

УДК 621.9.048.7
ГРНТИ 55.22.29

doi 10.54708/19926502_2026_30311388

Прогнозирование и определение стойкости твердосплавного режущего инструмента с покрытиями TiAlCN

А.Ю. Назаров, В.Р. Мухамадеев*, Т.В. Мухамадеев

Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. Прогнозирование стойкости инструмента с целью уменьшения трудозатратных процессов нанесения покрытий и, как следствие, уменьшения финансовых и временных потерь является достаточно актуальной задачей. Для решения указанной проблемы была создана математическая модель влияния технологических режимов на путь резания твердосплавными режущими инструментами с синтезируемыми карбонитридными покрытиями методом полного факторного эксперимента (ПФЭ). Полученная математическая модель позволила прогнозировать путь резания и соответственно стойкость с точностью в 90%. Полученная модель позволяет работать с различными технологическими режимами синтеза карбонитридных покрытий.

Ключевые слова: карбонитриды, покрытия, ПФЭ, математическая модель, режимы нанесения, режущий инструмент, напряжение, сила тока.

*vener_muhamadeev@mail.ru

Введение

Покрытия на металлорежущих инструментах имеют большое значение в механообработке, при этом все еще есть возможности для совершенствования, что подтверждается недавними исследованиями, проведенными в области обрабатываемых инструментов при обработке титановых сплавов [1], алюминиевых сплавов [2, 3] и труднообрабатываемых материалов [4]. Эти исследования актуальны, поскольку предоставляют ценную информацию о том, какие покрытия лучше всего подходят для обработки определенного материала [5, 6]. Обрабатывающие инструменты с покрытием значительно улучшают процесс механообработки и позволяют обрабатывать материалы при более высоких скоростях резания [7–9]. Покрытия позволяют увеличить ресурс инструмента при обработке материалов с низкой обрабатываемостью [10, 11]. Это связано с улучшением механических свойств за счет покрытия. Использование покрытий также способствует улучшению качества поверхности обрабатываемой детали [12] и уменьшению сил за счет снижения коэффициента трения [13]. Однако зона контакта инструмента с обрабатываемой деталью обычно подвергается более высоким температурам резания, чем при использовании инструментов без покрытия [14]. Тем не менее, этот факт, по-видимому, не оказывает негативного влияния на срок службы инструмента с покрытием (в большинстве случаев), поскольку на границе инструмент-стружка возникают другие факторы, такие как образование слоя окисления покрытия. Более того, покрытия могут быть адаптированы к определенному применению за счет нанесения нескольких слоев, влияющих на свойства покрытия [15]. Эти факторы способствуют увеличению срока службы инструмента с покрытием по сравнению со сроком службы инструмента без покрытия.

В настоящее время значительное внимание исследователей направлено на метод катодно-дугового осаждения, при этом проводятся исследования, касающиеся влияния метода осаждения и его параметров на общие свойства покрытия [16], в т.ч. связывающие скорость вращения во время осаждения и ориентацию подложки с механическими свойствами осаждаемых покрытий [17, 18].

Таким образом, целью данной работы является создание математической модели, позволяющей прогнозировать износостойкость режущего инструмента с карбонитридными покрытиями.

Методика проведения исследований

Для изучения технологического процесса нанесения покрытий системы $Ti-Al-C-N$ возможно использование моделирования для сложных систем – это экспериментальное определение физических и математических моделей, обладающих определенным приближением к реальным процессам. При помощи моделирования можно воспроизвести изменения в состоянии системы, их оптимизацию и прогнозирование [19].

Задача построения математической модели технологических процессов нанесения покрытий с помощью методов планирования эксперимента требует количественной формулировки цели исследования [20, 21]. Такой количественной характеристикой является параметр оптимизации, который представляет реакцию от воздействия изучаемых факторов на исследуемый процесс [22–25].

При исследовании технологических процессов нанесения покрытий параметрами оптимизации могут быть: твердость, коэффициент трения, износостойкость и другие. При анализе требований, предъявляемых к оптимизации, наиболее оптимальным, удовлетворяющим большинству требований, является износостойкость.

На износостойкость режущего инструмента с нанесенными покрытиями влияют множество факторов. С целью исключения из математической модели внутренних физико-химических взаимодействий необходимо использовать метод регрессионного анализа или метод «черного ящика» (Рис. 1) [19].

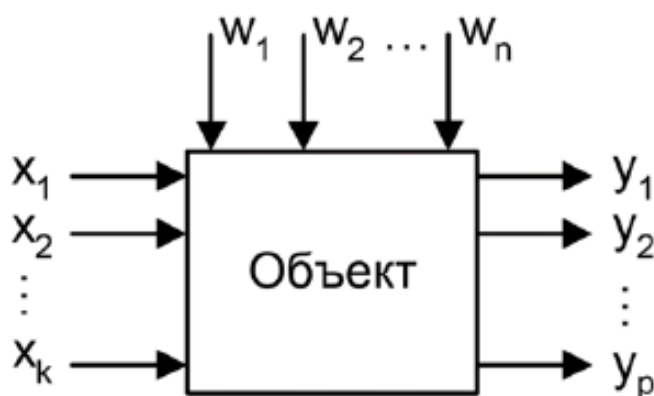


Рисунок 1. Структура метода «черного ящика»: x_i – входные факторы; y_i – значение функции отклика; w_i – случайные возмущающие воздействия.

При моделировании зависимости стойкости инструмента от технологических режимов нанесения покрытий входными параметрами являются химический состав газовой смеси, напряжение смещения, частота вращения стола, давление в камере, сила тока на титановом катоде, сила тока на ПИНКе.

Использование кодированной системы координат позволяет очень компактно и наглядно записать порядок проведения эксперимента в виде матрицы (плана) экспериментов. Различают планы первого и второго порядка. В планах первого порядка влияющие факторы варьируются на двух уровнях, а в планах второго порядка – на трех уровнях.

Полный факторный эксперимент – это эксперимент, в котором реализуются все возможные, неповторяющиеся комбинации уровней факторов. Если число факторов равно k , а число уровней равно s , то число опытов n при ПФЭ будет $n = s^k$.

Предварительно для уменьшения количества экспериментов был экспериментально определен химический состав смеси газов, при котором износостойкость была максимальной

($N_2/C_2H_2:80/20$) [26]. Эксперименты с тремя уровнями варьирования факторов встречаются очень редко в связи с резким ростом числа независимых опытов.

Полный факторный эксперимент с пятью входными факторами $n = 2^5 = 32$.

Таким образом, используя методы ПФЭ можно получить модель влияния технологических факторов на износостойкость покрытия. Данная модель имеет вид ряда Фурье, который получен в результате разложения полинома функции отклика. Общий вид представлен ниже:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i \neq j, l \\ j \neq l}}^k b_{ijl} x_i x_j x_l + \sum_{\substack{i \neq j, l, p \\ j \neq l, p \\ l \neq p}}^k b_{ijlp} x_i x_j x_l x_p + \\ + \sum_{\substack{i \neq j, l, p, q \\ j \neq l, p, q \\ l \neq p, q \\ p \neq q}}^k b_{ijlpq} x_i x_j x_l x_p x_q + \sum_{i=1}^n w_i,$$

где y – функция отклика; x_i – входные факторы; k – число факторов; n – число экспериментов, w_i – случайные ошибки наблюдения.

Входными факторами x_i для функции износостойкости покрытия являются:

- 1) напряжение смещения (U , В);
- 2) частота вращения стола (n , об/мин);
- 3) давление в камере (p , Па);
- 4) сила тока на титановом катоде (I_{Ti} , А);
- 5) сила тока на ПИНКе ($I_{ПИНК}$, А).

Каждый входной фактор имеет общую область определения. Пределы значений параметров процесса нанесения покрытий установлены согласно [26].

Таблица 1. Границы определения входных факторов.

Фактор	Наименьшее значение, $X_{\min}$	Наибольшее значение, $X_{\max}$
U , В	50	180
n , об/мин	1	4
p , Па	0,3	0,6
I_{Ti} , А	60	80
$I_{ПИНК}$, А	10	40

Согласно методу ПФЭ, каждая комбинация входных факторов четко представляет определенное состояние всей системы. Таким образом, множеству комбинаций технологических параметров будет соответствовать конкретное множество значений функций.

Для приведения входных факторов к общей области определения провели их кодирование. Так как ряд Фурье имеет границы, то кодирование фактора приводит его к определенности на интервале $[-1; 1]$. Кодирование выполняем согласно методу ПФЭ:

$$z_i = \frac{x_i - x_{cp}}{\Delta x},$$

где x_{cp} – среднее значение фактора; Δx – дисперсия фактора.

Ниже представлена матрица планирования эксперимента для метода ПФЭ с пятью факторами (Табл. 2).

N ₀	X ₀	X ₁	X ₂	X1X2	X ₃	X1X3	X2X3	X1X2X3	X ₄	X1X4	X2X4	X1X2X4	X3X4	X1X3X4	X2X3X4	X1X2X3X4	X ₅	X1X5	X2X5	X1X2X5	X3X5	X1X3X5	X2X3X5	X1X2X3X5	X4X5	X1X4X5	X2X4X5	X1X2X4X5	X3X4X5	X1X3X4X5	X2X3X4X5	X1X2X3X4X5
1	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	
2	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	
3	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	
4	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
5	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
6	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	
7	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
8	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	
9	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
10	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	
11	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	
12	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	
13	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	
14	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
16	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
17	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
18	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
19	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
20	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
21	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
22	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	
23	+	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+											

- а) изменение напряжения смещения от 50 до 180 В;
- б) изменение частоты вращения стола от 1 до 4 об/мин;
- в) изменение давления в камере установки от $0,3 \cdot 10^{-1}$ до $0,6 \cdot 10^{-1}$ Па;
- г) изменение силы тока на катодах: титан – от 80 до 50 А, алюминий – от 60 до 80 А;
- д) изменение силы тока на ПИНК от 0 до 40 А.

Рисунок 2. Схема установки.

Для проведения сравнительных стойкостных испытаний на пластины из сплава ВК8 были нанесены покрытия $TiAlCN$ (Рис. 3). При точении использовались заготовки из одной партии стали 12Х18Н10Т диаметром 100 мм и длиной 500 мм. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне и поджимали вращающимся центром. Исследования проводились при глубине резания $t = 0,5$ мм и подаче $S = 0,11$ мм/об при скорости резания 150 м/мин. В качестве исследуемого параметра износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности h_3 , которая измерялась с помощью отсчетного микроскопа МИР-2П с насадкой МОВ-15 с точностью отсчета до 0,002 мм. Критерий затупления режущих инструментов принимали равным $h_3 = 0,5$ мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям исследования, повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8%.

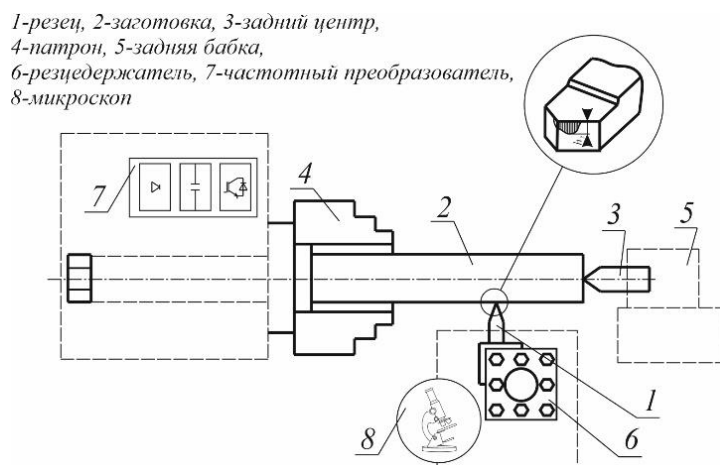


Рисунок 3. Схема оборудования для стойкостных испытаний.

Результаты исследований

Полученные экспериментальные значения и среднее значение пути резания представлены в Табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний и средние значения пути резания.

№	y_1	y_2	y_3	y_4	$\bar{y}$	№	y_1	y_2	y_3	y_4	$\bar{y}$
1	916	900	901	901	905	17	845	831	831	845	838
2	596	586	586	586	589	18	592	582	582	582	584
3	670	670	682	670	673	19	705	693	694	693	696
4	436	443	436	436	438	20	386	386	393	386	388
5	893	892	892	892	892	21	925	910	910	925	917
6	645	656	645	644	647	22	595	595	595	595	595
7	793	793	793	793	793	23	701	701	701	701	701
8	478	478	478	478	478	24	466	458	458	466	462
9	828	828	828	828	828	25	804	803	804	818	807
10	573	573	583	573	576	26	536	536	536	545	538
11	655	655	655	655	655	27	638	649	638	638	641
12	369	369	369	369	369	28	342	342	342	342	342
13	929	913	929	913	921	29	863	863	878	864	867
14	622	612	611	622	617	30	565	565	565	565	565
15	708	696	708	709	705	31	693	681	693	681	687
16	436	444	436	436	438	32	440	440	440	448	442

На следующем этапе проверяем однородность дисперсии параллельных опытов с целью подтверждения нормального закона распределения ошибок отдельных опытов с использованием критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч}} < G_{\text{табл.}}$$

Табличное значение критерия Кохрена $G_{\text{табл.}}$, равно 0,27054. Так как выполняется условие $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл.}}$, то принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Для подтверждения возможности повторения опыта вычисляем дисперсию воспроизводимости для всего эксперимента:

$$S_{\text{восп}}^2 = s_{(y)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{\text{воспр}}^2 = 25,55.$$

Вычисляем ошибку всего эксперимента:

$$s(y) = \sqrt{s_{(y)}^2} = \sqrt{25,55} = 5,055.$$

По полученным экспериментальным значениям определим коэффициенты уравнения:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}.$$

После расчета всех коэффициентов уравнение регрессии принимает вид:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 644,052 - 139,361x_1 - 86,861x_2 + 2,205x_1x_2 + 26,936x_3 - 0,657x_1x_3 + 4,6x_2x_3 + \\ & 4,488x_1x_2x_3 - 18,696x_4 - 0,357x_1x_4 - 3,175x_2x_4 - 0,247x_1x_2x_4 + 3,51x_3x_4 - 0,13x_1x_3x_4 - \\ & 1,817x_2x_3x_4 + 5,255x_1x_2x_3x_4 - 14,138x_5 - 0,561x_1x_5 + 2,24x_2x_5 - 8,764x_1x_2x_5 - \\ & 11,891x_3x_5 + 12,13x_1x_3x_5 + 8,515x_2x_3x_5 - 0,527x_1x_2x_3x_5 + 10,5x_4x_5 - 9,853x_1x_4x_5 - \\ & 5,582x_2x_4x_5 + 10,226x_1x_2x_4x_5 + 10,648x_3x_4x_5 - 8,658x_1x_3x_4x_5 - 3,867x_2x_3x_4x_5 + \\ & 1,569x_1x_2x_3x_4x_5. \end{aligned}$$

Проверяем статическую значимость всех коэффициентов с помощью *t-критерия*. Для ПФЭ ошибки всех коэффициентов равны между собой и определяются следующим образом:

$$s(b_i) = \frac{s(y)}{\sqrt{nm}} = \frac{5,055}{\sqrt{32 \cdot 4}} = \frac{5,055}{11,31} = 0,447.$$

Далее определяем доверительный интервал длиной Δb_i :

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} s(b_i) = 0,447 \cdot 2,04 = 0,911.$$

Табличное значение $t_{\text{табл}}$ для числа степеней свободы $f = n(m - 1) = 32(4 - 1) = 96$ и по принятому уровню значимости 0,05 принимаем 2,04.

Таким образом все коэффициенты, кроме b_{13} , b_{124} , b_{15} , b_{14} , b_{134} , b_{1235} , оказались статистически значимыми. После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнение регрессии принимает вид:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 644,052 - 139,361x_1 - 86,861x_2 + 26,936x_3 - 18,696x_4 - 14,138x_5 + 2,205x_1x_2 + \\ & 4,6x_2x_3 - 3,175x_2x_4 + 2,24x_2x_5 + 3,51x_3x_4 - 11,891x_3x_5 + 10,5x_4x_5 + 4,488x_1x_2x_3 - \\ & 8,764x_1x_2x_5 + 12,13x_1x_3x_5 - 9,853x_1x_4x_5 - 1,817x_2x_3x_4 + 8,515x_2x_3x_5 - 5,582x_2x_4x_5 + \\ & 10,648x_3x_4x_5 + 5,255x_1x_2x_3x_4 + 10,226x_1x_2x_4x_5 - 8,658x_1x_3x_4x_5 - 3,867x_2x_3x_4x_5 + \\ & 1,569x_1x_2x_3x_4x_5. \end{aligned}$$

Проверку уравнения на адекватность проводим с целью доказательства пригодности полученного уравнения регрессии для описания экспериментальных данных с заданной точностью. Для этого оцениваем отклонения значений функции оптимизации, вычисленных по уравнениям регрессии, от экспериментально установленных. Результаты расчетов представлены в Табл. 5.

Для оценки отклонений используем критерий Фишера (*F-критерий*):

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\text{восп}}^2} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{(y)}^2}.$$

Гипотезу об адекватности полученного уравнения проверим с учетом значимости коэффициентов и соответственно без их учета:

$$F_{1,\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}1}^2}{s_{(y)}^2} = 3,347;$$

$$F_{2,\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}2}^2}{s_{(y)}^2} = 0,475.$$

Таблица 5. Рассчитанные значения пути резания.

№	С учетом коэффициентов		Без учета коэфф.	№	С учетом коэффициентов		Без учета коэфф.
	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$\hat{y}_i$		$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$\hat{y}_i$
1	905,028	878,9991	878,5513	17	838,6412	787,7789	787,1452
2	589,2429	613,2933	611,2557	18	584,789	581,9413	585,0605
3	673,5419	715,4951	718,3799	19	696,8366	689,1535	686,8816
4	438,2123	470,5729	470,1736	20	388,2822	411,4796	411,266
5	892,8147	1064,07	1062,032	21	917,9275	803,6361	806,7552
6	647,8138	729,5466	729,0987	22	595,2131	680,6847	680,051
7	793,5159	664,5401	664,1408	23	701,4146	650,3617	650,1482
8	478,2373	507,3161	510,201	24	462,4518	441,0072	438,7353
9	828,5146	818,7043	816,4324	25	807,8101	750,8381	753,723
10	576,0933	621,5669	621,3533	26	538,5033	579,3293	578,9299
11	655,0961	667,6425	667,0088	27	641,0909	662,4474	661,9996
12	369,8557	424,9001	428,0192	28	342,3239	369,0437	367,0061
13	921,5426	897,4291	897,2156	29	867,5529	897,1266	896,7272
14	617,2807	599,368	597,096	30	565,8455	665,6205	668,5053
15	705,8612	763,6671	766,7862	31	687,4157	660,0289	657,9913
16	438,384	493,8874	493,2538	32	442,5308	388,2455	387,7977

Исходя из найденных значений степеней свободы выбираем табличные значения критерия Фишера:

$$F_{1,\text{расч}} = 3,347 < F_{1,\text{табл}} = 3,94;$$

$$F_{2,\text{расч}} = 0,475 < F_{2,\text{табл}} = 2,1.$$

Таким образом, искомое уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 644,052 - 139,361U - 86,861n + 26,936p - 18,696I_{Ti} - 14,138I_{\text{пинк}} + 2,205Un + \\ & 4,6np - 3,175nI_{Ti} + 2,24nI_{\text{пинк}} + 3,51pI_{Ti} - 11,891pI_{\text{пинк}} + 10,5I_{Ti}I_{\text{пинк}} + 4,488Unp - \\ & 8,764UnI_{\text{пинк}} + 12,13UpI_{\text{пинк}} - 9,853UI_{Ti}I_{\text{пинк}} - 1,817npI_{Ti} + 8,515npI_{\text{пинк}} - \\ & 5,582nI_{Ti}I_{\text{пинк}} + 10,648pI_{Ti}I_{\text{пинк}} + 5,255UnpI_{Ti} + 10,226UnI_{Ti}I_{\text{пинк}} - 8,658UpI_{Ti}I_{\text{пинк}} - \\ & 3,867npI_{Ti}I_{\text{пинк}} + 1,569UnpI_{Ti}I_{\text{пинк}}. \end{aligned}$$

Выводы

На основании полученных результатов и анализа уравнения регрессии можно сделать следующие выводы.

Отрицательное воздействие на стойкость инструмента оказывает увеличение всех входных факторов кроме давления в камере установки. Наибольшее влияние на износостойкость синтезируемых покрытий оказывает напряжение смещения. Единственным фактором, оказывающим положительное влияние на стойкость инструмента, является давление в камере установки.

Коэффициенты уравнения говорят о том, что максимальное отрицательное воздействие оказывает совокупность воздействия напряжения смещения на подложке, давления и силы тока на ПИНКе. При этом влияние оказывает совокупность давления и силы тока на ПИНКе.

Использование ПФЭ позволяет не только оценить влияние факторов и их взаимодействия, но и наметить гипотезы по выяснению механизма процесса. Дальнейшие исследования в области математического моделирования процессов прогнозирования стойкости синтезируемых покрытий позволят сократить время и финансовые ресурсы на проектирование покрытий с конкретными физико-механическими свойствами.

Литература:

1. Chowdhury M.S.I., Bose B., Yamamoto K., et al. Wear performance investigation of PVD coated and uncoated carbide tools during high-speed machining of TiAl6V4 aerospace alloy // *Wear*. 2020. Vol. 446–447. Art. 203168.
2. Hovsepian P.E., Luo Q., Robinson G., et al. Surface and Coatings Technology TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: A new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive components // *Surface and Coating Technology*. 2016, 201, 265–272.
3. Sánchez J.M., Rubio E., Álvarez M., et al. Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 164–165. P. 911–918.
4. Peng Z., Zhang X., Zhang D. Performance evaluation of high-speed ultrasonic vibration cutting for improving machinability of Inconel 718 with coated carbide tools // *Tribology International*. 2020. Art. 106766.
5. Mersni W., Boujelbene M., Salem S.B., Singh H.P. Machining time and quadratic mean roughness optimization // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. P. 2619–2624.
6. Kumar C.S., Majumder H., Khan A., Patel S.K. Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al₂O₃/TiCN mixed ceramic cutting tools for dry machining of hardened 52100 steel // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. P. 11889–11897.
7. Lakshmanan S., Xavior M.A. Performance of coated and uncoated inserts during intermittent cut milling of AISI 1030 steel // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. P. 372–380.
8. Sokovic M., Kopac J., Dobrzanski L.A., et al. Cutting characteristics of PVD and CVD-coated ceramic tool inserts // *Tribology in Industry*. 2006. Vol 28. P. 3–8.
9. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017, Vol. 18. P. 1–9.
10. Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G., Bouzakis E. Coated tools. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 2018. P. 1–13.
11. Lim S.C., Lim C.Y.H. Effective use of coated tools – the wear-map approach // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 139. P. 127–134.
12. Arunnath A., Masooth P.H.S. Optimization of process parameters in CNC turning process on machining SCM440 steel by uncoated carbide and TiCN/Al₂O₃/TiN coated carbide tool under dry conditions // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 6253–6269.
13. Sousa V.F.C., Silva F.J.G., Fecheira J.S., et al. Cutting forces assessment in CNC machining processes: A critical review // *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 4536.
13. Behera G.C., Thrinadh J., Datta S. Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825 // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. P. 2664–2670.
15. Zhao J., Liu Z., Wang B., et al. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 150. Art. 107302.
16. Zhirkov I., Polcik P., Kolozsvári S., Rosen J. Process development for stabilization of vacuum arc plasma generation from a TiB₂ cathode // *AIP Advances*. 2019. Vol. 9. Art. 015103.
17. Sun P.L., Hsu C.H., Liu H.S., et al. Analysis on microstructure and characteristics of TiAlN/CrN nano-multilayer films deposited by cathodic arc deposition // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 7519–7522.

18. Warcholinski B., Gilewicz A., Myslinski P., et al. Effect of nitrogen pressure and substrate bias voltage on the properties of Al–Cr–B–N coatings deposited using cathodic arc evaporation // *Tribology International*. 2021. Vol. 154. Art. 106744.
19. Хусаинов Ю.Г., Лапицкий Д.Р., Есипов Р.С. Определение и прогнозирование температуры нагрева изделия в процессе ионно-плазменного азотирования // *Вестник УГАТУ*. 2018. Т. 22. № 1(79). С. 29–35. [Khusainov Yu.G., Lapitsky D.R., Esipov R.S. Determination and prediction of temperature in plasma nitriding process substrate // *Vestnik UGATU*. 2018. Vol. 22. №1(79). P. 29–35 (in Russian)].
20. Реброва И.А. Планирование эксперимента. Омск: СиБАДИ, 2010. 107 с. [Rebrova I.A. Experiment Planning. Omsk: SibADI, 2010. 107 p. (in Russian)].
21. Школяр В.Н. Планирование эксперимента и обработка результатов. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 90 с. [Shkolyar V.N. Experiment Planning and Data Processing. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2010. 90 p. (in Russian)].
22. Аль-Бдейри М.Ш.Х., Красильников В.В., Кадырметов А.М., Сергеев С.В. Факторное планирование эксперимента для оценки оптимальных свойств теплозащитных покрытий на деталях цилиндропоршневой группы дизельных двигателей // *Воронежский научно-технический вестник*. 2021. Т. 3. № 3(37). С. 28–35. [Al-Bdeiri M.Sh.Kh, Krasilnikov V.V., Kadyrmetov A.M., Sergeev S.V. Factor planning of an experiment for estimating the optimal properties of heat protective coatings on details of a cylinder-piston group of diesel engines // *Voronezh Scientific-Technical Bulletin*. 2021. Vol. 3. No. 3(37). P. 28–35 (in Russian)]. DOI: 10.34220/2311-8873-2022-28-35.
23. Кульметьева В.Б., Малышев А.Е., Долина Т.В., Сметкин А.А. Влияние технологических факторов атмосферного плазменного напыления на структуру жаростойкого слоя теплозащитного покрытия // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2025. Т. 27. № 1. С. 67–76. DOI 10.15593/2224-9877/2025.1.07. [Kulmetyeva V.B., Malyshev A.E., Dolina T.V., Smetkin A.A. The influence of technological factors of atmospheric plasma spraying on the structure of a heat-resistant layer of a metal-ceramic thermal protective coating // *Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2025. Vol. 27. No. 1. P. 63–72 (in Russian)]. DOI: 10.15593/2224-9877/2025.1.07.
24. Кончин В.А., Серебровский В.И., Савенков Д.В. и др. Оптимизация технологических параметров гальванического осаждения износостойких композиционных покрытий методом математического планирования эксперимента // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2025. №. 15(3). С. 19–32. [Konchin V.A., Serebrovsky V.I., Savenkov D.V., et al. Optimization of technological parameters for electrodeposition of wear-resistant composite coatings using the method of mathematical experiment design. *Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2025. No. 15(3). P. 19–32 (in Russian)]. DOI: 10.21869/2223-1528-2025-15-3-19-32.
25. Симонова Ю.Э., Ткаченко Ю.С., Пачевский В.М. Математическое описание процесса газопламенного напыления чугуновых направляющих скольжения металлорежущих станков // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т. 8. № 3. С. 79–81. [Simonova Yu.E., Tkachenko Yu.S., Pachevsky V.M. Mathematical description of the gas-flame deposition process of the pig-iron slide guides of metal-cutting equipment // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012. Vol. 3. No. 8. P. 79–81 (in Russian)].
26. Рамазанов К.Н., Назаров А.Ю., Мухамадеев В.Р., Мухамадеев Т.В. Влияние содержания ацетилена в карбонитридных покрытиях на износостойкость режущего инструмента с покрытием TiAlCN // *Вестник УГАТУ*. 2025. Т. 29. № 4(110). С. 3–9. DOI 10.54708/19926502_2025_2941103. [Ramazanov K.N., Nazarov A.Yu., Mukhamadeev V.R., Mukhamadeev T.V. Effect of the content of acetylene in carbonitride coatings on the wear resistance of a cutting tool with a TiAlCN coating // *Vestnik UGATU*. 2025. Vol. 29. No.4(110). P. 3–9 (in Russian)].

Благодарности / Acknowledgments:

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № FRRR-2026-0005 «Исследование новых материалов покрытий, полученных методом ассистированного вакуумно-дугового осаждения, для упрочнения металлорежущих инструментов из твердого сплава применяемых для обработки материалов авиадвигателестроительной отрасли».

The study was carried out with the financial support of state assignment No. FRRR-2026-0005 “Study of new coating materials obtained by the method of assisted vacuum-arc deposition for strengthening metal-cutting tools made of hard alloy used for processing materials in the aircraft engine industry.”

Об авторах:

НАЗАРОВ Алмаз Юнирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, nazarov_almaz15@mail.ru

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, vener_muhamadeev@mail.ru.

МУХАМАДЕЕВ Тимур Венерович, студент кафедры «Технология машиностроения», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, timamv030507@gmail.com

Metadata:

Title: Modelling and experimental determination of the service life of carbide tools with TiAlCN coatings.

Author 1: Almaz Yunirovich Nazarov, Cand. Sci., Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, nazarov_almaz15@mail.ru.

Author 2: Vener Rifkatovich Mukhamadeev, Senior Lecturer at the Department of Mechanics and Digital Design, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, vener_muhamadeev@mail.ru.

Author 3: Timur Venerovich Mukhamadeev, student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Russia, timamv030507@gmail.com.

Abstract: In the field of mechanical engineering, reducing the labour-intensive processes associated with coating deposition is critical to minimising financial and time-related losses; therefore, the prediction of tool life constitutes a highly relevant research objective. To address this challenge, a mathematical model has been developed to quantify the influence of key technological parameters on the cutting path achieved by carbide cutting tools with carbonitride coatings. The coatings were synthesised using the full factorial experiment (FFE) approach, enabling a systematic evaluation of parameter interactions. The derived model allows for accurate prediction of the cutting path and, consequently, the tool life, with a demonstrated prediction accuracy of 90 %. Notably, the model is versatile and can be applied across a broad range of technological parameters (U , I_{Ti} , I_{Al} , n , p , I_{PINK}) used in the synthesis of carbonitride coatings, thus providing a practical tool for process optimisation in machining operations.

Keywords: carbonitrides, coatings, full factorial experiment, mathematical model, application modes, cutting tool, voltage, current.