

УДК 621.941.1

doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-26-34

## Методика расчета выходных показателей точения

**С.В. Грубый**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## A Method for Calculating the Output Indicators of Turning

**S.V. Grubyi**

Bauman Moscow State Technical University

К выходным показателям токарной обработки относятся износ и стойкость инструмента, сила и температура резания. Для изучения и анализа этих показателей традиционно используют экспериментальные исследования, требующие значительных материальных, финансовых и временных ресурсов. В справочной литературе и научных публикациях содержатся степенные функции, обобщающие результаты экспериментальных исследований по допустимой скорости резания, главной составляющей силы и крутящему моменту. Эти функции отражают ограниченные условия по инструментальным и обрабатываемым материалам и справедливы для инструмента без износа. Предложена расчетная методика выходных показателей точения, основанная на разработанной модели, устанавливающей взаимную связь с режимными параметрами, геометрическими параметрами инструмента, характеристиками инструментального твердого сплава и обрабатываемого материала. В основу расчетов положено уравнение скорости изнашивания инструмента как функции от скорости резания и поверхностной твердости инструментального материала. Расчетная методика позволяет определить и проанализировать выходные показатели без проведения трудоемких экспериментальных исследований. Эксперименты могут присутствовать только для проверки и уточнения результатов расчета.

**Ключевые слова:** износ и стойкость инструмента, скорость резания, скорость изнашивания, сила резания, температура резания

Rate of wear, tool life, cutting force and cutting temperature belong to output indicators of turning. To study and analyze these indicators, experimental studies are traditionally used, which require considerable material, financial and time resources. Reference literature and scientific publications contain power functions generalizing the results of experimental research on allowable cutting speeds, the main component of force and the torque. These functions reflect the limited conditions with regard to tool and workpiece materials and are true for tools without wear. A method for calculating the output indicators of turning is proposed based on the developed model. It establishes a mutual relationship with the cutting mode settings, geometrical parameters of the tool and the characteristics of hard alloy and machined material. The calculations are based on the equation of tool wear speed versus the cutting speed and the surface hardness of the tool material. The proposed method makes it possible to determine and analyze the output indicators without conducting labour intensive experimental studies. Experiments are used only for validation and refinement of the calculation results.

**Keywords:** wear and tool life, cutting speed, depth, feed, speed of tool wear, cutting force, cutting temperature

К основным выходным показателям механической обработки относятся износ и стойкость инструмента, сила и температура резания. С помощью этих показателей можно рассчитать себестоимость, трудоемкость, производительность рабочего процесса и энергопотребление, определить расход и необходимое количество инструмента для обработки заданной партии заготовок.

Цель работы — разработка методики расчета износа, стойкости инструмента, силы и температуры резания как функций режимных параметров для условий обработки твердосплавными режущими инструментами конструкционных сталей и сплавов.

Нормативные значения стойкости инструментов по видам обработки приведены в справочной литературе без какой-либо связи с режимными параметрами. Также в справочниках для типовых инструментальных и обрабатываемых материалов (ОМ) имеются степенные функции, позволяющие рассчитать скорость резания по заданной стойкости инструмента, глубине и подаче и главную составляющую силы резания [1, 2].

Основным недостатком этих функций является отсутствие их связи с износом инструмента. Подразумевается, что эти зависимости справедливы для нового (неизношенного) инструмента. Зависимости по температуре резания в указанных справочниках отсутствуют.

Известные инструментальные фирмы Sandvik Coromant, Iscar и Walter предлагают обширные материалы в электронном виде или каталогах, а также разнообразные учебные пособия, рекомендации и электронные машинные калькуляторы, направленные на выбор конструкций и типоразмера инструментов, условий, режимов обработки и имеющие ярко выраженный практический уклон [3–5].

Расчет силовых показателей, таких как тангенциальная составляющая силы, мощность и крутящий момент, основан на использовании удельной силы, приведенной к единице площади сечения срезаемого слоя, значения которой по группам и маркам ОМ даны, например, в справочнике [6]. Какие-либо уравнения, характеризующие связь режимных параметров и износа инструмента с выходными параметрами обработки, в этих материалах не приведены.

Зарубежные литературные источники отражают результаты многолетних исследовательских работ по моделированию процесса резания и изнашивания инструментов [7, 8]. Были

предложены и рассмотрены аналитические модели для расчета скорости изнашивания инструмента по передней (ПП) и задней (ЗП) поверхностям, основанные на абразивном, диффузионном и адгезионном механизмах.

Аналитические модели в основном используются для обоснования и проверки результатов конечно-элементного анализа в условиях свободного прямоугольного резания [9–14]. Это ограничение преодолевается и доводится до уровня 3D-конечно-элементного моделирования, что позволяет рассматривать износ инструмента в условиях общего случая несвободного косоугольного резания, справедливых, например, для наружного продольного точения [15, 16].

Учитывая высокий уровень зарубежных публикаций, в частности приведенных в работах [7–16], также следует отметить качественный и частный характер результирующих расчетных зависимостей параметров износа от времени обработки. Достоверность этих зависимостей не проверена и не подтверждена в широком диапазоне изменения режимных переменных.

Результаты исследований подтверждают, что диффузионный износ начинает оказывать количественное влияние при высоких температурах резания, превышающих 700 °С. Поэтому основным механизмом изнашивания инструментов из твердого сплава (ТС) принят механизм адгезионно-усталостного изнашивания, вызванный адгезионным взаимодействием между ТС и ОМ. Адгезионный характер изнашивания твердосплавных режущих инструментов подтвержден многочисленными исследованиями состояния изношенных поверхностей режущих инструментов и обработанных поверхностей на заготовках, выполненными в том числе с использованием методов электронной микроскопии.

На основе адгезионного механизма изнашивания проведено количественное обобщение экспериментальных исследований износа токарных сборных режущих инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП), для условий наружного продольного точения заготовок из конструкционных сталей. Для расчета скорости изнашивания и износа инструмента использован обобщенный параметр, справедливость применения которого подтверждена для различных групп ОМ в монографии [17].

В качестве обобщенного параметра предложено отношение  $x = v/HV(T_p)$ , где  $v$  — ско-

рость резания, м/с; HV — твердость (по Виккерсу) изнашиваемой поверхности инструмента как функция температуры резания  $T_p$ , МПа.

Для современных марок инструментальных ТС установлена связь скорости изнашивания и обобщенного параметра при обработке заготовок из конструкционных сталей и сплавов в виде уравнения

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

где  $I_{nt}$  — скорость изнашивания ЗП инструмента, мм/мин;  $K_I$  — коэффициент для группы деформируемых алюминиевых сплавов,  $K_I = 0,0026$ .

Здесь под скоростью изнашивания понимают приращение линейного значения износа в тангенциальном направлении к соответствующему приращению по времени обработки.

Уравнение (1) обобщает взаимную связь многочисленных параметров, характеризующих процесс резания и контактные явления на поверхностях лезвия, через среднюю температуру резания. Выполнен анализ разработанной модели, раскрывающий отдельные внутренние связи и значения параметров, на примере обработки заготовок из типовых материалов — представителей различных групп по обрабатываемости. К таким материалам отнесены: алю-

миниевый сплав марки АМг6, конструкционная сталь марки 45 и коррозионноустойчивая сталь марки 12Х18Н10Т.

Разупрочнение под действием температуры различных марок сталей и сплавов учтено по результатам испытаний, приведенным в справочной литературе. Для каждой марки ОМ было подобрано свое уравнение, аппроксимирующее влияние температуры. Связь между прочностью и твердостью принята линейной с постоянным коэффициентом для каждой группы ОМ. В табл. 1 приведены соответствующие аппроксимирующие уравнения для прочности  $\sigma_b$  и модуля упругости  $E$  ОМ.

Разупрочнение инструментальных материалов также учтено при моделировании процесса. Так, по результатам обработки опубликованных опытных данных установлены аппроксимации влияния температуры резания  $T_p$  на твердость HV, МПа, ТС:

- однокарбидного ВК6М

$$HV = 13448,1 - 8,7T_p;$$

- двухкарбидного Т15К6

$$HV = 16833,0 - 13,3T_p;$$

Таблица 1

**Влияние температуры резания на прочность и модуль упругости ОМ**

Марка материала	Аппроксимирующие уравнения
АМг6	$\sigma_b = 376 - 0,83T_p, \quad T_p \leq 250 \text{ }^\circ\text{C};$ $\sigma_b = 168,5, \quad T_p > 250 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = 71$
Сталь 45	$\sigma_b = 624,5 + 0,3T_p, \quad T_p < 300 \text{ }^\circ\text{C};$ $\sigma_b = 2349,1e^{(-0,0038T_p)}, \quad 300 \text{ }^\circ\text{C} < T_p \leq 500 \text{ }^\circ\text{C};$ $\sigma_b = 351,4, \quad T_p > 500 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = 210 - 0,095T_p, \quad T_p \leq 500 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = 162,5, \quad T_p > 500 \text{ }^\circ\text{C}$
12Х18Н10Т	$\sigma_b = 657 - 0,41T_p, \quad T_p \leq 700 \text{ }^\circ\text{C};$ $\sigma_b = 370, \quad T_p > 700 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = 200 - 0,077T_p, \quad T_p \leq 800 \text{ }^\circ\text{C};$ $E = 138,4, \quad T_p > 800 \text{ }^\circ\text{C}$

Примечание. Значения  $\sigma_b$  указаны в МПа, значения  $E$  — в ГПа.

• мелкозернистого с условным обозначением P10M (относится к группе P по международной классификации)

$$HV = 17500 - 10T_p.$$

Изменение модуля упругости ТС  $E_T$  отражено поправочным коэффициентом

$$K_E = 1,005 - 1,24 \cdot 10^{-4} T_p;$$

$$E_T = EK_E,$$

где  $E$  — модуль упругости при комнатной температуре.

Для теплофизического расчета рассмотрены источники теплоты: теплота деформации в зоне стружкообразования и теплота трения на передней и задней контактных площадках. По расчетной методике А.Н. Резникова теплота каждого источника передается в той или иной мере ОМ, резцу и стружке. Соотношения тепловых потоков меняются, что приводит к изменению средних температур контактных площадок по мере изнашивания инструмента.

В проведенном расчете учтен дополнительный подогрев прирезцово-й стороны стружки и поверхностных слоев материала от теплоты деформации. Также применена функция, отражающая закон распределения температуры от теплоты деформации на ЗП инструмента. При использовании смазочно-охлаждающей жидкости в расчет температур следует внести коррекцию на теплоотдачу в окружающую среду.

Применены пути и методы теоретического анализа геометрических параметров инструмента и зоны стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов на примере сборных резцов, оснащенных твердосплавными СМП.

Отличительной особенностью исследования является установленная количественная связь между геометрией инструмента, физико-механическими характеристиками ТС и ОМ, направлением схода и характеристиками контакта стружки, углом сдвига и контактными давлениями [18].

Результатами расчетов являются значения сил и температур на контактных площадках инструмента и средней температуры резания, необходимой для количественного определения уравнения (1). Это уравнение использовано для определения скорости изнашивания, изно-

са и периода резания до допустимого значения износа (стойкости) инструмента.

Для расчета стойкости инструмента принята аппроксимация кривой износа в виде

$$\begin{aligned} h_{zi} &= C_h \tau^b && \text{при } h_{zi} \leq h_{z1}; \\ h_{zi} &= h_{z1} + \sum_{i=1}^n i d_{hz} && \text{при } h_{z1} < h_{zi} \leq h_{z\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $h_{zi}$  — текущее ( $i$ -е) значение износа по ЗП;  $C_h$  — постоянная;  $\tau$  — период резания;  $b$  — показатель степени;  $h_{z1}$  — значение износа, соответствующее окончанию начального участка изнашивания на кривой износа;  $d_{hz}$  — дискретное значение по износу, определяющее число расчетных точек на кривой износа;  $h_{z\max}$  — допустимое значение износа.

Тогда стойкость инструмента соответствует допустимому значению износа  $h_{z\max}$  и вычисляется как сумма приращений времени при увеличении износа на величину  $d_{hz}$ :

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{d_{hz}}{I_{nti}}. \quad (3)$$

На основании анализа экспериментальных кривых износа твердосплавных резцов установлена связь между средней скоростью изнашивания на начальном участке и скоростью изнашивания для значения износа  $h_{z1}$  в виде соотношения  $I_{nt0} = 2I_{nt1}^{0,844}$ , а среднее значение износа начального участка принято как  $h_{z1} = 0,06$  мм.

Тогда показатель степени и постоянная из выражения (2) могут быть определены следующим образом:

$$b = 0,5 I_{nt1}^{0,156}; \quad C_h = \frac{h_{z1}}{T_1^b}; \quad T_1 = \frac{h_{z1}}{I_{nt0}}.$$

Исходными данными для расчета являются режимные параметры, износ и геометрические параметры инструмента, механические и физические характеристики ТС — ОМ:  $v$  — скорость резания, м/мин (м/с);  $t$  — глубина резания, мм;  $s$  — подача, мм/об;  $h_{z\max}$  — допустимое значение износа;  $d_{hz}$  — дискретное значение по износу, мм;  $\gamma$  — передний угол, град;  $\lambda$ ,  $\varphi$  и  $\varepsilon$  — угол наклона кромки, в плане и при вершине СМП соответственно, град;  $\alpha_p$  — задний угол на СМП, град;  $r$  — радиус вершины СМП, мм;  $HV = f(T_p)$  — твердость поверхности ТС как функция температуры резания, МПа;  $E_2 = f(T_p)$  и  $E_1 = f(T_p)$  — модули упругости

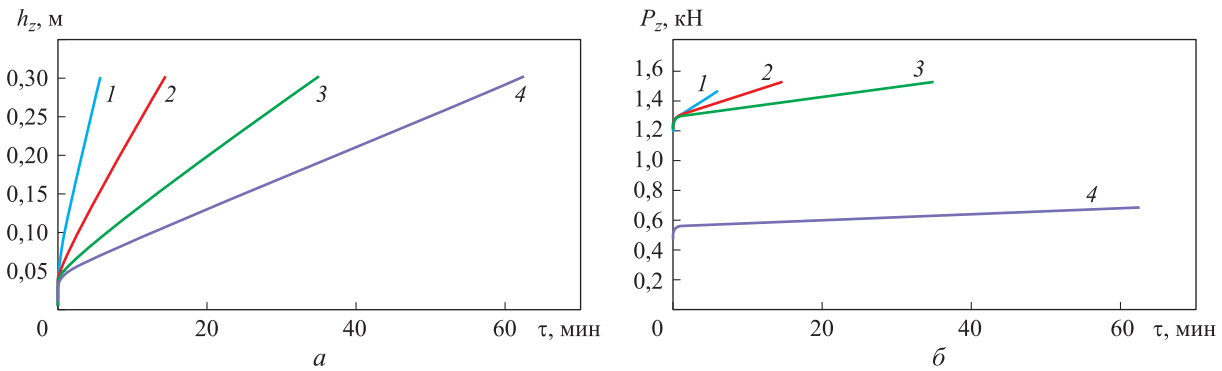


Рис. 1. Зависимости износа твердосплавного резца по ЗП  $h_z$  (а) и главной составляющей силы резания  $P_z$  (б) от времени обработки  $\tau$  различных ОМ:

1 — ВК6М — 12Х18Н10Т; 2 — Т15К6 — сталь 45; 3 — Р10М — сталь 45; 4 — Т15К6 — АМг6

ТС и ОМ как функции температуры резания, ГПа;  $\mu_2$  и  $\mu_1$  — коэффициенты Пуассона ТС и ОМ;  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$  — коэффициенты теплопроводности ТС и ОМ, кал/(см·с·град);  $\sigma_b = f(T_p)$  — прочность ОМ как функция температуры резания, МПа;  $\omega_1$  — коэффициент температуропроводности ОМ, см<sup>2</sup>/с;  $\tau_p$  — условное касательное напряжение в плоскости сдвига, МПа.

Расчетными параметрами являются:  $\alpha$  — задний угол, град;  $\gamma_c$  — передний угол в направлении схода стружки, град [18];  $a_{ef}$  и  $b_{ef}$  — эффективные толщина и ширина срезаемого слоя, мм;  $f_d$  — площадь срезаемого слоя, мм<sup>2</sup> [18];  $l_m$  — длина контакта стружки с ПП, мм;  $f_p$  — площадь контакта, мм<sup>2</sup>;  $\beta$  и  $\omega$  — углы сдвига и действия, град;  $K_L$  — коэффициент укорочения стружки (усадка);  $R_c, P_{zp}, P_{yp}, P_{xp}$  — сила стружкообразования и ее составляющие на ПП инструмента соответственно, Н;  $P_{t1}, P_N$  и  $P_{t2}$  — силы на ПП, действующие в плоскости схода стружки и перпендикулярно ей, Н [18];  $\sigma_{max}$  — максимальное контактное давление на режущей кромке, МПа;  $q_z$  — среднее контактное давление на ЗП, МПа;  $f_{tr}$  — коэффициент трения;  $F_{t1}$  и  $F_n$  — касательная и нормальная силы на ЗП, Н;  $q_d, q_{1t}, q_{2t}$  — интенсивность теплового потока в плоскости сдвига, на ПП и ЗП соответственно, кал/(см<sup>2</sup>·с);  $q_1$  и  $q_2$  — интенсивности итоговых тепловых потоков на ПП и ЗП инструмента, кал/(см<sup>2</sup>·с);  $T_d, T_p, T_1, T_2$  — температура деформации, резания, на ПП и ЗП инструмента соответственно, °С;  $x$  — обобщенный параметр, м/(с·МПа);  $I_{nt} = f(x)$  — скорость изнашивания, рассчитываемая по выражению (1), мм/мин;  $h_{zi}$  — текущее значение износа, определяемое соотношением (2), мм;  $T$  — стойкость, вычисляемая по формуле (3), мин.

Установленные количественные связи и внутренние аппроксимации позволяют рассчи-

тать скорость изнашивания инструмента по ЗП с использованием последовательности приведенных выражений для текущего состояния инструмента. Значения скорости изнашивания, соответствующие износу, использованы для определения стойкости инструмента путем численного интегрирования. Алгоритм расчета включает в себя основную программу с подключением ряда программных модулей и имеет оригинальное авторское содержание.

Для выбранной пары ТС — ОМ влияние режимных параметров сказывается через изменение температуры резания и, соответственно, физических параметров: твердости, модуля упругости и обобщенного параметра. Каждой марке ТС и ОМ соответствуют свои функциональные зависимости физических параметров от температуры и, как следствие, свои значения скорости изнашивания, износа и стойкости инструмента.

Интегральной иллюстрацией методики являются приведенные на рис. 1, а зависимости износа от времени точения для различных пар ОМ — ТС: ВК6М — 12Х18Н10Т, Т15К6 — сталь 45, Р10М — сталь 45, Т15К6 — АМг6. Условия обработки были следующие: резец с твердосплавной СМП формы WNUM-100412, углы: передний  $\gamma = -7^\circ$ , наклона кромки  $\lambda = 7,5^\circ$  и в плане  $\varphi = 90^\circ$ , скорость резания  $v = 120$  м/мин, глубина резания  $t = 2$  мм, подача  $s = 0,3$  мм/об.

На рис. 1, б приведены соответствующие этим условиям и ОМ зависимости главной составляющей силы резания от времени обработки. Сила резания растет по времени обработки, так как по мере износа увеличиваются контактные площадки. Для алюминиевого сплава, учи-

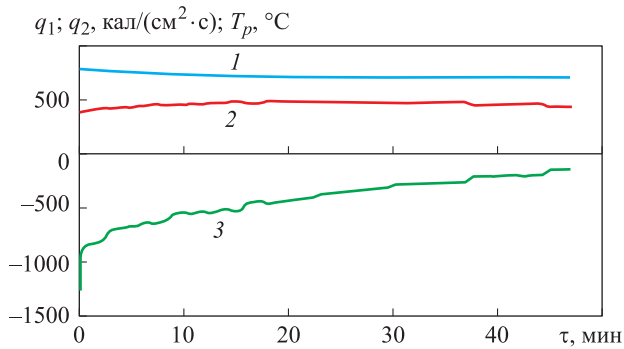


Рис. 2. Зависимость температуры резания  $T_p$  (1), интенсивностей тепловых потоков на ПП  $q_1$  (2) и ЗП инструмента  $q_2$  (3) от времени обработки ОМ  $\tau$

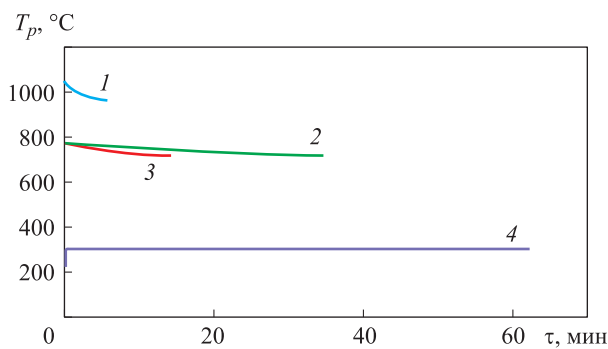


Рис. 3. Зависимость температуры резания  $T_p$  от времени обработки  $\tau$  различных ОМ:  
1 — ВК6М — 12Х18Н10Т; 2 — Р10М — сталь 45;  
3 — Т15К6 — сталь 45; 4 — Т15К6 — АМг6

тывая его пониженную прочность и твердость, сила резания значительно ниже, чем для стали.

Температура также зависит от размеров контактных площадок и направлений итоговых тепловых потоков. На рис. 2 показаны зависимости теплофизических показателей — интенсивностей тепловых потоков на ПП и ЗП  $q_1$ ,  $q_2$ , кал/(см<sup>2</sup>·с), и температуры резания  $T_p$ , °С, — от времени обработки. На ПП тепловой поток

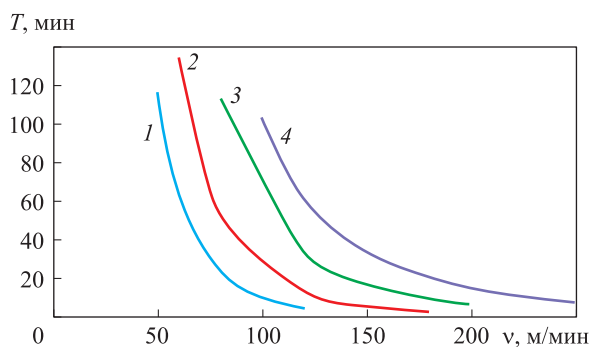


Рис. 4. Зависимость стойкости инструмента  $T$  от скорости резания  $v$  для различных ОМ:  
1 — ВК6М — 12Х18Н10Т; 2 — Т15К6 — сталь 45;  
3 — Р10М — сталь 45; 4 — Т15К6 — АМг6

направлен в тело инструмента, на ЗП — в заготовку, поэтому он имеет отрицательное значение и уменьшается. Температура резания плавно и несущественно снижается.

На рис. 3 приведены зависимости температуры резания от времени обработки различных ОМ для режимов и условий, указанных ранее. Для коррозионно-стойкой стали при точении со скоростью  $v = 120$  м/мин температура резания имеет существенные значения порядка 1000 °С, что приводит к интенсивному износу (см. рис. 1, а, кривая 1). Температура может быть снижена прежде всего путем уменьшения скорости резания.

Имея расчетные кривые износа для выбранных условий, можно рассчитать по выражению (3) стойкость инструмента, соответствующую допустимому значению износа  $h_{zmax} = 0,3$  мм (см. рис. 1, а).

На рис. 4 приведены зависимости стойкости инструмента от скорости резания различных ОМ, рассчитанные при постоянной глубине резания  $t = 2$  мм, подаче  $s = 0,3$  мм/об и допустимом значении износа  $h_{zmax} = 0,3$  мм. Из приведенных графиков видно существенное влияние марки ОМ и марки ТС на стойкость инструмента.

Кроме того, стойкость инструмента непосредственно определяется допустимым значением износа инструмента  $h_{zmax}$ . С увеличением износа стойкость повышается, но возрастает сила резания и ухудшается качество обработанной поверхности.

На рис. 5 приведены зависимости стойкости инструмента от скорости резания, рассчитанные для условий точения заготовки из стали 45 твердосплавным резцом при допустимом значении износа резца  $h_{zmax} = 0,3, 0,5$  и  $0,8$  мм.

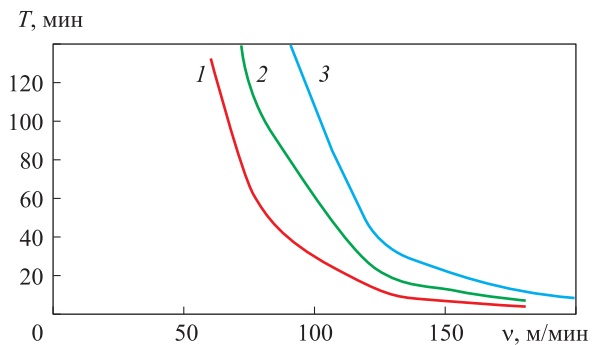


Рис. 5. Зависимость стойкости инструмента  $T$  от скорости резания  $v$  при допустимом значении износа резца  $h_{zmax} = 0,3$  (1),  $0,5$  (2) и  $0,8$  мм (3)

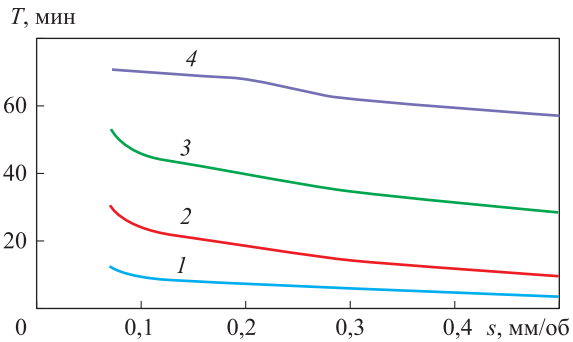


Рис. 6. Зависимость стойкости инструмента  $T$  от подачи  $s$  для различных ОМ:

1 — ВК6М — 12Х18Н10Т; 2 — Т15К6 — сталь 45;  
3 — Р10М — сталь 45; 4 — Т15К6 — АМг6

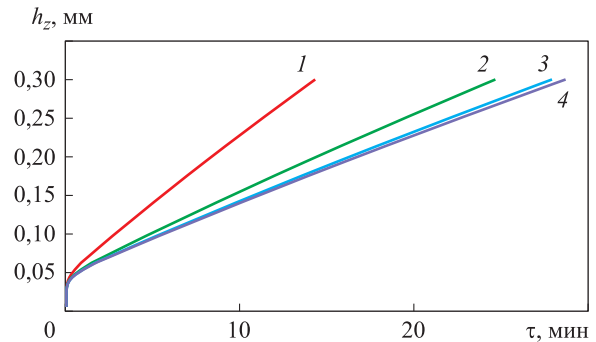


Рис. 7. Зависимость износа по ЗП  $h_z$  сборных резцов от времени обработки ОМ  $\tau$

Стойкость инструмента также снижается с ростом подачи и глубины резания. На рис. 6 показаны зависимости стойкости инструмента от подачи для различных ОМ.

Геометрические параметры сборных резцов также оказывают существенное влияние на износ и стойкость. Расчеты выполнены для четырех резцов, оснащенных СМП разной формы. Обозначения СМП и углы режущей части резцов приведены в табл. 2.

На рис. 7 показаны зависимости износа по ЗП сборных резцов 1–4 (см. табл. 2) от времени обработки ОМ при точении стали марки 45

Таблица 2

**Обозначения СМП и углы режущей части резцов**

Номер резца	Обозначение СМП	Углы, град				
		$\varphi$	$\gamma$	$\alpha$	$\lambda$	$\varepsilon$
1	WNUM-100412	90	-7	6,9	7,5	80
2	WNUM-100412	60	-7	6,9	7,0	80
3	SNUN-150412	45	-7	7,0	3,0	90
4	PNUM-110416	45	-8	7,9	6,0	108

в режимах и условиях, указанных ранее. Номера кривых соответствуют условным номерам резцов.

Приведенные зависимости подтверждают экспериментальные данные об увеличении стойкости инструмента с уменьшением глав-

ного угла в плане и увеличении угла при вершине СМП.

## Выводы

1. Анализ полученных расчетных данных и зависимостей свидетельствует о существенном воздействии рассмотренных факторов на выходные показатели точения. Для каждой пары ТС — ОМ необходимо учитывать влияние на эти показатели режимных параметров, износа и геометрических параметров инструмента. Изучить это влияние экспериментально в полном объеме не представляется возможным.

2. Расчетная методика, реализованная программно, позволяет выполнить такой анализ практически без каких-либо материальных и временных затрат. Эксперименты могут присутствовать только как проверочные и уточняющие исходные данные обработки.

3. Существенным отличием предложенной методики является возможность расчета скорости изнашивания и стойкости инструмента с последующей аппроксимацией полиномиальными или степенными уравнениями, предназначенными для оптимизации и управления режимными параметрами.

4. Расчетная методика может быть распространена на другие виды лезвийной обработки и группы ОМ.

## Литература

- [1] Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1985. 496 с.
- [2] Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. *Режимы резания труднообрабатываемых материалов*. Москва, Машиностроение, 1986. 240 с.

- [3] *Технологии обработки металлов резанием*. URL: <http://sandvik-coromant.tools> (дата обращения 22 марта 2019).
- [4] *Iscar's Machining Power*. URL: <http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=070a9b94ffde4c67b807949bbd458317> (дата обращения 15 декабря 2018).
- [5] *Walter Machining Calculator*. URL: <https://www.walter-tools.com/ru-ru/press/media-portal/apps/overview/pages/default.aspx> (дата обращения 05 декабря 2018).
- [6] GARANT. *Справочник по обработке резанием*. URL: <http://www.garant-tools.com> (дата обращения 5 октября 2018).
- [7] Lorentzon J., Järnstråt N. Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, iss. 10, pp. 1072–1080, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.03.001
- [8] Zanger F., Schulze V. Investigations on Mechanisms of Tool Wear in Machining of Ti-6Al-4V using FEM Simulation. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 158–163, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.082
- [9] Yen Y.-C., Söhner J., Lilly B., Altan T. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 146, pp. 82–91, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00847-1
- [10] Filice L., Micari F., Settineri L., Umbrello D. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 545–554, doi: 10.1016/j.wear.2006.06.022
- [11] Xie L.-J., Schmidt J., Schmidt C., Biesinger F. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation. *Wear*, 2005, vol. 258, pp. 1479–1490, doi: 10.1016/j.wear.2004.11.004
- [12] Kishawy H.A., Kannan S., Balazinski M. Analytical modeling of tool wear progression during turning particulate reinforced metal matrix composites. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2005, vol. 54 (1), pp. 55–58, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60048-1
- [13] Lim C.Y.H., Lim S.H., Lee K.S. Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning. *Wear*, 1999, vol. 225–229, pp. 354–367, doi: 10.1016/S0043-1648(98)00366-4
- [14] Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 637–647, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006
- [15] Filice L., Micari M., Settineri L., Umbrello D. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 545–554, doi: 10.1016/j.wear.2006.06.022
- [16] Attanasio A., Ceretti E., Rizzuti S., Umbrello D., Micari F. 3D finite element analysis of tool wear in machining. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57(1), pp. 61–64, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.123
- [17] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [18] Грубый С.В. *Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными режущими*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 107 с.

## References

- [1] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Directory technologist-mechanical engineer]. Ed. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 496 p.
- [2] Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Modes of cutting difficult materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 240 p.
- [3] *Tekhnologii obrabotki metallov rezaniem* [Metal cutting technology]. Available at: <http://sandvik-coromant.tools> (accessed 22 March 2019).
- [4] *Iscar's Machining Power*. Available at: <http://mpwr.iscar.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=070a9b94ffde4c67b807949bbd458317> (accessed 15 December 2018).
- [5] *Walter Machining Calculator*. Available at: <https://www.walter-tools.com/ru-ru/press/media-portal/apps/overview/pages/default.aspx> (accessed 05 December 2018).



- [6] GARANT. *Spravochnik po obrabotke rezaniem*. [Handling Guide. Garant]. Available at: <https://www.garant-tools.com/> (accessed 05 October 2018).
- [7] Lorentzon J., Järvstråt N. Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, iss. 10, pp. 1072–1080, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.03.001
- [8] Zanger F., Schulze V. Investigations on Mechanisms of Tool Wear in Machining of Ti-6Al-4V using FEM Simulation. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 158–163, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.082
- [9] Yen Y.-C., Söhner J., Lilly B., Altan T. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 146, pp. 82–91, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00847-1
- [10] Filice L., Micari F., Settineri L., Umbrello D. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 545–554, doi: 10.1016/j.wear.2006.06.022
- [11] Xie L.-J., Schmidt J., Schmidt C., Biesinger F. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation. *Wear*, 2005, vol. 258, pp. 1479–1490, doi: 10.1016/j.wear.2004.11.004
- [12] Kishawy H.A., Kannan S., Balazinski M. Analytical modeling of tool wear progression during turning particulate reinforced metal matrix composites. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2005, vol. 54 (1), pp. 55–58, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60048-1
- [13] Lim C.Y.H., Lim S.H., Lee K.S. Wear of TiC-coated carbide tools in dry turning. *Wear*, 1999, vol. 225–229, pp. 354–367, doi: 10.1016/S0043-1648(98)00366-4
- [14] Astakhov V.P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 637–647, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006
- [15] Filice L., Micari M., Settineri L., Umbrello D. Wear modelling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 545–554, doi: 10.1016/j.wear.2006.06.022
- [16] Attanasio A., Ceretti E., Rizzuti S., Umbrello D., Micari F. 3D finite element analysis of tool wear in machining. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57(1), pp. 61–64, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.123
- [17] Gruby S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of the machining process and control of regime parameters]. Moscow, Bauman Press, 2014. 149 p.
- [18] Gruby S.V. *Modelirovaniye protsessa rezaniya tverdosplavnymi ialmaznymi reztami* [Modeling of cutting process with carbide and diamond tools]. Moscow, Bauman Press, 2010. 107 p.

Статья поступила в редакцию 27.03.2019

## Информация об авторе

**ГРУБЫЙ Сергей Витальевич** — доктор технических наук, 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, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В. Методика расчета выходных показателей точения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9, с. 26–34, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-26-34

### Please cite this article in English as:

Gruby S.V. A Method for Calculating the Output Indicators of Turning. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 9, pp. 26–34, doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-26-34