

УДК 621.941.1

Развитие методики расчета показателей изнашивания сборных твердосплавных резцов

С.В. Грубый

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Development of a method to compute wear indicators of the prefabricated carbide cutters

S.V. Grubyi

Bauman Moscow State Technical University

Предложена методика расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности и периода резания (стойкости) сборных твердосплавных резцов, в том числе сменных многогранных пластин с износостойкими покрытиями. Для аппроксимации твердости покрытия как функции температуры использованы линейные, полиномиальные уравнения и сплайны. Получены расчетные зависимости износа по задней поверхности инструмента от периода резания для заготовок, выполненных из коррозионно-стойкой стали. Изучено влияние толщины покрытия, скорости резания и подачи инструмента на его износ по задней поверхности. Расчетные зависимости стойкости от скорости резания использованы для выбора режимных параметров обработки.

EDN: VBQABT, <https://elibrary/vbqabt>**Ключевые слова:** метод, расчет, параметры, износ, стойкость, износостойкое покрытие, полиномиальное уравнение, сплайн

The paper proposes a method for computing wear indicators, indicators of wear on the flank surface and the cutting period (durability) of the prefabricated carbide cutters, including replaceable multifaceted inserts with the wear-resistant coating. To approximate the coating hardness as a function of temperature, the paper uses linear, polynomial equations and splines. Calculated dependences of wear on the tool flank surface on the machining time for a workpiece made of corrosion-resistant steel were obtained. The influence of coating thickness, cutting speed and working tool feed on the cutting force and the machined surface roughness was studied. Computed dependences of the tool life on the cutting speed were used to select the machining parameters.

EDN: VBQABT, <https://elibrary/vbqabt>**Keywords:** method, computation, parameters, wear, durability, wear-resistant coating, polynomial equation, spline

На предприятиях машиностроения и аэрокосмического комплекса для оснащения операций механической обработки деталей различного назначения широко используют сборные твердосплавные инструменты со сменными многогранными пластинами (СМП). Износостойкие покрытия (ИП) на СМП позволяют повысить эффективность производства путем увеличения

режимных параметров обработки, прежде всего, скорости резания.

Режимные параметры для СМП с ИП назначают исходя из условий операции и характеристик обрабатываемого материала, руководствуясь рекомендациями фирм-изготовителей режущих инструментов. В условиях научно-исследовательских лабораторий представляется

возможным уточнить значения режимных параметров, используя расчетные методики и проверочные эксперименты.

Цель исследования — развитие методики расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности, периода резания (стойкости) сборных твердосплавных резцов, в том числе с ИП.

Твердосплавные инструменты с ИП находят широкое применение в различных операциях механической обработки. Рекомендации по их использованию и режимным параметрам отражены во многих литературных источниках, в частности [1–3]. Результаты обширных экспериментальных исследований показывают, что ИП можно рассматривать как промежуточную технологическую среду между твердосплавной инструментальной основой и обрабатываемым материалом.

Обоснованы многослойно-композиционные покрытия, у которых наружный слой выполняет основную функцию повышения износостойкости, а промежуточный слой служит барьером тепловым потокам и диффузии, нивелируя разницу в свойствах наружного и адгезионного слоев. Последний обеспечивает необходимую прочность сцепления ИП с твердосплавной основой.

Инструментальные фирмы и производители твердосплавных инструментов и СМП рекомендуют широкий спектр ИП, в том числе одно- и многослойных, наноструктурированных. Вместе с тем механизм и количественные соотношения процесса изнашивания твердосплавных инструментов с ИП изучен в основном экспериментально.

Например, экспериментально исследован износ СМП с однослойным покрытием по передней и задней поверхностям режущего инструмента [4].

Изучены силы резания, шероховатость обработанной поверхности как функции скорости, глубины резания и подачи. Отмечено увеличение износа по задней поверхности от пути резания. При износе более 0,10...0,15 мм возрастает скорость изнашивания режущего инструмента [5].

Обоснованы критические значения износа по задней поверхности, изучены механизмы изнашивания, в том числе с применением электронной микроскопии при обработке со смазочно-охлаждающей жидкостью и без нее, а также в условиях трения [6–11].

В работах разных авторов со ссылками на первоисточники по механизму адгезионного и диффузионного изнашивания [12–14] приведены количественные соотношения для расчета скорости изнашивания режущего инструмента. Так, адгезионное изнашивание контактной поверхности твердосплавного инструмента можно рассматривать как основной механизм в широком диапазоне скорости резания. Диффузионный механизм изнашивания начинает преобладать при высокой скорости резания. Процессы диффузионного изнашивания подробно рассмотрены в научных трудах профессора Т.Н. Лоладзе.

При преобладании адгезионных процессов скорость изнашивания задней поверхности твердосплавного инструмента аппроксимируют выражением

$$\frac{dw}{dt} = A \sigma_n v_r e^{\frac{-B}{T_p}}, \quad (1)$$

где A, B — установленные для конкретных условий параметры; σ_n — нормальное давление на контактной площадке; v_r — скорость скольжения; T_p — температура резания.

Параметры A, B подбирают либо по результатам проведенных экспериментов, либо в сочетании с компьютерным моделированием, используя конечно-элементный анализ.

Для условий обработки углеродистой стали твердосплавными резцами указанные параметры определяют по выражениям [13]

$$A = 7,8 \cdot 10^{-9}; B = 5,302 \cdot 10^3 \quad \text{при } T_p < 1150 \text{ К};$$

$$A = 1,198 \cdot 10^{-2}; B = 2,195 \cdot 10^4 \quad \text{при } T_p > 1150 \text{ К}.$$

Выражение (1) включает в себя основные параметры, влияющие на скорость изнашивания твердосплавного инструмента. С ростом контактного давления, скорости скольжения и температуры резания скорость изнашивания увеличивается. Для использования в расчетах этого выражения необходимо экспериментально определить соответствующие параметры для конкретных условий обработки по составу твердосплавной основы, ИП и обрабатываемого материала.

Вместе с тем представляется возможным повысить уровень обобщения подобных выражений, основываясь на общих закономерностях адгезионного изнашивания. В частности, профессором А.С. Прониковым выделены основные действующие параметры этого процесса:

контактное давление, скорость трения и твердость изнашиваемой поверхности.

Этот подход получил развитие в работах [14–16], где для расчета скорости изнашивания применен обобщенный параметр, интегрально характеризующий условия и процесс резания, — отношение скорости резания v , м/с, к твердости по Виккерсу изнашиваемой задней поверхности режущего инструмента HV , МПа, как функции температуры резания T_p , °C:

$$x = v / HV(T_p). \quad (2)$$

Предложены следующие уравнения, устанавливающие связь скорости изнашивания задней поверхности режущего инструмента с обобщенным параметром x :

• степенное уравнение для диапазона $8,96 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 5,65 \cdot 10^{-4}$

$$I_{nt} = 1,03 \cdot 10^7 (v / HV)^{2,47} = 1,03 \cdot 10^7 x^{2,47}; \quad (3)$$

• степенные уравнения для двух диапазонов параметра x

$$I_{nt} = \begin{cases} 23,92x^{0,98} & \text{при } 1,85 \cdot 10^{-5} \leq x < 1,4 \cdot 10^{-4}; \\ 8,9 \cdot 10^5 x^{2,16} & \text{при } 1,4 \cdot 10^{-4} \leq x < 5,65 \cdot 10^{-4}; \end{cases} \quad (4)$$

• полиномиальное уравнение третьей степени для диапазона $1,85 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 5,65 \cdot 10^{-4}$

$$I_{nt} = 5,386 \cdot 10^7 x^3 + 2,595 \cdot 10^5 x^2 - 13,71x + 1,159 \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Анализ результатов проверки линейной регрессии уравнений (3)–(5) по базе исходных данных показал их статистическую значимость. Приведенные далее расчетные зависимости выполнены по уравнениям (4), которые имеют более значимый коэффициент парной корреляции.

Вместе с тем эти уравнения с расчетным значением обобщенного параметра (2) можно использовать для вычисления скорости изнашивания и последующего анализа износа по задней поверхности и стойкости инструмента, если известна твердость инструментального материала или ИП как функция температуры резания.

Твердость инструментального материала падает с ростом температуры резания. Известны такие экспериментальные зависимости для твердого сплава, приведенные в работах Г.С. Креймера, А.И. Бетанели, М.Г. Лозинского, Н.Ф. Казакова, А.С. Верещака и И.П. Третьякова. Базу аппроксимирующих уравнений твердо-

сти от температуры резания можно расширить для новых экспериментальных данных по твердым сплавам и ИП.

Так, в статье [10] приведены экспериментально полученные зависимости твердости HV некоторых ИП от температуры резания. В качестве примера на рис. 1 показаны такие зависимости для покрытия $TiAlN$. Видно, что до температуры резания $600 \dots 700$ °C твердость ИП изменяется незначительно, а после ее повышения — существенно снижается.

Для аппроксимации значений твердости можно использовать полиномиальные уравнения. Так, на рис. 1 приведены аппроксимирующие графики для полиномов различной степени. Наиболее точное приближение дает полином шестой степени

$$HV = b_1 + b_2 T_p + b_3 T_p^2 + b_4 T_p^3 + b_5 T_p^4 + b_6 T_p^5 + b_7 T_p^6, \text{ МПа} \quad (6)$$

где b_1, \dots, b_7 — коэффициенты полинома.

Значения коэффициентов полиномиального уравнения (6) для рассматриваемых ИП приведены в табл. 1.

Вместе с тем практическое использование полиномиального уравнения (6) может привести к значительным погрешностям расчета в связи с очень малыми значениями коэффициентов b_1, b_4, b_5, b_6, b_7 . Эти же исходные данные можно аппроксимировать кубическим сплайном, графическое представление которого показано пунктирной линией на рис. 1.

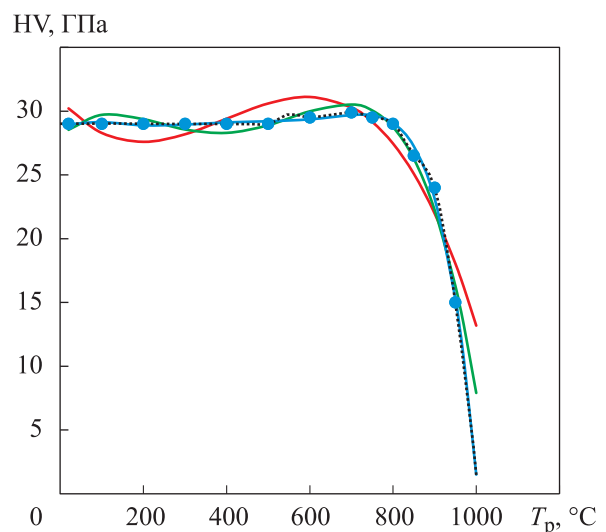


Рис. 1. Результаты аппроксимации исходной зависимости твердости HV от температуры резания T_p (●) полиномиальными уравнениями третьей (—), четвертой (—), шестой (—) степеней и кубическим сплайном (.....)

Таблица 1

Значения коэффициентов полиномиального уравнения (6) для ИП

Полином	Коэффициент	Значение для ИП			
		AlCrN	TiAlN	AlTiN	TiCN
1	b_1	$3,043 \cdot 10^4$	$2,868 \cdot 10^4$	$2,971 \cdot 10^4$	$3,022 \cdot 10^4$
T_p	b_2	1,866	18,220	-32,200	-11,800
T_p^2	b_3	$-9,998 \cdot 10^{-3}$	-0,2214	0,2926	0,1389
T_p^3	b_4	$2,173 \cdot 10^{-5}$	$1,066 \cdot 10^{-3}$	$-9,744 \cdot 10^{-4}$	$-6,243 \cdot 10^{-4}$
T_p^4	b_5	$-1,808 \cdot 10^{-8}$	$-2,430 \cdot 10^{-6}$	$1,346 \cdot 10^{-6}$	$1,194 \cdot 10^{-6}$
T_p^5	b_6	0	$2,645 \cdot 10^{-9}$	$-6,550 \cdot 10^{-10}$	$-8,063 \cdot 10^{-10}$
T_p^6	b_7	0	$-1,105 \cdot 10^{-12}$	0	0

Известно, что сплайном называется функция, которая вместе с несколькими производными непрерывна на заданном отрезке, а на каждом частичном отрезке в отдельности является некоторым алгебраическим многочленом [17]. Применен сплайн третьей степени (кубический) с локальным и численным расчетом наклонов (производных) в узловых точках.

Таким образом, гарантированы прохождение графика функции сплайна через узловые точки и непрерывность в узлах первой производной, что является достаточным для рассмотренных уравнений. Расчет функции сплайна встроен в виде отдельной процедуры в общий программный алгоритм, а исходные данные соответствующих значений твердости и температуры резания организованы в отдельном текстовом файле.

В качестве твердосплавной основы выбран однокарбидный твердый сплав. Зависимости твердости СМП из сплава ВК6М без ИП и с покрытиями AlCrN, TiAlN, AlTiN, TiCN, ВК6-TiC и ВК6-TiN от температуры резания приведены на рис. 2.

Уравнения (4) использованы для расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности и стойкости инструмента. Износ по задней поверхности в направлении вектора скорости h_{zi} , мм, и радиальный износ h_{ri} , мм, рассчитывали дискретно:

$$h_{zi} = h_{zn} + \sum_{i=1}^n i d_{h_z} \text{ при } h_{zi} \leq h_{zmax}; \quad h_{ri} = h_{zi} \sin \alpha,$$

где h_{zn} — начальное значение износа по задней поверхности, $h_{zn} = 0,02$ мм; d_{h_z} — дискретное

значение износа по задней поверхности, определяющее число расчетных точек на кривой износа, $d_{h_z} = 0,01$; α — задний угол.

Период резания вычисляли как сумму приращений времени, соответствующих увеличению износа по задней поверхности на величину d_{h_z} :

$$\tau = \sum_{i=1}^n \frac{d_{h_z}}{I_{nti}}. \tag{7}$$

Стойкость инструмента при максимальном износе $h_{zmax} = 0,1$ мм соответствует накопленному времени $T = \tau$. При выполнении условия $h_{ri} < m$ скорость изнашивания I_{nti} , мм/мин, в уравнении (7) рассчитывали по твердости ИП, где m — толщина ИС, мм. Если радиальный износ был больше толщины ИП ($h_{ri} > m$), то твердость основы определяли по линейному уравнению $HV = 13448,14 - 8,69T_p$.

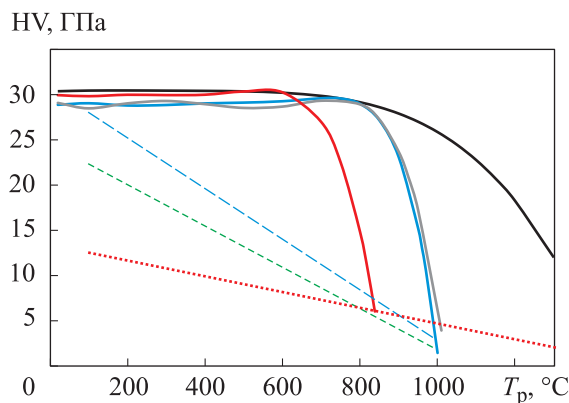


Рис. 2. Зависимости твердости HV СМП без ИП (.....) и с покрытиями AlCrN (—), TiAlN (—), AlTiN (—), TiCN (—), ВК6-TiC (---) и ВК6-TiN (---) от температуры резания T_p

Для условий обработки заготовки из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т сборным резцом с СМП формы WNUM-100412 (главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$) получены зависимости износа по задней поверхности от следующих параметров:

- периода резания τ для СМП без ИП ($m = 0$) и с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,005; 0,01; 0,02$ мм при скорости резания $v = 130$ м/мин и подаче $s = 0,3$ мм/об (рис. 3);
- периода резания τ для СМП без ИП и с покрытиями TiAlN, AlTiN и AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм при скорости резания $v = 130$ м/мин, глубине резания $t = 2$ мм и подаче $s = 0,3$ мм/об (рис. 4);
- периода резания τ для СМП без ИП и с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм при глу-

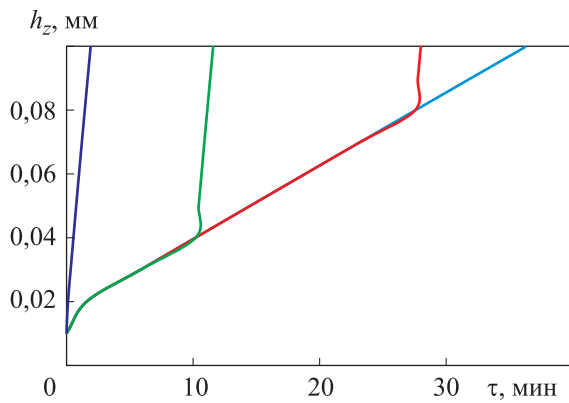


Рис. 3. Зависимости износа по задней поверхности h_z СМП без ИП (—) и с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,005$ (—), $0,01$ (—) и $0,02$ мм (—) от периода резания τ при скорости резания $v = 130$ м/мин и подаче $s = 0,3$ мм/об

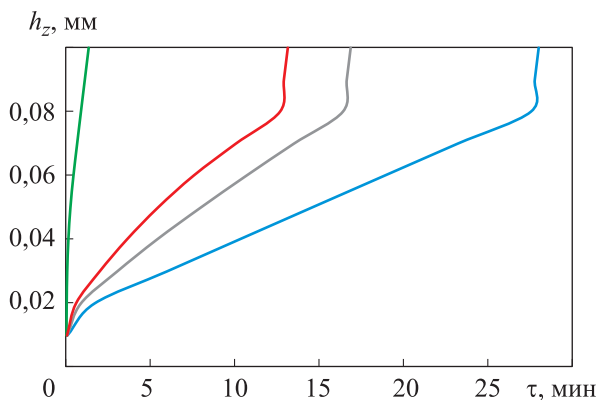


Рис. 4. Зависимости износа по задней поверхности h_z СМП без ИП (—) и с покрытиями TiAlN (—), AlTiN (—) и AlCrN (—) толщиной $m = 0,01$ мм от периода резания τ при максимальном износе $h_{z\max} = 0,1$ мм, скорости резания $v = 130$ м/мин, глубине резания $t = 2$ мм и подаче $s = 0,3$ мм/об

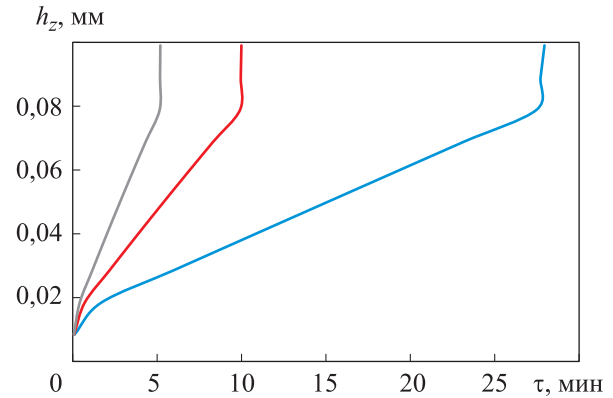


Рис. 5. Зависимости износа по задней поверхности h_z СМП с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм от периода резания τ при максимальном износе $h_{z\max} = 0,1$ мм, глубине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и скорости резания $v = 130$ (—), 240 (—) и 300 м/мин (—)

бине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и скорости резания $v = 130; 240; 300$ м/мин (рис. 5).

Следует отметить, что скорость изнашивания существенно возрастает для условий резания, когда радиальный износ становится больше, чем толщина ИП. На приведенных графиках это значение радиального износа соответствует износу в направлении скорости резания $h_z = 0,04$ мм или $h_z = 0,08$ мм. При толщине ИС $m = 0,02$ мм износ происходит только в пределах ИС.

Период резания для СМП из твердого сплава ВК6М (см. рис. 4) можно расширить путем увеличения максимального износа по задней поверхности до $h_{z\max} = 0,3...0,5$ мм, что является допустимым для твердого сплава без ИП.

Расчетные кривые износа, качественно и количественно подтвержденные экспериментальными данными, например в статьях [7, 10], можно обобщить зависимостями стойкости инструмента от скорости резания по критерию максимального износа $h_{z\max} = 0,1$ мм:

- для СМП с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм при подаче $s = 0,1; 0,3$ и $0,5$ мм/об (рис. 6);
- для СМП без ИП и с покрытиями TiCN, TiAlN и AlCrN толщиной $m = 0,01$ при глубине резания $t = 2$ мм и подаче $s = 0,3$ мм/об (рис. 7);
- для СМП с покрытием AlCrN при глубине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и толщине ИС $m = 0,005, 0,01$ и $0,02$ мм (рис. 8).

Значение максимального износа существенно влияет на режущие свойства СМП без ИП. Для СМП с ИП влияние износа проявляется

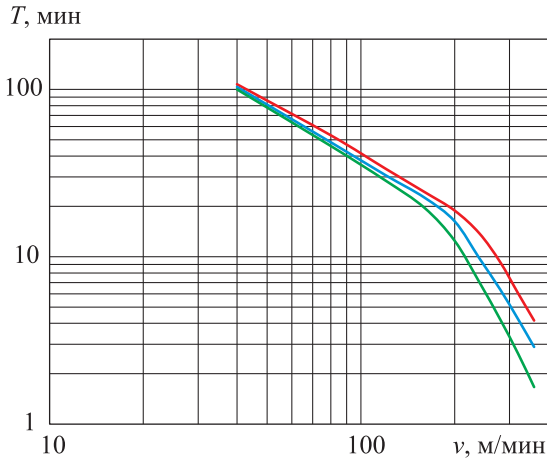


Рис. 6. Зависимости стойкости T СМП с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм от скорости резания v при максимальном износе $h_{z\max} = 0,1$ мм, глубине резания $t = 2$ мм и подаче $s = 0,1$ (—), $0,3$ (—) и $0,5$ мм/об (—)

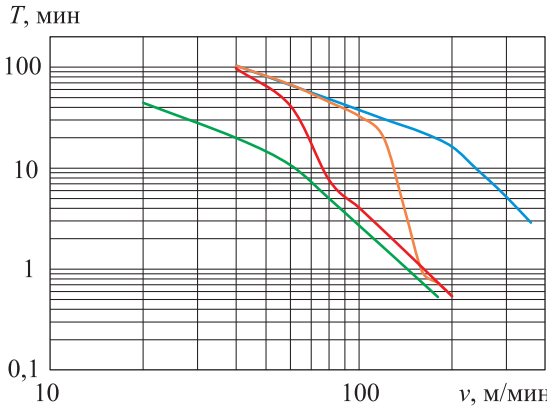


Рис. 7. Зависимости стойкости T СМП без ИП (—) и с покрытием TiCN (—), TiAlN (—) и AlCrN (—) толщиной $m = 0,01$ мм от скорости резания v при максимальном износе $h_{z\max} = 0,1$ мм, глубине резания $t = 2$ мм и подаче $s = 0,3$ мм/об

только при относительно малых значениях скорости резания.

Зависимости стойкости T СМП с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм и без ИП от скорости резания v при глубине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и максимальном износе по задней поверхности $h_{z\max} = 0,1$ и $0,3$ мм приведены на рис. 9.

По результатам анализа рис. 9 получены значения скорости резания, соответствующие стойкости СМП $T = 15$ и 30 мин, приведенные в табл. 2. Существенное увеличение скорости резания при заданной стойкости с ростом допустимого износа отмечено для СМП без ИП.

Анализ полученных зависимостей показал, что преимущество по стойкости СМП с ИП перед СМП без ИП проявляется при относитель-

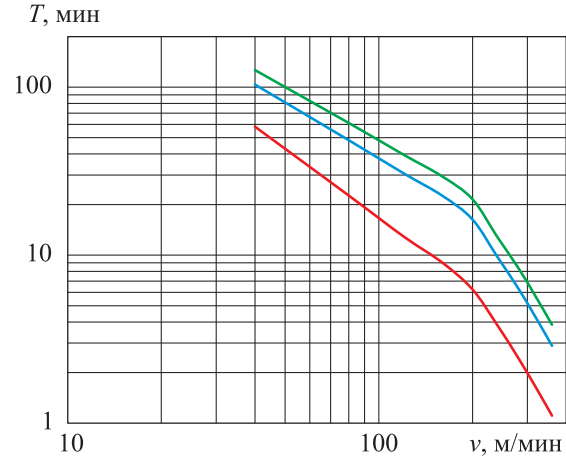


Рис. 8. Зависимости стойкости T СМП с покрытием AlCrN от скорости резания v при максимальном износе $h_{z\max} = 0,1$ мм, глубине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и толщине ИП $m = 0,005$ (—), $0,01$ (—) и $0,02$ мм (—)

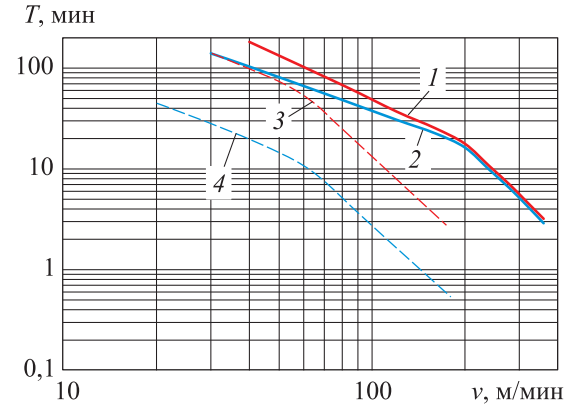


Рис. 9. Зависимости стойкости СМП T от скорости резания при глубине резания $t = 2$ мм, подаче $s = 0,3$ мм/об и различных значениях максимального износа по задней поверхности:
1 и 2 — СМП с покрытием AlCrN толщиной $m = 0,01$ мм при $h_{z\max} = 0,3$ и $0,1$ мм;
3 и 4 — СМП без ИП при $h_{z\max} = 0,3$ и $0,1$ мм

Таблица 2

Значения скорости резания при различных значениях стойкости СМП и максимального износа

Стойкость, мин	Скорость резания, м/мин, при максимальном износе по задней поверхности $h_{z\max}$, мм	
	0,1	0,3
15	205,0/50,8	211,0/95,4
30	122,8/28,3	140,7/74,1

Примечание. В числителе дроби указаны значения для СМП с покрытием AlCrN, в знаменателе — для СМП без ИП.

но больших значениях скорости резания. Зависимости стойкости СМП от скорости резания в логарифмических координатах имеют нели-

нейный характер, поэтому для аппроксимации целесообразно использовать полиномиальные уравнения или сплайны.

Стойкость твердосплавных СМП без ИП можно существенно повысить путем увеличения максимального износа до 0,3...0,5 мм. При этом следует учитывать возрастание параметров шероховатости обработанной поверхности.

Выводы

1. Основными переменными, влияющими на скорость изнашивания инструмента, определены скорость резания и твердость инструментального материала. Установлены и применены уравнения, отражающие количественную связь скорости изнашивания задней поверхности твердосплавных СМП с отмеченными переменными.

2. Влияние температуры резания на твердость ИП можно аппроксимировать полиномиальным уравнением или кубическим сплайном.

3. Приращение износа по времени рассчитано по скорости изнашивания, которая существенно различается для СМП без ИП и с ИП. Радиальный износ по задней поверхности инструмента не должен превышать толщину ИП.

4. Увеличение стойкости резцов с СМП с ИП по сравнению с СМП без ИП при точении заготовок из коррозионно-стойкой стали является более значимым для относительно больших значений скорости резания.

5. Методика расчета износа по задней поверхности и стойкости твердосплавных инструментов рекомендована для выбора режимных параметров обработки и может быть распространена на различные виды и области применения таких инструментов.

Литература

- [1] Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий нового поколения для применения в инструментальном производстве. *Справочник. Инженерный журнал*, 2011, № 12, с. 13–22.
- [2] Верещака А.С. *Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями*. Москва, Машиностроение, 1993. 336 с.
- [3] Верещака А.С., Аникеев А.И., Дачева А.В. Повышение эффективности резания труднообрабатываемых материалов с применением инструмента с наноструктурированным износостойким покрытием. *Технология машиностроения*, 2010, № 3, с. 17–22.
- [4] Lim C.Y.H., Lim S.C., Lee K.S. Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning. *Wear*, 1999, vol. 225–229-1, pp. 354–367, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00366-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00366-4)
- [5] Zeb M.A., Veldhuis S.C., Irfan M.A. et al. Comparison between PVD and CVD+PVD coated inserts for cutting forces and tool wear during turning of Ramax-2. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 31–38.
- [6] Šramhauser K., Náprstková N., Svianek J. et al. Analyses of tool wear and chip type for different coated carbide inserts in turning hardened 1.6582 steel. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 7, art. 974, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12070974>
- [7] Khrais S.K., Lin Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 1–2, pp. 64–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.052>
- [8] Avila R.F., Godoy C., Abrao A.M. et al. Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 1–2, pp. 49–56, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.026>
- [9] Park K.H., Kwon P.Y. Flank wear of multi-layer coated tool. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 11–12, pp. 771–780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.030>
- [10] Lin Y.J., Agrawal A., Fang Y. Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 3–4, pp. 226–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.007>
- [11] Grzesik W., Zalisz Z., Krol S. et al. Investigations on friction and wear mechanisms of the PVD-TiAlN coated carbide in dry sliding against steels and cast iron. *Wear*, 2006, vol. 261, no. 11–12, pp. 1191–1200, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.004>
- [12] Lorentzon J., Jarvstrat N. Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2008, vol. 48, no. 10, pp. 1072–1080, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.03.001>

- [13] Yen Y.C., Söhner J., Lilly B. et al. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 146, no. 1, pp. 82–91, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00847-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00847-1)
- [14] Filice L., Micari F., Settineri L. et al. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 5–6, pp. 545–554, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.022>
- [15] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [16] Грубый С.В. *Расчет параметров и показателей процесса резания*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
- [17] Волков Е.А. *Численные методы*. Москва, Наука, 1982. 248 с.

References

- [1] Vereshchaka A.S., Grigoryev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tool manufacture. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2011, no. 12, pp. 13–22. (In Russ.).
- [2] Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami* [Performance of cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p. (In Russ.).
- [3] Vereshchaka A.S., Anikeev A.I., Dacheva A.V. Raising cutting efficiency of heavy-duty materials using instruments with nanostructured wearing-resistant coatings. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 3, pp. 17–22. (In Russ.).
- [4] Lim C.Y.H., Lim S.C., Lee K.S. Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning. *Wear*, 1999, vol. 225–229-1, pp. 354–367, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00366-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00366-4)
- [5] Zeb M.A., Veldhuis S.C., Irfan M.A. et al. Comparison between PVD and CVD+PVD coated inserts for cutting forces and tool wear during turning of Ramax-2. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 31–38.
- [6] Šramhauser K., Náprstková N., Sviantek J. et al. Analyses of tool wear and chip type for different coated carbide inserts in turning hardened 1.6582 steel. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 7, art. 974, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12070974>
- [7] Khrais S.K., Lin Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 1–2, pp. 64–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.052>
- [8] Avila R.F., Godoy C., Abrao A.M. et al. Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 2008, vol. 265, no. 1–2, pp. 49–56, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.026>
- [9] Park K.H., Kwon P.Y. Flank wear of multi-layer coated tool. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 11–12, pp. 771–780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.030>
- [10] Lin Y.J., Agrawal A., Fang Y. Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 3–4, pp. 226–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.007>
- [11] Grzesik W., Zalisz Z., Krol S. et al. Investigations on friction and wear mechanisms of the PVD-TiAlN coated carbide in dry sliding against steels and cast iron. *Wear*, 2006, vol. 261, no. 11–12, pp. 1191–1200, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.004>
- [12] Lorentzon J., Jarvstrat N. Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2008, vol. 48, no. 10, pp. 1072–1080, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.03.001>
- [13] Yen Y.C., Söhner J., Lilly B. et al. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 146, no. 1, pp. 82–91, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00847-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00847-1)
- [14] Filice L., Micari F., Settineri L. et al. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 5–6, pp. 545–554, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.022>

- [15] Gruby S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimisation of machining process and control of mode parameters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. (In Russ.).
- [16] Gruby S.V. *Raschet parametrov i pokazateley protsessa rezaniya* [Calculation of parameters and indicators of the cutting process]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 192 p. (In Russ.).
- [17] Volkov E.A. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 248 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.12.2023

Информация об авторе

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Information about the author

GRUBYI Sergei Vitalievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В. Развитие методики расчета показателей изнашивания сборных твердосплавных резцов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 46–54.

Please cite this article in English as:

Gruby S.V. Development of a method to compute wear indicators of the prefabricated carbide cutters. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 7, pp. 46–54.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Проектирование непрерывных технологических процессов»

Авторы: В.В. Стулов, А.Г. Колесников

Приведен состав оборудования машины непрерывного литья заготовок и литейно-прокатного агрегата, рассмотрено моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и моделирование охлаждения кристаллизатора, описаны печи для выплавки стали и для ее обработки, а также основное и вспомогательное оборудование.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень магистратуры). Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении домашних заданий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>