

УДК 621.941.1

doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-11-20

Количественные показатели изнашивания твердосплавных инструментов с учетом вариации твердости

С.В. Грубый

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Quantitative Wear Indicators in Carbide Tools with Variation in Hardness

S.V. Grubyi

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена методика расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности и стойкости твердосплавных инструментов на примере сборных резцов со сменными многогранными пластинами, в том числе с износостойкими покрытиями. Предложены уравнения, связывающие скорость изнашивания задней поверхности инструмента со скоростью резания и твердостью инструментального материала как функции температуры резания. Показано, что практическое применение расчетной методики является целесообразным для стабильных условий с коэффициентами вариации твердости обрабатываемого и инструментального материалов в пределах 0,1.

Ключевые слова: твердый сплав, износостойкие покрытия, скорость изнашивания инструмента, стойкость резца, коэффициент вариации

The paper considers the method of calculating the rate of deterioration, wear and durability in the carbide tools on the example of prefabricated cutters with the replaceable polyhedral inserts, including those with the wear-resistant coatings. Equations are proposed that relate wear rate of the tool back surface with the cutting speed and the tool material hardness, as the cutting temperature function. It is shown that practical implementation of the calculation method is appropriate for stable conditions with coefficients in variation of the processed and tool material hardness within the 0.1 limit.

Keywords: hard alloy, wear-resistant coatings, tool wear rate, tool life, variation coefficient

Традиционным методом оценки изношенного состояния режущего инструмента (далее инструмент) является измерение параметров износа лезвия: глубины, ширины, длины лунки на передней поверхности и площадки износа по задней поверхности. В методическом плане измерения этих параметров детально проработаны и многократно использованы для определения степени износа лезвийных инструментов из различных инструментальных материалов (ИМ).

Наибольшее значение для практического применения имеют кривые износа, отражаю-

щие зависимость износа по задней поверхности инструмента от периода резания. Для семейства кривых износа чаще всего устанавливают критерий равного износа по задней поверхности и определяют стойкость инструмента для различных условий резания [1].

Особенность износа резцов с твердосплавными сменными многогранными пластинами (СМП) заключается в изменении состояния режущих кромок и лезвия в процессе изнашивания. Интенсивность изменения линейных параметров износа и общее состояние режущих

кромки определяются условиями контакта обрабатываемого материала (ОМ) и рабочих поверхностей лезвия, температурой резания, а также контактными нагрузками и их распределением.

С учетом того, что частные кривые износа для твердосплавных резцов вплоть до момента разрушения режущих кромок и возникновения поломок СМП носят монотонный характер, однозначно установить максимально допустимый износ резцов по кривым износа не представляется возможным.

Предельный износ по задней поверхности резцов с твердосплавными СМП, составляющий 0,5 мм, можно выявить путем учета числа сколов и поломок пластин. Дальнейшее использование СМП приводит к их повышенному расходу вследствие возрастания числа сколов и поломок. При резании труднообрабатываемых сталей и сплавов значение максимально допустимого износа можно уменьшить.

В каталогах инструментальных фирм рекомендуемый максимально допустимый износ твердосплавных СМП по задней поверхности не превышает 0,3 мм. Это значение можно скорректировать с учетом влияния экономических показателей, характерных для каждого предприятия.

Для СМП с износостойкими покрытиями процесс изнашивания приводит к увеличению радиуса округления кромки, износ по задней поверхности должен находиться в пределах толщины покрытия. Тогда при моделировании изнашивания СМП с износостойкими покрытиями износ по задней поверхности можно ограничить 0,1 мм.

Цель работы — анализ количественных показателей изнашивания задней поверхности твердосплавного инструмента, в том числе с износостойкими покрытиями, и влияния вариации твердости инструментального и обрабатываемого материалов на эти показатели.

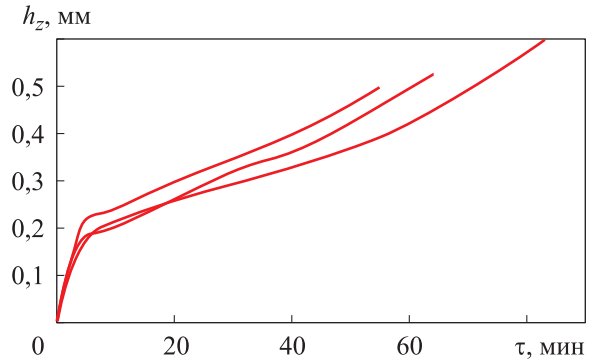


Рис. 1. Экспериментальные зависимости износа по задней поверхности h_z резцов с твердосплавными СМП от времени точения τ заготовки из стали 60 при одинаковых режимных параметрах

Помимо процесса изнашивания на выходные показатели точения существенно влияет стабильность режущих свойств. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости износа по задней поверхности резцов с твердосплавными СМП от времени точения заготовки из стали 60. Кривые износа получены при одинаковых условиях и следующих режимных параметрах: скорость резания $v = 124$ м/мин; глубина резания $t = 1,5$ мм; подача $s = 0,24$ мм/об. Для предельного износа $h_z = 0,5$ мм стойкость инструмента T варьируется в диапазоне 55...70 мин.

Экспериментально установленные значения стойкости и ее коэффициентов вариации V_T для этих условий и различных скоростей резания приведены в табл. 1. Здесь коэффициент вариации стойкости (отношение среднего квадратического отклонения (СКО) к среднему значению), находящийся в пределах $V_T = 0,09...0,24$, является прежде всего интегральной характеристикой качества инструментального твердого сплава.

Помимо качества ИМ на рассеяние экспериментальных значений стойкости оказывает влияние разброс значений твердости и прочности ОМ, колебание припуска и другие факторы.

Таблица 1

Значения стойкости и коэффициента вариации твердосплавных резцов

Скорость резания v , м/мин	Стойкость, мин		Коэффициент вариации V_T
	минимальная	максимальная	
40,8	150,0	205,0	0,157
72,0	53,0	64,0	0,090
123,6	55,0	70,0	0,124
207,6	13,5	19,5	0,240

По экспериментальным кривым износа можно определить скорость изнашивания инструмента как отношение приращения износа по задней поверхности Δ_{h_z} к соответствующему периоду резания $\Delta\tau$: $I_{nt} = \Delta_{h_z} / \Delta\tau$, мм/мин. В то же время наличие функциональной или алгоритмической связи скорости изнашивания с износом по задней поверхности, с режимными и другими параметрами позволяет рассчитать стойкость инструмента численным интегрированием.

Связь скорости изнашивания задней поверхности инструмента с контактным давлением, температурой резания и другими показателями установлена в работах [2, 3]. Для расчета скорости изнашивания применен обобщенный параметр, интегрально характеризующий условия и процесс резания. В качестве обобщенного параметра предложено использовать отношение скорости резания v , м/с, к твердости по Виккерсу изнашиваемой задней поверхности инструмента HV, МПа, как функции температуры резания T_p , °C:

$$x = v / HV(T_p).$$

Установленная связь скорости изнашивания I_{nt} сборного твердосплавного резца с обобщенным параметром x продемонстрирована на рис. 2. Здесь для каждой из 375 точек скорость изнашивания получена по соответствующим экспериментальным зависимостям $h_z = f(\tau)$, примеры которых приведены на рис. 1.

Обработано 125 экспериментальных кривых износа сборных резцов с твердосплавными СМП при различном сочетании режимных параметров. По каждой кривой путем численного дифференцирования определены три скорости изнашивания, соответствующие различным значениям износа по задней поверхности резца. Каждой из 375 точек на рис. 2 соответствует свое значение обобщенного параметра x .

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

- степенное в диапазоне $8,96 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 5,65 \cdot 10^{-4}$

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

- степенные в двух диапазонах

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

- полиномиальное третьей степени в диапазоне $1,85 \cdot 10^{-5} \leq x \leq 5,65 \cdot 10^{-4}$

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

Анализ результатов проверки линейной регрессии уравнений (1)–(3) показал их статистическую значимость. Коэффициенты парной корреляции по этим уравнениям также статистически значимы, их значения были не менее 0,65.

Зависимости скорости изнашивания I_{nt} сборных твердосплавных резцов от обобщенного параметра x , полученные путем расчета по уравнениям, приведены на рис. 2. Там же показаны данные эксперимента. Видно, что основное расхождение графиков наблюдается при малых значениях скорости изнашивания, что соответствует относительно малой скорости резания и большой стойкости инструмента.

Уравнения использованы для расчета скорости изнашивания, значения износа по задней поверхности и периода резания (стойкости) инструмента. Для расчета периода резания принята аппроксимация кривой износа в виде

$$h_{zi} = \begin{cases} C_h \tau^b & \text{при } h_{z1} \leq h_{zi}; \\ h_{z1} + \sum_{i=1}^n id_{h_z} & \text{при } h_{z1} < h_{zi} \leq h_{zmax}, \end{cases} \quad (4)$$

где C_h и b — параметры; h_{z1} — износ по задней поверхности инструмента, соответствующий окончанию начального участка изнашивания на кривой износа, $h_{z1} = 0,06$ мм; d_{h_z} —

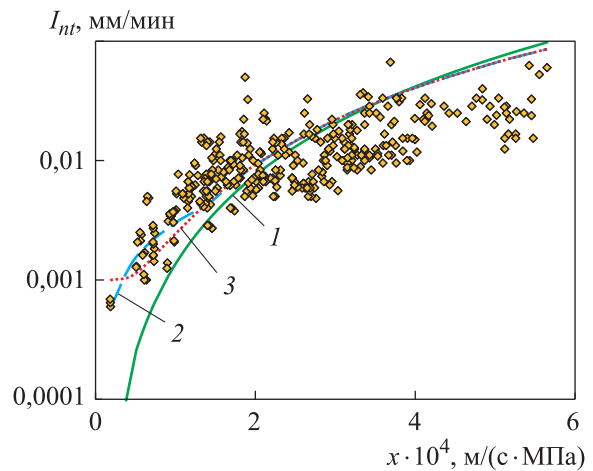


Рис. 2. Зависимости скорости изнашивания I_{nt} сборных твердосплавных резцов от обобщенного параметра x :
♦ — данные эксперимента; 1–3 — результаты расчета по выражениям (1)–(3)

дискретное значение по износу, определяющее число расчетных точек на кривой износа.

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

$$\tau = \sum_{i=1}^n \frac{d_{hz}}{I_{nti}}, \quad (5)$$

стойкость при максимальном износе $h_{z\max}$ соответствует накопленному времени $T = \tau$.

В качестве примера на рис. 3 показаны зависимости стойкости сборных твердосплавных резцов от скорости резания стальной заготовки с постоянным сечением срезаемого слоя, полученные путем расчета по аппроксимирующим уравнениям (1)–(3). Там же показаны экспериментальные значения стойкости инструмента. Как видно из рис. 3, значения стойкости инструмента, вычисленные по степенным уравнениям (2), дают самое близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Результаты интегральной оценки — показатели соответствия расчетных значений стойкости твердосплавных резцов экспериментальным данным — с использованием кривых износа по аппроксимирующим уравнениям скорости изнашивания (1)–(3) приведены в табл. 2. Диапазон изменения стойкости по этим кривым износа $T = 5,5 \dots 640,0$ мин.

Связь исходных и расчетных значений стойкости инструмента, полученная по степенным уравнениям скорости изнашивания (2), показана

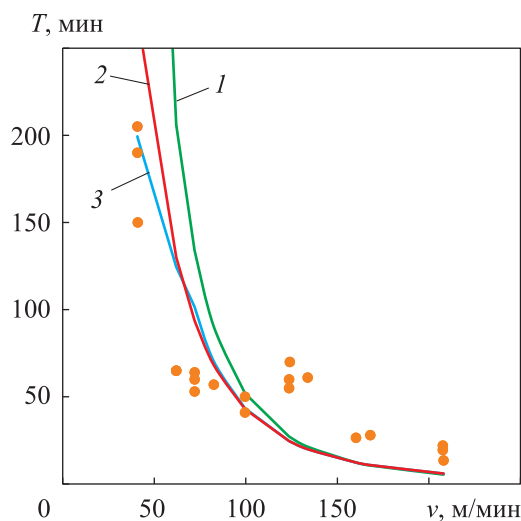


Рис. 3. Зависимости стойкости сборных твердосплавных резцов T от скорости резания v : ● — данные эксперимента; 1–3 — результаты расчета по выражениям (1)–(3)

Таблица 2

Показатели соответствия расчетных значений стойкости твердосплавных резцов экспериментальным данным

Уравнение скорости изнашивания	Число кривых износа	СКО стойкости инструмента, мин	Коэффициент корреляции
(1)	116	67,9	0,77
(2)	125	39,7	0,89
(3)	125	49,2	0,83

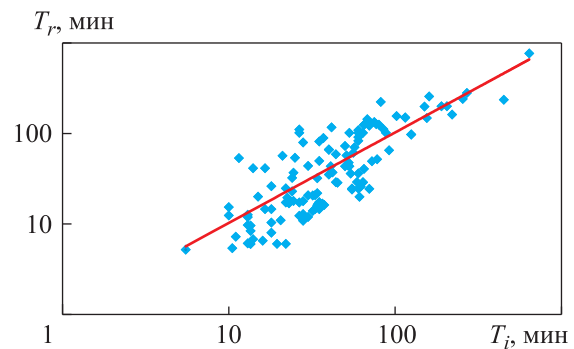


Рис. 4. Связь исходных T_i и расчетных T_r значений стойкости сборных твердосплавных резцов при числе точек $N = 125$:

◆ — результаты расчета; — линия регрессии

на на рис. 4. Уравнение линейной регрессии и коэффициент корреляции являются статистически значимыми с большим запасом по соответствующим критериям.

По результатам проведенного анализа выявлена возможность применения аппроксимирующих уравнений скорости изнашивания для расчета стойкости твердосплавного инструмента. При относительно больших значениях обобщенного параметра и скорости резания эти уравнения дают приблизительно одинаковые расчетные значения стойкости инструмента. Для относительно малых значений скорости резания предпочтительнее использовать степенные уравнения (2) в двух диапазонах обобщенного параметра.

Также для выработки практических рекомендаций существенный интерес представляют исследования расчетной методики и устойчивости ее решений в зависимости от изменения исходных условий.

Одним из эффективных инструментов таких исследований является имитационное моделирование, основная цель которого заключается в воспроизведении поведения расчетной модели

на основе анализа наиболее существенных взаимосвязей входных переменных.

Результаты имитационного моделирования, представляющего собой вычислительный эксперимент, позволяют оценить влияние фактора неопределенности значений входных переменных на выходные. Имитационное моделирование, как и метод Монте-Карло, основано на использовании случайных выборок для оценки получаемых результатов [4].

Для удобства практической реализации в некоторые программы встроены программные датчики случайных чисел. Например, в MATLAB для генерации псевдослучайных чисел имеется встроенная функция `rand`, которая позволяет без повторения получить 2^{1492} псевдослучайных чисел, равномерно распределенных в указанном интервале. С помощью функции `randn` можно сгенерировать случайные числа, распределенные по нормальному закону.

В программе PASCAL функция `random` при однократном обращении возвращает псевдослучайное число из ряда равномерно распределенных. Кроме того, для повторных обращений процедура `randomize` иницирует случайным значением встроенный датчик случайных чисел, что позволяет избежать повторения результатов.

Можно применить способ получения пары нормально распределенных чисел, используя пару равномерно распределенных. Если x_1, x_2 есть равномерно распределенные числа в интервале $[0, 1]$, то $u_1 = 2x_1 - 1$, $u_2 = 2x_2 - 1$ — равномерно распределенные числа в интервале $[-1, 1]$.

Для вспомогательной переменной $S = u_1^2 + u_2^2 > 1$ вычисляем коэффициент $w = \sqrt{-2 \ln S / S}$. Получаем пару нормально распределенных чисел, из которых выбираем любое:

$$y_1 = m + \sigma w u_1; \quad y_2 = m + \sigma w u_2, \quad (6)$$

где m и σ — заданное среднее и СКО.

Для получения ряда нормально распределенных чисел расчет (6) повторяем нужное число раз. В качестве примера на рис. 5 показан полигон распределения сгенерированных случайных чисел — твердости. Количество значений $N = 50$, заданное среднее твердости $HV = 17\,000$ МПа, коэффициент вариации $V_{HV} = 0,1$. Полигон построен по серединам шести участков без объединения малочисленных интервалов.

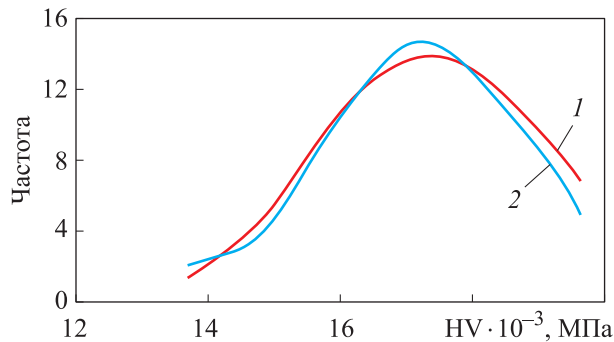


Рис. 5. Полигон распределения твердости для $N = 50$:
1 — сгенерированная абсолютная частота;
2 — частота по стандартному нормальному закону

Для сравнения показан полигон стандартного нормального распределения твердости. Нулевая гипотеза о том, что выборка значений твердости имеет нормальный закон распределения, подтверждена критериями согласия: среднего абсолютного отклонения, размаха варьирования, Пирсона, Колмогорова — Смирнова и показателей асимметрии и эксцесса. Получены следующие обобщенные показатели: среднее значение $HV = 17\,284$ МПа, коэффициент вариации $V_{HV} = 0,093$.

Если рассматривать межоперационное полустовое и чистовое точение на современном станке, то за стабильные можно принять следующие условия: установленные режимные параметры (обеспечиваемые системой ЧПУ станка); заданный припуск на обработку; геометрические параметры инструмента (следует применять СМП повышенной точности).

По данным В.К. Старкова [5], коэффициент вариации прочности и твердости заготовок для качественных углеродистых и легированных сталей находится в диапазоне $0,031 \dots 0,114$. Неустойчивость свойств труднообрабатываемых материалов больше, чем у углеродистых и легированных сталей. Коэффициент вариации предела прочности при изгибе инструментальных твердых сплавов составляет $0,034 \dots 0,190$. Для этих ИМ установлена корреляционная связь между прочностью и твердостью [5].

Проведен анализ влияния вариации твердости ИМ и ОМ на количественные показатели изнашивания сборных резцов. Твердость оказывает на скорость изнашивания инструмента как непосредственное влияние в уравнениях (1)–(3), так и опосредованное через температуру резания, с ростом которой твердость уменьшается. В свою очередь твердость и прочность ОМ зависят от температуры резания.

Теплофизические характеристики ОМ и ИМ приняты постоянными.

Рассмотрены базовые условия: заготовка из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, инструмент — из твердого сплава ВК6М. Режимные параметры приняты постоянными: скорость резания $v = 130$ м/мин; глубина резания $t = 2$ мм; подача $s = 0,3$ мм/об. Условия обработки соответствуют наружному продольному точению заготовки сборным резцом, главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$.

Температурная зависимость твердости инструментального твердого сплава задана уравнением

$$HV = HV_{20} - 8,7T_p,$$

где HV_{20} — начальная твердость при температуре 20°C , $HV_{20} = 13\,448,1$ МПа.

Разупрочнение ОМ от температуры резания и связанное с ним падение твердости также учтено в расчетной методике. Падение прочности ОМ приводит к снижению касательного напряжения в условной плоскости сдвига под действием температуры деформации.

Изучено влияние вариации твердости инструментального сплава на скорость изнашивания, износ по задней поверхности и стойкость инструмента. Для указанных условий базового варианта проведен вычислительный эксперимент, рассчитаны зависимости скорости изнашивания инструмента от износа по задней поверхности и соответствующие кривые износа с использованием численного интегрирования по выражениям (4) и (5).

Значения твердости генерировались по процедуре (6) при каждом программном обращении к расчету скорости изнашивания. Ко-

эффициент вариации твердости ОМ V_{HV} принят постоянным и равным 0,1. Для каждого значении коэффициента вариации твердости сплава сформирована выборка значений в количестве $N = 50$ и рассчитаны соответствующие зависимости скорости изнашивания и износа по задней поверхности инструмента.

На рис. 6, а и б для одной из каждой выборки $N = 50$ приведены зависимости скорости изнашивания от износа по задней поверхности сборного резца и износа по задней поверхности от времени обработки при коэффициенте вариации твердости инструментального твердого сплава $V_{HV} = 0,10; 0,20$ и $0,25$. Значения скорости изнашивания на рис. 6, а имеют существенно большее рассеяние, так как являются производными по времени для соответствующих значений износа на рис. 6, б.

С ростом коэффициента вариации твердости ИМ V_{HV} увеличиваются коэффициенты вариации скорости изнашивания V_I и стойкости V_T инструмента. Вместе с тем установлено, что коэффициент вариации скорости изнашивания больше, а коэффициент вариации стойкости меньше, чем соответствующие коэффициенты вариации твердости.

По результатам анализа 50 расчетных зависимостей получены показатели скорости изнашивания (среднее значение $I_{nt\text{ ср}}$ и коэффициент вариации V_I) и стойкости инструмента (среднее значение $T_{\text{ср}}$ и коэффициент вариации V_T) для принятого критерия затупления $h_{z\text{ max}} = 0,5$ мм (табл. 3).

Расчетные значения коэффициента вариации стойкости инструмента, характеризующие «устойчивость» расчетной методике, существенно меньше, чем его экспериментальные

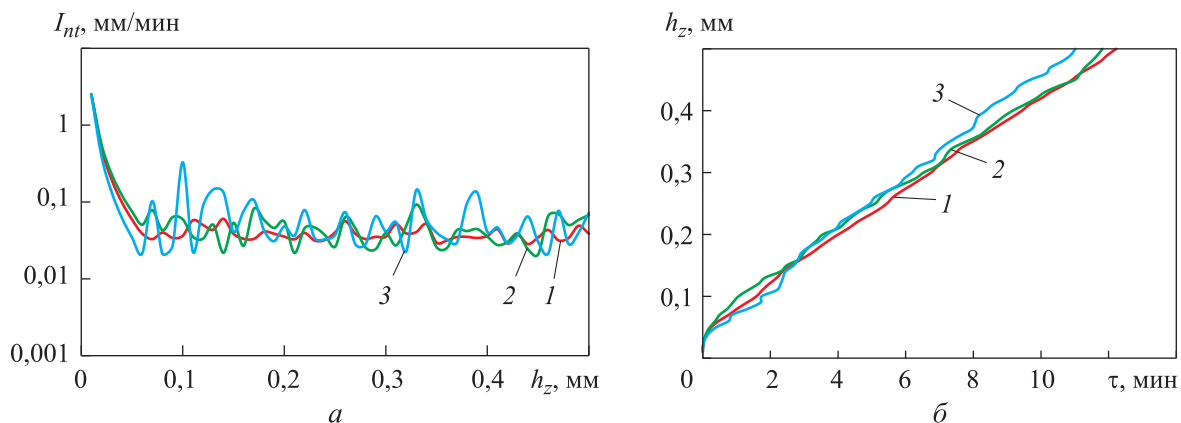


Рис. 6. Зависимости скорости изнашивания I_{nt} от износа по задней поверхности сборного резца h_z (а) и износа h_z от времени обработки τ (б) при коэффициенте вариации твердости инструментального твердого сплава $V_{HV} = 0,10$ (1), $0,20$ (2) и $0,25$ (3)

значения (см. табл. 1). На рассеяние экспериментальных значений стойкости инструмента оказывает влияние прежде всего погрешность опытов, т. е. неконтролируемое изменение условий их проведения, разнесенных во времени.

Разработанная методика использована для расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности и стойкости сборных твердосплавных канавочных резцов при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Эффективность инструмента можно значительно повысить применением износостойких покрытий [6–8]. В качестве основного ИМ выступал твердый сплав марки ВК6. Анализ проведен для твердосплавных СМП с износостойким покрытием AlCrN.

Приняты следующие базовые условия обработки: резание — свободное прямоугольное; передний угол резца $\gamma = 10^\circ$, задний угол резца $\alpha = 8^\circ$; радиус округления кромки $\rho = 0,01$ мм; скорость резания $v = 225$ м/мин; ширина срезаемого слоя $b = 2$ мм; его толщина $a = 0,2$ мм; максимально допустимый износ по задней поверхности $h_{z\max} = 0,1$ мм.

Зависимость твердости покрытия AlCrN от температуры резания аппроксимирована полиномом [9]

$$HV = b_1 + b_2T_p + b_3T_p^2 + b_4T_p^3 + b_5T_p^4, \text{ МПа,}$$

где $b_1 = 3,043 \cdot 10^4$; $b_2 = 1,866$; $b_3 = -9,998 \cdot 10^{-3}$; $b_4 = 2,173 \cdot 10^{-5}$; $b_5 = -1,808 \cdot 10^{-8}$.

На рис. 7, а и б для одной из каждой выборки $N = 50$ приведены зависимости скорости изнашивания от износа по задней поверхности сборного резца с покрытием AlCrN и износа по задней поверхности от времени обработки при коэффициенте вариации твердости износостойкого покрытия $V_{HV} = 0,1; 0,20; 0,25; 0,40$, а также без вариации твердости ($V_{HV} = 0$). Коэффициент вариации твердости ОМ $V_{HB} = 0,1$.

Показатели скорости изнашивания (среднее значение $I_{nt\text{ ср}}$ и коэффициент вариации V_I) и стойкости сборного резца с износостойким покрытием AlCrN (среднее $T_{\text{ср}}$, минимальное T_{min} , максимальное T_{max} значения и коэффициент вариации V_T) при различных значениях коэффициента вариации твердости покрытия приведены в табл. 4.

Таблица 3

Показатели скорости изнашивания и стойкости инструмента при различных значениях коэффициента вариации твердости инструментального твердого сплава

Коэффициент вариации твердости V_{HV}	Показатели			
	скорости изнашивания		стойкости	
	$I_{nt\text{ ср}}$, мм/мин	V_I	$T_{\text{ср}}$, мин	V_T
0,05	0,037	0,099	11,9	0,013
0,10	0,037	0,254	11,9	0,029
0,20	0,044	0,501	12,3	0,063
0,25	0,045	0,720	12,7	0,085

Таблица 4

Показатели скорости изнашивания и стойкости сборного резца при различных значениях коэффициента вариации твердости износостойкого покрытия

Коэффициент вариации твердости V_{HV}	Показатели					
	скорости изнашивания		стойкости			
	$I_{nt\text{ ср}}$, мм/мин	V_I	$T_{\text{ср}}$	T_{min}	T_{max}	V_T
			мин			
0	0,006	–	14,4	–	–	–
0,10	0,007	0,62	14,8	12,9	16,6	0,053
0,20	0,010	1,25	15,3	13,2	17,4	0,066
0,25	0,011	1,11	15,3	13,3	17,5	0,072
0,40	0,031	2,49	15,9	13,5	18,5	0,070

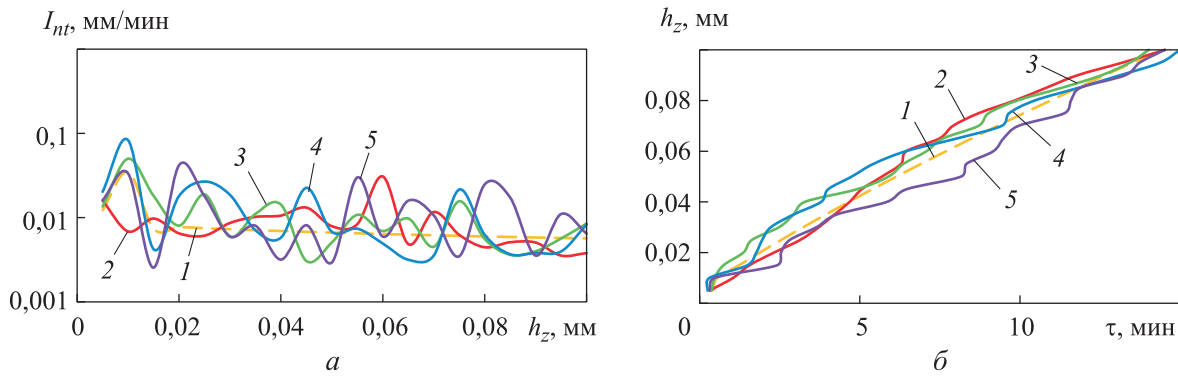


Рис. 7. Результаты расчета для сборного канавочного резца при коэффициенте вариации твердости износостойкого покрытия $V_{HV} = 0$ (1), 0,10 (2), 0,20 (3), 0,25 (4) и 0,40 (5):
 а — зависимости скорости изнашивания I_{nt} от износа по задней поверхности h_z ;
 б — зависимости износа по задней поверхности h_z от времени обработки τ

Таблица 5

Показатели температуры и тангенциальной составляющей силы резания при различных значениях коэффициента вариации твердости ОМ

Коэффициент вариации твердости V_{HV}	Показатели							
	температуры резания				составляющей силы резания			
	$T_{p,cp}$	$T_{p,min}$	$T_{p,max}$	V_{Tp}	$P_{z,cp}$	$P_{z,min}$	$P_{z,max}$	V_{Pz}
	мин				Н			
0	1081,1	–	–	–	822,7	–	–	–
0,05	1072,5	879,8	1171,1	0,05	816,3	740,2	905,3	0,056
0,10	1097,2	918,8	1283,1	0,10	842,5	696,4	1021,8	0,110
0,20	1099,0	672,2	1473,3	0,17	856,6	562,0	1250,6	0,197

Установлено, что, как и для твердого сплава без покрытия, с ростом коэффициента вариации твердости коэффициенты вариации скорости изнашивания и стойкости инструмента увеличиваются, причем коэффициент скорости изнашивания существенно больше. В соответствии с критериями согласия нормальному закону [10], распределение скорости изнашивания не подчинено нормальному закону, а распределение стойкости соответствует нормальному закону.

Таким образом, рассеяние твердости инструментального твердого сплава или износостойкого покрытия многократно увеличивает рассеяние скорости изнашивания сборного резца и слабо влияет на рассеяние интегральной характеристики его стойкости.

Для зафиксированного значения коэффициента вариации твердости износостойкого покрытия $V_{HV} = 0,1V_{Tp}$ проведен анализ влияния коэффициента вариации твердости обрабатываемой коррозионно-стойкой стали на рассея-

ние температуры и тангенциальной составляющей силы резания.

Показатели температуры резания (среднее $T_{p,cp}$, минимальное $T_{p,min}$, максимальное $T_{p,max}$ значения и коэффициент вариации V_{Tp}) и тангенциальной составляющей силы резания (среднее $P_{z,cp}$, минимальное $P_{z,min}$, максимальное $P_{z,max}$ значения и коэффициент вариации V_{Pz}) из каждой выборки $N = 50$ значений при различных значениях коэффициента вариации твердости ОМ приведены в табл. 5. Коэффициенты вариации температуры V_{Tp} и тангенциальной составляющей силы резания V_{Pz} практически соответствуют коэффициенту вариации твердости ОМ.

Результаты проведенного анализа подтверждают, что коэффициент вариации твердости ОМ V_{HV} не должен превышать 0,1. При возрастании коэффициента вариации твердости ОМ существенно увеличиваются диапазоны изменения температуры и силы резания. Использование расчетной методики теряет практическое

значение при большом различии минимальных и максимальных значений этих показателей.

Выводы

Методика расчета скорости изнашивания, износа по задней поверхности и стойкости

твердосплавных инструментов, основанная на применении уравнений (1)–(3), рекомендована к применению для операций со стабильными условиями. Методика распространяется на твердые сплавы с износостойкими покрытиями, для которых известны значения твердости как функции температуры резания.

Литература

- [1] Грубый С.В. *Физические закономерности процесса изнашивания твердосплавных и алмазных инструментов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 123 с.
- [2] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [3] Грубый С.В. *Расчет параметров и показателей процесса резания*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
- [4] Рыжиков Ю.И. *Имитационное моделирование. Теория и технологии*. Санкт-Петербург, Корона Принт; Москва, Альтекс-А, 2004. 384 с.
- [5] Старков В.К. *Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве*. Москва, Машиностроение, 1989. 296 с.
- [6] 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.
- [7] Hartner. *Материалы и покрытия*. *hartner.intertull.rf: веб-сайт*. URL: <http://hartner.xn--e1afkahtmcj.xn--p1ai/> (дата обращения: 15.07.2022).
- [8] Coating guide. *platit.com: веб-сайт*. <https://www.platit.com/en/products/coating-guide/> (дата обращения: 15.07.2022).
- [9] 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>
- [10] Львовский Е.Н. *Статистические методы построения эмпирических формул*. Москва, Высшая школа, 1982. 224 с.

References

- [1] Grubyy S.V. *Fizicheskie zakonomernosti protsesssa iznashivaniya tverdosplavnykh ialmaznykh instrumentov* [Physical laws of wearing process for carbide and diamond tools]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 123 p. (In Russ.).
- [2] Grubyy S.V. *Optimizatsiya protsesssa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of mechanical processing and management on operating conditions]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. (In Russ.).
- [3] Grubyy S.V. *Raschet parametrov i pokazateley protsesssa rezaniya* [Calculation of parameters and factors of cutting process]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 192 p. (In Russ.).
- [4] Ryzhikov Yu.I. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i tekhnologii* [Simulation modeling. Theory and technologies]. Sankt-Petersburg, Korona Print Publ.; Moscow, Alteks-A Publ., 2004. 384 p. (In Russ.).
- [5] Starkov V.K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabilnostyu i kachestvom v avtomatizirovanom proizvodstve* [Cutting work. Managing stability and quality in automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 296 p. (In Russ.).
- [6] Vereshchaka A.S., Anikeev A.I., Dacheva A.V. Tough machining effectiveness increase by application of tooling with nanostructured wear-resistant coating. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 3, pp. 17–22. (In Russ.).
- [7] Hartner. *Materialy i pokrytiya* [Hartner. Materials and coatings]. *hartner.intertull.rf: website*. URL: <http://hartner.xn--e1afkahtmcj.xn--p1ai/> (accessed: 15.07.2022). (In Russ.).

- [8] Coating guide. *platit.com: website*. <https://www.platit.com/en/products/coating-guide/> (accessed: 15.07.2022).
- [9] 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>
- [10] Lvovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for making 'empirical expressions']. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 224 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.06.2022

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@yandex.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@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В. Количественные показатели изнашивания твердосплавных инструментов с учетом вариации твердости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 2, с. 11–20, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-11-20

Please cite this article in English as:

Grubyi S.V. Quantitative Wear Indicators in Carbide Tools with Variation in Hardness. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 2, pp. 11–20, doi: 10.18698/0536-1044-2023-2-11-20



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Теоретические основы лазерной обработки»

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюроев

В монографии рассмотрены физические основы технологических процессов лазерной обработки, а также вопросы взаимодействия концентрированного лазерного излучения с материалами, образования плазменного факела и парогазового канала. Представлены аналитические и численные методы анализа температурных полей и остаточных напряжений при лазерной обработке. На базе краткого изложения основ теории кристаллизации рассмотрены процессы затвердевания жидкого металла в условиях лазерного воздействия. Описаны особенности фазовых и структурных превращений материалов в твердом состоянии. Большое внимание уделено технологической прочности металла при лазерной обработке. Обобщены и систематизированы представления об особенностях образования трещин в различных температурных интервалах при лазерной сварке и наплавке.

Для инженерно-технических и научных работников, а также студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

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://bmstu.press>