания от глубины резания для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) при $V = 300$ м/мин и $f = 0,1$ мм/об соответственно.

Можно заметить, что силы подачи увеличиваются с увеличением подачи и глубины резания и незначительно зависят от скорости резания. Меньшие усилия подачи наблюдаются для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (*C*) и более высокие усилия – для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). Однако заметной разницы в силе подачи для инструментов с покрытием и инструментов с микропескоструйной обработкой не наблюдается. Можно заметить, что на радиальные силы незначительно влияют параметры резания. Большие радиальные силы наблюдаются для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD).

На рис. 6 и 7 показаны шероховатость поверхности и срок службы инструмента соответственно для инструментов с покрытием (*C*), с микропескоструйной обработкой (CMB) и MTCVD-покрытиями, варьирующиеся в за-

висимости от $V = 300$ м/мин, $f = 0,1$ мм/об и $d = 0,3$ мм соответственно. Можно заметить, что шероховатость поверхности уменьшается с увеличением V (рис. 6, а) и возрастает с увеличением f (рис. 6, б) и d (рис. 6, в). Меньшую шероховатость поверхности можно наблюдать у инструментов с покрытием PVD-AlTiN (С), а более высокую шероховатость поверхности – у инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). На шероховатость поверхности существенно влияет подача, особенно для инструментов с покрытием MTCVD. Однако существенной разницы между инструментами с покрытием и инструментами, подвергнутыми микропескоструйной обработке, нет.

При изменении параметров можно наблюдать снижение срока службы инструмента. Скорость резания оказывает наибольшее влияние на срок службы инструмента, за ней следуют подача и глубина резания. Самый высокий срок службы наблюдается у инструментов с MTCVD-покрытиями, за ними следуют инструменты с микропескоструйной обработкой и инструменты с износостойким покрытием. Это можно объяснить более толстым покрытием, средняя толщина которого составляет 22 мкм, по сравнению с более тонким покрытием со средней толщиной 3 мкм. Кроме того, слой покрытия Al₂O₃ способствует увеличению срока службы инструмента за счет образования защитного слоя оксида алюминия на инструменте с покрытием (С) во время обработки, который защищает инструмент от окисления и потери режущих элементов из инструмента. В свою очередь, слой покрытия TiCN обеспечивал более высокую адгезию между покрытием и основным материалом.

Многокритериальная оптимизация

Исследователи предприняли несколько попыток оптимизировать параметры процесса токарной обработки. Однако ограниченные исследования оптимизировали токарную обработку стали AISI 304 с использованием инструментов с покрытием PVD-AlTiN (С), покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (СМБ) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). В исследовании применялся метод предпочтительного использования для оптимизации параметров токарной обработки с целью достижения минимальных сил резания, шероховатости

поверхности и максимального срока службы инструмента. Согласно уравнению (16) каждая переменная отклика R_i преобразуется в функцию предпочтительного использования D_i , а уравнение (17) преобразует оптимизацию переменных множественного ответа в оптимизацию одной функции предпочтительного использования (D_M):

$$D_i = \begin{cases} 0,1 & \text{if } R_i \leq R_{\min} \\ \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} & \text{if } R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max} \\ 1,0 & \text{if } R_i \geq R_{\max} \end{cases}; \quad (16)$$

$$D_M = (D_1 \times D_2 \times D_3 \times \dots \times D_n)^{1/n}. \quad (17)$$

Переменные процесса и различные возможные функции отклика показаны в табл. 7.

Одностороннее преобразование используется для преобразования каждого ответа R_i в соответствующий ему D_i [23, 24]. Путем подстановки всех мыслимых комбинаций и перестановок параметров резания (около 10 000 точек данных) в разработанные математические модели, попадающие в пределы параметров, которые выбраны в настоящем исследовании, были получены минимальные и максимальные пределы функций отклика. Одностороннее преобразование для различных откликов для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (С), покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (СМБ) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) можно представить с учетом нижнего и верхнего пределов соответствующих откликов.

Односторонняя трансформация для различных откликов для инструментов с покрытием PVD-AlTiN (С) (уравнения 18–22), инструментов с покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (СМБ) (уравнения 23–27) и инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) (уравнения 28–32) приведены в табл. 8, 9 и 10 соответственно.

Для каждого уровня независимых параметров DF_c , DF_f , DF_r , DR_a и D_T рассчитывались по формулам (18–22) для инструментов с покрытием PVD-AlTiN, по формулам (23–27) для инструментов с покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (СМБ) и по формулам (28–32) для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃. Затем была рассчитана единственная функция предпочтительного использования D_M путем под-

Таблица 7

Table 7

Переменные процесса и диапазон функций реагирования
Process variables and the range of response functions

Переменные процесса и отклики	Задача	Инструмент с покрытием PVD-AlTiN (C)		Инструмент с покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB)		Инструмент с покрытием MTCVD-TiCN/Al ₂ O ₃ (MTCVD)	
		Минимальный предел	Максимальный предел	Минимальный предел	Максимальный предел	Минимальный предел	Максимальный предел
Скорость резания V , м/мин	В диапазоне	200	400	200	400	200	400
Подача f , мм/об	В диапазоне	0,05	0,15	0,05	0,15	0,05	0,15
Глубина резания d , мм	В диапазоне	0,1	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5
Сила резания F_c , Н	Минимизировать	24,5	128,3	11,9	209,9	15,1	220,4
Сила подачи F_f , Н	Минимизировать	8,7	71,1	11,7	69,9	13,3	78,3
Радиальная сила F_r , Н	Минимизировать	7,8	21	7,7	30,4	14	34,6
Шероховатость поверхности R_a , мкм	Минимизировать	0,20	1,46	0,21	1,47	0,24	1,59
Срок службы инструмента T , мин	Максимизировать	5,82	37,7	6,7	40,3	8,5	51,1

становки DF_c , DF_f , DF_r , DR_a и D_T в уравнение (17). Оптимальный параметр выбирался исходя из решения с наибольшей желательностью D_M .

В настоящем исследовании выбрано семейство оптимальных решений, имеющих единственную функцию желательности D_M выше 0,9, которые показаны в табл. 11–13 для инструментов с покрытиями PVD-AlTiN (C), PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (CMB) и MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD) соответственно.

В настоящем исследовании оптимальными параметрами при использовании инструментов с покрытием PVD-AlTiN (C) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ оказались $V = 200...290$ м/мин, $f = 0,05...0,055$ мм/об и $d = 0,1...0,12$ мм. Однако $V = 200...320$ м/мин, $f = 0,05...0,055$ мм/об и $d = 0,1...0,12$ мм соответственно являются оптимальными условиями

резания при использовании инструментов с покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (CMB). Исследование по оптимизации показывает, что при точении нержавеющей стали AISI 304 инструментами с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ силы резания составляют 18–27 Н, минимальная шероховатость поверхности – 0,3–0,44 мкм, а срок службы инструмента – более 36–51 мин. Исследование по оптимизации показывает, что по сравнению с инструментами с покрытиями PVD-AlTiN (C) и PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (CMB) при точении нержавеющей стали AISI 304 инструментами с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ силы резания существенно меньше и составляют 18–27 Н, а минимальная шероховатость поверхности достигает уровня 0,3–0,44 мкм, при этом стойкость инструмента увеличивается до 36–51 мин.

Таблица 8

Table 8

Одностороннее преобразование для инструмента с покрытием PVD-AlTiN (C)
One-sided transformation for PVD-AlTiN coated (C) tools

Приемлемость силы резания, DF_c (ур. 18)	Приемлемость силы подачи DF_f (ур. 19)
$DF_c = \begin{cases} 0, F_c \geq 128,3 \\ \frac{F_{c_{\max}} - F_{c_i}}{F_{c_{\max}} - F_{c_{\min}}}, F_{c_{\min}} \leq F_{c_i} \leq F_{c_{\max}} \\ 1, F_c \leq 24,5 \end{cases}$	$DF_f = \begin{cases} 0, F_f \geq 71,1 \\ \frac{F_{f_{\max}} - F_{f_i}}{F_{f_{\max}} - F_{f_{\min}}}, F_{f_{\min}} \leq F_{f_i} \leq F_{f_{\max}} \\ 1, F_f \leq 8,7 \end{cases}$
Приемлемость радиальной силы DF_r (ур. 20)	Приемлемость шероховатости поверхности DR_a (ур. 21)
$DF_r = \begin{cases} 0, F_r \geq 21 \\ \frac{F_{r_{\max}} - F_{r_i}}{F_{r_{\max}} - F_{r_{\min}}}, F_{r_{\min}} \leq F_{r_i} \leq F_{r_{\max}} \\ 1, F_r \leq 7,8 \end{cases}$	$DR_a = \begin{cases} 0, R_a \geq 1,46 \\ \frac{R_{a_{\max}} - R_{a_i}}{R_{a_{\max}} - R_{a_{\min}}}, R_{a_{\min}} \leq R_{a_i} \leq R_{a_{\max}} \\ 1, R_a \leq 0,2 \end{cases}$
Приемлемость срока службы инструмента D_T (ур. 22)	
$D_T = \begin{cases} 0, T \leq 5,82 \\ \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ 1, T \geq 37,7 \end{cases}$	

Таблица 9

Table 9

**Одностороннее преобразование для инструмента с покрытием PVD-AlTiN после
микропескоструйной обработки (CMB)**

One-sided transformation for PVD-AlTiN coated-microblasted (CMB) tools

Приемлемость силы резания, DF_c (ур. 23)	Приемлемость силы подачи DF_f (ур. 24)
$DF_c = \begin{cases} 0, F_c \geq 209,9 \\ \frac{F_{c_{\max}} - F_{c_i}}{F_{c_{\max}} - F_{c_{\min}}}, F_{c_{\min}} \leq F_{c_i} \leq F_{c_{\max}} \\ 1, F_c \leq 11,9 \end{cases}$	$DF_f = \begin{cases} 0, F_f \geq 69,9 \\ \frac{F_{f_{\max}} - F_{f_i}}{F_{f_{\max}} - F_{f_{\min}}}, F_{f_{\min}} \leq F_{f_i} \leq F_{f_{\max}} \\ 1, F_f \leq 11,7 \end{cases}$
Приемлемость радиальной силы DF_r (ур. 25)	Приемлемость шероховатости поверхности DR_a (ур. 26)
$DF_r = \begin{cases} 0, F_r \geq 30,4 \\ \frac{F_{r_{\max}} - F_{r_i}}{F_{r_{\max}} - F_{r_{\min}}}, F_{r_{\min}} \leq F_{r_i} \leq F_{r_{\max}} \\ 1, F_r \leq 7,7 \end{cases}$	$DR_a = \begin{cases} 0, R_a \geq 1,47 \\ \frac{R_{a_{\max}} - R_{a_i}}{R_{a_{\max}} - R_{a_{\min}}}, R_{a_{\min}} \leq R_{a_i} \leq R_{a_{\max}} \\ 1, R_a \leq 0,21 \end{cases}$
Приемлемость срока службы инструмента D_T (ур. 27)	
$D_T = \begin{cases} 0, T \leq 6,7 \\ \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ 1, T \geq 40,3 \end{cases}$	

Таблица 10

Table 10

Одностороннее преобразование для инструмента с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD)
One-sided transformation for MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated tools

Приемлемость силы резания, DF_c (ур. 28)	Приемлемость силы подачи DF_f (ур. 29)
$DF_c = \begin{cases} 0, F_c \geq 220,4 \\ \frac{F_{c_{\max}} - F_{c_i}}{F_{c_{\max}} - F_{c_{\min}}}, F_{c_{\min}} \leq F_{c_i} \leq F_{c_{\max}} \\ 1, F_c \leq 15,1 \end{cases}$	$DF_f = \begin{cases} 0, F_f \geq 78,3 \\ \frac{F_{f_{\max}} - F_{f_i}}{F_{f_{\max}} - F_{f_{\min}}}, F_{f_{\min}} \leq F_{f_i} \leq F_{f_{\max}} \\ 1, F_f \leq 13,3 \end{cases}$
Приемлемость радиальной силы DF_r (ур. 30)	Приемлемость шероховатости поверхности DR_a (ур. 31)
$DF_r = \begin{cases} 0, F_r \geq 34,6 \\ \frac{F_{r_{\max}} - F_{r_i}}{F_{r_{\max}} - F_{r_{\min}}}, F_{r_{\min}} \leq F_{r_i} \leq F_{r_{\max}} \\ 1, F_r \leq 14 \end{cases}$	$DR_a = \begin{cases} 0, R_a \geq 1,59 \\ \frac{R_{a_{\max}} - R_{a_i}}{R_{a_{\max}} - R_{a_{\min}}}, R_{a_{\min}} \leq R_{a_i} \leq R_{a_{\max}} \\ 1, R_a \leq 0,24 \end{cases}$
Приемлемость срока службы инструмента D_T (ур. 32)	
$D_T = \begin{cases} 0, T \leq 8,5 \\ \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ 1, T \geq 51,1 \end{cases}$	

Таблица 11

Table 11

Семейство оптимальных решений [V (м/мин), f (мм/об), d (мм)] для инструмента с покрытием PVD-AlTiN (C)
Family of optimal solutions [V (m/min), f (mm/rev), d (mm)] for PVD-AlTiN coated (C) tools

Оптимальные параметры	Оптимальные значения					Приемлемость					Единая приемлемость
	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	DF_c	DF_f	DF_r	DR_a	D_T	
[200, 0,05, 0,1]	28,15	10,82	8,96	0,38	37,70	0,97	0,97	0,92	0,86	1,00	0,94
[210, 0,05, 0,1]	27,88	10,65	8,87	0,36	36,16	0,97	0,97	0,92	0,87	0,95	0,94
[220, 0,05, 0,1]	27,63	10,49	8,79	0,35	34,76	0,97	0,97	0,93	0,89	0,91	0,93
[230, 0,05, 0,1]	27,39	10,34	8,72	0,33	33,46	0,97	0,97	0,93	0,90	0,87	0,93
[240, 0,05, 0,1]	27,17	10,20	8,65	0,32	32,27	0,98	0,98	0,94	0,91	0,83	0,92
[250, 0,05, 0,1]	26,95	10,07	8,58	0,31	31,17	0,98	0,98	0,94	0,92	0,79	0,92
[260, 0,05, 0,1]	26,75	9,94	8,52	0,30	30,14	0,98	0,98	0,95	0,92	0,76	0,91
[270, 0,05, 0,1]	26,55	9,83	8,46	0,29	29,19	0,98	0,98	0,95	0,93	0,73	0,91
[280, 0,05, 0,1]	26,36	9,71	8,40	0,28	28,29	0,98	0,98	0,96	0,94	0,70	0,91
[290, 0,05, 0,1]	26,18	9,60	8,34	0,27	27,46	0,98	0,98	0,96	0,95	0,68	0,90
[200, 0,055, 0,1]	29,32	11,80	9,18	0,40	35,54	0,95	0,95	0,90	0,85	0,93	0,92
[210, 0,055, 0,1]	29,04	11,62	9,10	0,38	34,09	0,96	0,95	0,90	0,86	0,89	0,91
[220, 0,055, 0,1]	28,78	11,45	9,02	0,36	32,77	0,96	0,96	0,91	0,87	0,85	0,91
[230, 0,055, 0,1]	28,53	11,28	8,94	0,35	31,55	0,96	0,96	0,92	0,88	0,81	0,90

Семейство оптимальных решений [V (м/мин), f (мм/об), d (мм)] для инструмента с покрытием PVD-AlTiN после микропескоструйной обработки (CMB)

Family of optimal solutions [V (m/min), f (mm/rev), d (mm)] for PVD-AlTiN coated-microblasted (CMB) tools

Оптимальные параметры	Оптимальные значения					Приемлемость					Единая приемлемость
	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	DF_c	DF_f	DF_r	DR_a	D_T	
[200, 0,05, 0,1]	17,60	14,70	8,71	0,39	40,36	0,97	0,95	0,96	0,86	1,00	0,95
[210, 0,05, 0,1]	17,12	14,47	8,64	0,37	38,90	0,97	0,95	0,96	0,87	0,96	0,94
[220, 0,05, 0,1]	16,68	14,25	8,57	0,36	37,56	0,98	0,96	0,96	0,89	0,92	0,94
[230, 0,05, 0,1]	16,27	14,04	8,51	0,34	36,32	0,98	0,96	0,97	0,90	0,88	0,94
[240, 0,05, 0,1]	15,89	13,84	8,45	0,33	35,17	0,98	0,96	0,97	0,91	0,85	0,93
[250, 0,05, 0,1]	15,53	13,65	8,39	0,32	34,10	0,98	0,97	0,97	0,91	0,81	0,93
[260, 0,05, 0,1]	15,19	13,47	8,33	0,31	33,11	0,98	0,97	0,97	0,92	0,78	0,92
[270, 0,05, 0,1]	14,88	13,31	8,28	0,30	32,18	0,99	0,97	0,98	0,93	0,76	0,92
[200, 0,055, 0,1]	19,03	15,85	9,35	0,41	37,94	0,96	0,93	0,93	0,84	0,93	0,92
[280, 0,05, 0,1]	14,58	13,15	8,23	0,29	31,31	0,99	0,97	0,98	0,94	0,73	0,92
[210, 0,055, 0,1]	18,52	15,59	9,27	0,39	36,57	0,97	0,93	0,93	0,86	0,89	0,91
[200, 0,055, 0,12]	21,04	15,91	9,16	0,42	37,88	0,95	0,93	0,94	0,83	0,93	0,91
[290, 0,05, 0,1]	14,30	12,99	8,18	0,28	30,49	0,99	0,98	0,98	0,95	0,71	0,91
[210, 0,05, 0,12]	20,47	15,65	9,08	0,40	36,51	0,96	0,93	0,94	0,85	0,89	0,91
[220, 0,055, 0,1]	18,04	15,35	9,20	0,38	35,31	0,97	0,94	0,94	0,87	0,85	0,91
[300, 0,05, 0,1]	14,03	12,85	8,13	0,27	29,72	0,99	0,98	0,98	0,95	0,68	0,91
[220, 0,05, 0,12]	19,95	15,41	9,01	0,39	35,25	0,96	0,94	0,94	0,86	0,85	0,91
[230, 0,055, 0,1]	17,60	15,13	9,13	0,36	34,15	0,97	0,94	0,94	0,88	0,82	0,91
[310, 0,05, 0,1]	13,77	12,71	8,09	0,27	28,99	0,99	0,98	0,98	0,96	0,66	0,91
[230, 0,05, 0,12]	19,46	15,19	8,94	0,37	34,08	0,96	0,94	0,95	0,87	0,81	0,90
[240, 0,055, 0,1]	17,18	14,92	9,06	0,35	33,07	0,97	0,94	0,94	0,89	0,78	0,90
[320, 0,05, 0,1]	13,53	12,57	8,04	0,26	28,31	0,99	0,98	0,99	0,96	0,64	0,90
[240, 0,05, 0,12]	19,00	14,97	8,88	0,36	33,01	0,96	0,94	0,95	0,88	0,78	0,90
[250, 0,055, 0,1]	16,80	14,71	9,00	0,34	32,06	0,98	0,95	0,94	0,90	0,75	0,90

Проверочные эксперименты проводились при оптимальных условиях резания для различных инструментов, рассматриваемых в настоящем исследовании. В табл. 14 показано, что прогнозируемые результаты сил резания при оптимальных условиях резания для различных инструментов с использованием разработанных математических моделей хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Погрешность прогнозируемых и экспериментальных результатов составляет менее 15 % для сил резания и менее 10 % для шероховатости поверхности и стойкости инструмента. Это доказывает,

что в диапазоне выбранных параметров и с использованием различных инструментов, принятых во внимание в данном исследовании, разработанная модель может быть использована для точного прогнозирования откликов при точении стали AISI 304.

В настоящем исследовании настоятельно рекомендуются инструменты с покрытием MTCVD-TiCN/ Al_2O_3 для чистовой обработки нержавеющей стали AISI 304 при скорости $V = 200...290$ м/мин и более низких значениях f и d . В этом исследовании не рассматривалось влияние износа инструмента на силы резания

**Семейство оптимальных решений [V (м/мин), f (мм/об), d (мм)] для инструмента с покрытием
MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD)**

Family of optimal solutions [V (m/min), f (mm/rev), d (mm)] for MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated tools

Оптимальные параметры	Оптимальные значения					Приемлемость					Единая прием- лемость
	F_c , Н	F_p , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	DF_c	DF_f	DF_r	DR_a	D_T	
[200, 0,05, 0,1]	21,20	14,23	15,48	0,37	51,14	0,97	0,99	0,93	0,91	1,00	0,96
[210, 0,05, 0,1]	20,70	14,17	15,37	0,36	48,90	0,97	0,99	0,93	0,92	0,95	0,95
[220, 0,05, 0,1]	20,24	14,11	15,27	0,35	46,86	0,98	0,99	0,94	0,92	0,90	0,94
[230, 0,05, 0,1]	19,81	14,05	15,17	0,34	44,98	0,98	0,99	0,94	0,93	0,86	0,94
[240, 0,05, 0,1]	19,40	13,99	15,08	0,33	43,26	0,98	0,99	0,95	0,94	0,82	0,93
[200, 0,05, 0,12]	24,61	15,49	15,70	0,41	48,20	0,95	0,97	0,92	0,88	0,93	0,93
[200, 0,055, 0,1]	23,17	15,47	16,42	0,39	48,39	0,96	0,97	0,88	0,89	0,94	0,93
[250, 0,05, 0,1]	19,02	13,94	14,99	0,32	41,67	0,98	0,99	0,95	0,94	0,78	0,93
[210, 0,05, 0,12]	24,03	15,42	15,59	0,40	46,09	0,96	0,97	0,92	0,89	0,88	0,92
[210, 0,055, 0,1]	22,62	15,40	16,30	0,38	46,27	0,96	0,97	0,89	0,90	0,89	0,92
[260, 0,05, 0,1]	18,66	13,89	14,91	0,32	40,20	0,98	0,99	0,96	0,95	0,74	0,92
[220, 0,05, 0,12]	23,50	15,35	15,49	0,39	44,17	0,96	0,97	0,93	0,90	0,84	0,92
[220, 0,055, 0,1]	22,12	15,33	16,20	0,37	44,34	0,97	0,97	0,89	0,91	0,84	0,91
[270, 0,05, 0,1]	18,33	13,84	14,83	0,31	38,83	0,98	0,99	0,96	0,95	0,71	0,91
[230, 0,05, 0,12]	23,00	15,29	15,39	0,38	42,40	0,96	0,97	0,93	0,90	0,80	0,91
[230, 0,055, 0,1]	21,65	15,27	16,09	0,36	42,57	0,97	0,97	0,90	0,92	0,80	0,91
[280, 0,05, 0,1]	18,00	13,79	14,76	0,30	37,56	0,99	0,99	0,96	0,96	0,68	0,91
[240, 0,05, 0,12]	22,53	15,23	15,30	0,37	40,78	0,96	0,97	0,94	0,91	0,76	0,90
[200, 0,05, 0,14]	27,92	16,63	15,89	0,44	45,85	0,94	0,95	0,91	0,85	0,88	0,90
[240, 0,055, 0,1]	21,20	15,21	16,00	0,35	40,94	0,97	0,97	0,90	0,92	0,76	0,90
[290, 0,05, 0,1]	17,70	13,75	14,68	0,30	36,37	0,99	0,99	0,97	0,96	0,65	0,90

и были найдены возможности для моделирования сил с учетом эффекта износа инструмента при точении стали AISI 304 инструментами с покрытием, обработанными по-разному до и после.

Заключение

В настоящем исследовании были оценены характеристики сухой токарной обработки нержавеющей стали AISI 304 инструментами с однослойным покрытием PVD-AlTiN (C), покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (СМВ) и покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ (MTCVD). На основании исследования можно сделать следующие выводы.

- Инструменты с покрытием PVD-AlTiN обеспечивают самые низкие силы резания

и шероховатость поверхности, за ними следуют инструменты с покрытием PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой, а также инструменты с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃. Однако эти различия для инструментов с покрытиями PVD-AlTiN (C) и PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (СМВ) незначительны.

- Силы резания уменьшились с изменением параметров резания. Однако этот эффект был существенным для инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃. С другой стороны, более высокая стойкость инструмента наблюдалась у инструментов с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃, за которыми следовали инструменты с покрытиями PVD-AlTiN и PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой.

Проверочная экспериментальная матрица при оптимальных параметрах [V (м/мин), f (мм/об), d (мм)]
Validatory experimental matrix at optimum parameters [V (m/min), f (mm/rev), d (mm)]

Оптимальные параметры	Тип инструмента	Результаты моделирования (ур. 11–13)					Результаты эксперимента				
		F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин	F_c , Н	F_f , Н	F_r , Н	R_a , мкм	T , мин
[230, 0,055, 0,1]	C	28,53	11,28	8,94	0,35	31,55	29	11	11	0,39	34
[200, 0,05, 0,1]	C	28,15	10,82	8,96	0,38	37,70	33	14	10	0,33	36
[250, 0,055, 0,1]	CMB	16,80	14,71	9,00	0,34	32,06	21	18	11	0,29	27
[200, 0,15, 0,2]	CMB	17,60	14,70	8,71	0,39	40,36	21	17	12	0,36	36
[290, 0,05, 0,1]	MTCVD	17,70	13,75	14,68	0,30	36,37	23	16	16	0,33	33
[200, 0,05, 0,1]	MTCVD	21,20	14,23	15,48	0,37	51,14	24	19	17	0,39	47

• Коэффициенты корреляции для разработанных моделей (выше 0,9) показали, что разработанные модели могут быть надежно использованы для прогнозирования изученных откликов при точении стали AISI 304 в диапазоне параметров, рассматриваемых в данном исследовании.

• Исследование по оптимизации показало, что при токарной обработке стали AISI 304 инструментами с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ возникают меньшие силы резания (18–27 Н), обеспечивается минимальная шероховатость поверхности (0,3–0,44 мкм) и наблюдается больший срок службы инструмента (36–51 мин) по сравнению с инструментами с покрытиями PVD-AlTiN (C) и PVD-AlTiN с микропескоструйной обработкой (CMB).

• В настоящем исследовании настоятельно рекомендуются инструменты с покрытием MTCVD-TiCN/Al₂O₃ для чистовой обработки нержавеющей стали AISI 304 при скорости $V=200\dots290$ м/мин и более низких значениях f и d .

Список литературы

1. A study on major factors influencing dry cutting temperature of AISI 304 stainless steel / H.B. He, H.Y. Li, J. Yang, X.Y. Zhang, Q.B. Yue, X. Jiang, S.K. Lyu // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 18. – P. 1387–1392. – DOI: 10.1007/s12541-017-0165-6.
2. Multi-objective optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated tool / V.D.P. Rao, S.R.M. Ali, S.M.S. Ali,

V.N. Geethika // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (12). – P. 25789–25797. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.571.

3. Kulkarni A., Sargade V., More C. Machinability investigation of AISI 304 austenitic stainless steels using multilayer AlTiN/TiAlN coated carbide inserts // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 548–553. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.082.

4. Estimation and optimization of flank wear and tool lifespan in finish turning of AISI 304 stainless steel using desirability function approach / L. Bouzid, S. Berkani, M. Yallese, F. Girardin, T. Mabrouki // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. – 2018. – Vol. 9 (3). – P. 349–368. – DOI: 10.5267/j.ijiec.2017.8.002.

5. Sharma N., Gupta K. Influence of coated and uncoated carbide tools on tool wear and surface quality during dry machining of stainless steel 304 // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6 (8). – P. 086585. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab1e59.

6. Influence of secondary carbides on microstructure, wear mechanism, and tool performance for different cermet grades during high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel / U.S. Patel, S.K. Rawal, A.F.M. Arif, S.C. Veldhuis // *Wear*. – 2020. – Vol. 452. – P. 203285. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203285.

7. Dubovska R., Majerik J., Chochlikova H. Investigation of durability $T = f(v_c)$ in turning of the AISI 304 austenitic stainless steel using the CNMG 120408 coated carbide insert // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 941. – P. 1633–1643. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.1633.

8. Measurement of machining forces and surface roughness in turning of AISI 304 steel using alumina-MWCNT hybrid nanoparticles enriched cutting fluid /

- A.K. Sharma, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, R.K. Singh // *Measurement*. – 2020. – Vol. 150. – P. 107078. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107078.
9. Optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated carbide cutting tool / V.D.P. Rao, N. Harsha, N.R. Ram, V.N. Geethika // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 310 (1). – P. 012109. – DOI: 10.1088/1757-899X/310/1/012109.
10. Optimizing the multiattribute characteristics of CrWN hard film tool in turning AISI 304 stainless steel / K.T. Chen, C.C. Hu, C.Y. Hsu, C.C. Tsao, P.D. Hong // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 29. – P. 2506–2513. – DOI: 10.1007/s11665-020-04732-x.
11. Performance studies on cryogenic treated carbide cutting tool for turning of AISI304 steel / N. Patil, K. Gopalakrishna, B. Sangmesh, K. Sudhakar, G.C. Vijaykumar // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. – 2018. – Vol. 12 (3). – P. 3927–3941. – DOI: 10.15282/jmes.12.3.2018.12.0343.
12. Multi-response optimization in environment friendly turning of AISI 304 austenitic stainless steel / T. Singh, J.S. Dureja, M. Dogra, M.S. Bhatti // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 15 (3). – P. 538–558. – DOI: 10.1108/MMMS-07-2018-0139.
13. The influence of cutting speed variation in turning of AISI 304 materials on wear and tool life coated carbide cutting tools / S. Lubis, Rosehan, S. Darmawan, Adianto, R. Malik // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 10 (6). – P. 203–210.
14. Wear performance of surface treated drills in high-speed drilling of AISI 304 stainless steel / S.A. Khan, S. Shamail, S. Anwar, A. Hussain, S. Ahmad, M. Saleh // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 223–235. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.022.
15. Bedi S.S., Behera G.C., Datta S. Effects of cutting speed on MQL machining performance of AISI 304 stainless steel using uncoated carbide insert: application potential of coconut oil and rice bran oil as cutting fluids // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 45. – P. 8877–8893. – DOI: 10.1007/s13369-020-04554-y.
16. Optimization on the turning process parameters of SS 304 using Taguchi and TOPSIS / N.J. Rathod, M.K. Chopra, P.K. Chaurasiya, U.S. Vidhate, A. Dasore // *Annals of Data Science*. – 2023. – Vol. 10. – P. 1405–1419. – DOI: 10.1007/s40745-021-00369-2.
17. A comparative study on different textured and untextured tools performance in turning process / P. Sivaiah, M. Revantha Kumar, S. Bala Subramanyam, K.L.V. Prasad // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 36 (8). – P. 926–935. – DOI: 10.1080/10426914.2020.1866201.
18. Sustainable hard machining of AISI 304 stainless steel through TiAlN, AlTiN, and TiAlSiN coating and multi-criteria decision making using grey fuzzy coupled taguchi method / C. Moganapriya, R. Rajasekar, R. Santhosh, S. Saran, S. Santhosh, V.K. Gobinath, P.S. Kumar // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2022. – Vol. 31 (9). – P. 7302–7314. – DOI: 10.1007/s11665-022-06751-2.
19. Influence of cutting speed on dry machinability of AISI 304 stainless steel / S.S. Bedi, S.P. Sahoo, B. Vikas, S. Datta // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 38. – P. 2174–2180. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.554.
20. Analysis of cutting temperature during turning of SS 304 using uncoated and PVD coated carbide inserts / A. Kulkarni, N. Ambhore, A. Deshpande, P. Anerao, S. Chinchanihar // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 68. – P. 2569–2573. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.417.
21. Performance evaluations of Ti-based PVD coatings deposited on cermet tools for high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel / U. Patel, S. Rawal, B. Bose, A.F.M. Arif, S. Veldhuis // *Wear*. – 2022. – Vol. 492. – P. 204214. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.204214.
22. Özbek N.A., Karadag M.İ., Özbek O. Optimization of flank wear and surface roughness during turning of AISI 304 stainless steel using the Taguchi method // *Materials Testing*. – 2020. – Vol. 62 (9). – P. 957–961. – DOI: 10.3139/120.111571.
23. Gaikwad V.S., Chinchanihar S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2022. – Vol. 8 (4). – P. 3730–3748. – DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.
24. Chinchanihar S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46 (4). – P. 1572–1584. – DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science





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



Performance modeling and multi-objective optimization during turning AISI 304 stainless steel using coated and coated-microblasted tools

Satish Chinchani^{a, *}, Mahendra Gadge^b

Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune - 411039, Maharashtra, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@viit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8603-8653>,  Mahendra.gadge@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 August 2023

Revised: 05 September 2023

Accepted: 09 September 2023

Available online: 15 December 2023

Keywords:

AISI 304

Cutting force

Tool life

Coated tools

Surface roughness

Multi-objective optimization

ABSTRACT

Introduction. High-speed machining of stainless steel has long been a focus of research. Due to characteristics such as low thermal conductivity and work hardening, AISI 304 is considered to be a difficult material to cut. Machinability indicators provide important information about the efficiency and effectiveness of the machining process, enabling manufacturers to optimize their operations for increased productivity and precision. **The purpose of the work.** Coated carbide tools are most often used for machining AISI 304 stainless steel. Few studies, meanwhile, have examined the effects of pre- and post-treated coated carbide tools when turning these alloys at high speeds. In addition, only a small number of studies have simultaneously optimized the cutting parameters while employing pre- and post-treated tools. **The methods of investigation.** The present work comparatively evaluates the performance of coated and coated-microblasted tools during the turning of AISI 304 stainless steel. The tools were PVD-AlTiN coated, PVD-AlTiN coated with microblasting as a post-treatment (coated-microblasted), and MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated (MTCVD). The experimental-based mathematical models were developed to predict and optimize the turning performance. **Results and Discussion.** In this study, it is found that PVD-AlTiN coated tools have the lowest cutting forces and surface roughness, followed by PVD-AlTiN coated-microblasted and MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated tools. However, there is no significant difference observed in these responses for coated and coated-microblasted tools. It is found that the cutting forces increased with feed and depth of cut while decreasing with cutting speed. However, this effect is significant for MTCVD-coated tools. On the other hand, higher tool life is observed with MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated tools, followed by PVD AlTiN coated-microblasted and PVD-AlTiN coated tools. Tool life was largely affected by cutting speed. However, PVD-AlTiN coated tools exhibited this effect more noticeably. The models, with correlation coefficients found above 0.9, can be utilized to predict responses in turning AISI 304 stainless steel. The optimization study revealed that turning AISI 304 stainless steel with MTCVD-TiCN/Al₂O₃ coated tools incurs lower cutting forces of 18–27 N, produces a minimum surface roughness of 0.3–0.44 μm, and has a better tool life of 36–51 min compared to PVD-AlTiN coated (C) and PVD-AlTiN coated-microblasted (CMB) tools.

For citation: Chinchani S., Gadge M.G. Performance modeling and multi-objective optimization during turning AISI 304 stainless steel using coated and coated-microblasted tools. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 117–135. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135. (In Russian).

References

1. He H.B., Li H.Y., Yang J., Zhang X.Y., Yue Q.B., Jiang X., Lyu S.K. A study on major factors influencing dry cutting temperature of AISI 304 stainless steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, vol. 18, pp. 1387–1392. DOI: 10.1007/s12541-017-0165-6.
2. Rao V.D.P., Ali S.R.M., Ali S.M.S., Geethika V.N. Multi-objective optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated tool. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (12), pp. 25789–25797. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.571.
3. Kulkarni A., Sargade V., More C. Machinability investigation of AISI 304 austenitic stainless steels using multilayer AlTiN/TiAlN coated carbide inserts. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 548–553. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.082.

* Corresponding author

Chinchani Satish, Ph.D. (Engineering), Professor

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Pune - 411039, Maharashtra, India

Tel.: +91-2026950441, e-mail: satish.chinchani@viit.ac.in

4. Bouzid L., Berkani S., Yallese M., Girardin F., Mabrouki T. Estimation and optimization of flank wear and tool lifespan in finish turning of AISI 304 stainless steel using desirability function approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2018, vol. 9 (3), pp. 349–368. DOI: 10.5267/j.ijiec.2017.8.002.
5. Sharma N., Gupta K. Influence of coated and uncoated carbide tools on tool wear and surface quality during dry machining of stainless steel 304. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6 (8), p. 086585. DOI: 10.1088/2053-1591/ab1e59.
6. Patel U.S., Rawal S.K., Arif A.F.M., Veldhuis S.C. Influence of secondary carbides on microstructure, wear mechanism, and tool performance for different cermet grades during high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel. *Wear*, 2020, vol. 452, p. 203285. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203285.
7. Dubovska R., Majerik J., Chochlikova H. Investigation of durability $T = f(v_c)$ in turning of the AISI 304 austenitic stainless steel using the CNMG 120408 coated carbide insert. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941, pp. 1633–1643. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.1633.
8. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R., Singh R.K. Measurement of machining forces and surface roughness in turning of AISI 304 steel using alumina-MWCNT hybrid nanoparticles enriched cutting fluid. *Measurement*, 2020, vol. 150, p. 107078. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107078.
9. Rao V.D.P., Harsha N., Ram N.R., Geethika V.N. Optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated carbide cutting tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 310 (1), p. 012109. DOI: 10.1088/1757-899X/310/1/012109.
10. Chen K.T., Hu C.C., Hsu C.Y., Tsao C.C., Hong P.D. Optimizing the multiattribute characteristics of CrWN hard film tool in turning AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29, pp. 2506–2513. DOI: 10.1007/s11665-020-04732-x.
11. Patil N., Gopalakrishna K., Sangmesh B., Sudhakar K., Vijaykumar G.C. Performance studies on cryogenic treated carbide cutting tool for turning of AISI304 steel. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2018, vol. 12 (3), pp. 3927–3941. DOI: 10.15282/jmes.12.3.2018.12.0343.
12. Singh T., Dureja J.S., Dogra M., Bhatti M.S. Multi-response optimization in environment friendly turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, vol. 15 (3), pp. 538–558. DOI: 10.1108/MMMS-07-2018-0139.
13. Lubis S., Rosehan, Darmawan S., Adiinto, Malik R. The influence of cutting speed variation in turning of AISI 304 materials on wear and tool life coated carbide cutting tools. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019, vol. 10 (6), pp. 203–210.
14. Khan S.A., Shamail S., Anwar S., Hussain A., Ahmad S., Saleh M. Wear performance of surface treated drills in high-speed drilling of AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 223–235. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.022.
15. Bedi S.S., Behera G.C., Datta S. Effects of cutting speed on MQL machining performance of AISI 304 stainless steel using uncoated carbide insert: application potential of coconut oil and rice bran oil as cutting fluids. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 8877–8893. DOI: 10.1007/s13369-020-04554-y.
16. Rathod N.J., Chopra M.K., Chaurasiya P.K., Vidhate U.S., Dasore A. Optimization on the turning process parameters of SS 304 using Taguchi and TOPSIS. *Annals of Data Science*, 2023, vol. 10, pp. 1405–1419. DOI: 10.1007/s40745-021-00369-2.
17. Sivaiah P., Revantha Kumar M., Bala Subramanyam S., Prasad K.L.V. A comparative study on different textured and untextured tools performance in turning process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, vol. 36 (8), pp. 926–935. DOI: 10.1080/10426914.2020.1866201.
18. Moganapriya C., Rajasekar R., Santhosh R., Saran S., Santhosh S., Gobinath V.K., Kumar P.S. Sustainable hard machining of AISI 304 stainless steel through TiAlN, AlTiN, and TiAlSiN coating and multi-criteria decision making using grey fuzzy coupled Taguchi method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, vol. 31 (9), pp. 7302–7314. DOI: 10.1007/s11665-022-06751-2.
19. Bedi S.S., Sahoo S.P., Vikas B., Datta S. Influence of cutting speed on dry machinability of AISI 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, pp. 2174–2180. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.554.
20. Kulkarni A., Ambhore N., Deshpande A., Anerao P., Chinchankar S. Analysis of cutting temperature during turning of SS 304 using uncoated and PVD coated carbide inserts. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 68, pp. 2569–2573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.417.
21. Patel U., Rawal S., Bose B., Arif A.F.M., Veldhuis S. Performance evaluations of Ti-based PVD coatings deposited on cermet tools for high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel. *Wear*, 2022, vol. 492, p. 204214. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204214.



22. Özbek N.A., Karadag M.İ., Özbek O. Optimization of flank wear and surface roughness during turning of AISI 304 stainless steel using the Taguchi method. *Materials Testing*, 2020, vol. 62 (9), pp. 957–961. DOI: 10.3139/120.111571.

23. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (4), pp. 3730–3748. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

24. Chinchani S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. *Measurement*, 2013, vol. 46 (4), pp. 1572–1584. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).