

УДК 621.9.01.001.5

**М. И. Михайлов**, доктор технических наук, профессор;**Н. Э. Тетерич; В. И. Воробей**Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»  
пр. Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

## К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ РЕЗЦОВ ПО СИЛЕ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена эффективность использования сил резания в качестве параметра диагностики резцов при чистовой обработке для условий роботизированного технологического комплекса. Приведены результаты экспериментальных исследований сил резания и получены коэффициенты эмпирических зависимостей силы резания от подачи и глубины резания. Установлена связь между силами резания и параметрами режимов обработки.

**Ключевые слова:** резание; точение; диагностика; резцы; силы резания; износ режущих кромок.

Рис. 3. Табл. 2. Библиогр.: 15 назв.

**M. I. Mikhailov**, Doctor of Technical Sciences, Professor;**N. Э. Teterich; V. I. Vorobei**Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, 48 October Ave.,  
246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (23) 247 91 61, mihailov@gstu.by

## TO THE QUESTION OF CUTTERS DIAGNOSTICS BY CUTTING FORCE IN CONDITIONS OF A ROBOTIC TECHNOLOGICAL COMPLEX

The efficiency of using cutting forces as a parameter for diagnostics of cutters during finishing in conditions of RTC is considered. The results of experimental studies of cutting forces are given and the coefficients of empirical dependences of the cutting force on the feed and the depth of cut are obtained. The relationship between the cutting forces and the parameters of the processing modes has been established.

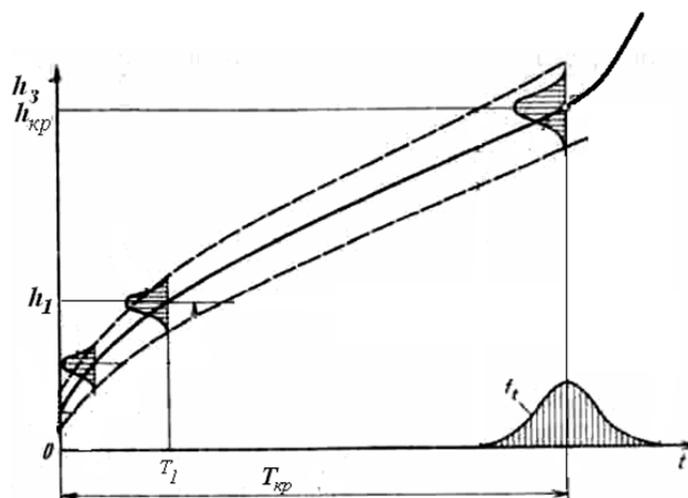
**Key words:** cutting; turning; diagnostics; cutters; cutting forces; wear of cutting edges.

Fig. 3. Table 2. Ref.: 15 titles.

**Введение.** Износ режущего инструмента оказывает значительное влияние на эффективность операций механической обработки [1—10]. Время обработки и действующие силы резания влияют на характер процесса износа, который, в свою очередь, связан со стойкостью инструмента [2; 3; 7—15].

В большинстве исследований рассматриваются две основные формы износа — износ по задней поверхности и износ в виде лунки на передней поверхности инструмента [3; 5; 7; 8; 10; 12].

В процессе резания инструмент изнашивается вследствие трения между стружкой и передней поверхностью, а также между заготовкой и задней поверхностью, т. е. в процессе резания происходит удаление микрочастиц с контактных поверхностей, а также микровыкрашивание режущей кромки. Ни один из известных инструментальных материалов не может противостоять трению в условиях высоких температур и давлений без определенных изменений его первоначальной формы с течением времени. Типовая кривая износа по задней поверхности представлена на рисунке 1. Критическое значение износа часто приводится в справочной литературе.

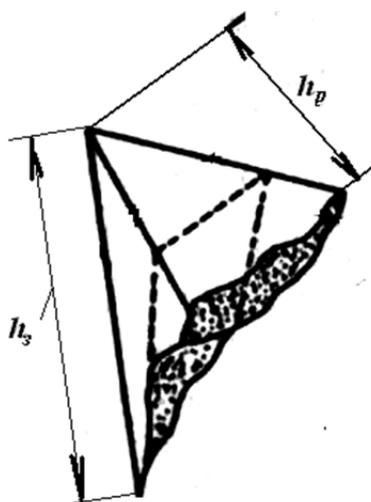


**Рисунок 1. — Кривые износа инструмента по задней поверхности**

Как видно на рисунке 1, чтобы определить остаточный период стойкости, необходимо знать величину износа по задней поверхности в произвольный период времени  $T_1$ . Величину износа определяют различными методами, как прямыми, так и косвенными измерениями. В качестве косвенных чаще всего используются методы на основе тензоизмерений, при которых тензодатчики размещаются на элементах приводов станков или на элементах оснастки. Использование таких методов требует определения связи между силой резания и размерами площадки износа, которая зависит от режимов обработки и обрабатываемых материалов.

Целью настоящего исследования было установление связи между износом режущей кромки и силами резания, а также возможности использования измеряемых значений силы резания для косвенной оценки износа режущей кромки для условий робототехнических комплексов.

Тщательное изучение износа по задней поверхности показывает, что этот очаг износа состоит из двух самостоятельных участков — износа вершины и износа непосредственно задней поверхности (рисунок 2).



**Рисунок 2. — Геометрия износа режущего инструмента**

В некоторых случаях износ вершины следует рассматривать отдельно от износа по задней поверхности (см. рисунок 2). Иногда износ по вершине протекает более быстро, чем износ по задней поверхности, особенно при обработке материалов с высокой абразивной способностью и при использовании инструментов с малым радиусом при вершине. При чистовых операциях точения вершина резца находится в непосредственном контакте с заготовкой, и чрезмерный ее износ может оказывать отрицательное влияние на точность обработки и шероховатость поверхности.

**Материалы и методы исследования.** В случае обработки округление острых углов или затупление вершины приводит к выходу инструментов из строя.

Наращение площадки износа вызывает изменение силы резания:

$$P_z = P_{H_z} + \Delta P_z, \quad (1)$$

где  $P_z$  — вертикальная составляющая силы резания, кгс;

$P_{H_z}$  — начальное значение силы, определяемое как

$$P_{H_z} = C_1 t S^u, \quad (2)$$

где  $C_1$  — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, скорости резания и условий обработки на силу резания;

$t$  — глубина резания;

$S$  — подача;

$u$  — коэффициент, отражающий влияние подачи на силу резания.

При обработке стали твердосплавным резцом приращение силы резания линейно связано с величиной площадки износа:

$$\Delta P_z = C_u t h_3, \quad (3)$$

где  $\Delta P_z$  — приращение силы резания;

$C_u$  — коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и подачи на силу резания;

$h_3$  — величина износа по задней поверхности резца.

Подставив (2) и (3) в (1), получим общее выражение для силы резания:

$$P_z = C_1 t S^u + C_u t h_3. \quad (4)$$

Приращение  $\Delta P_z$  силы резания может быть принято в качестве критерия оценки износа вершины, вызывающего изменение геометрической формы режущей кромки в течение определенного времени работы с определенной подачей.

В любых условиях механической обработки рассматриваются три составляющие силы резания: вертикальная, осевая и радиальная. Измерение этих трех сил проводилось в следующем порядке.

В момент начала резания, т. е. в нулевой момент времени, снимается показание динамометра и рассчитывается значение силы резания  $P_z$ , соответствующее работе острого резца, для площади среза  $A_0$ .

Таким же образом снимаются показания для осевой  $P_x$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания.

После определенного времени, например 5 мин, измеряется и рассчитывается новое значение силы резания. Это значение соответствует силе  $P_{z_z}$  (в кгс) с учетом износа, который резец получит за 5 мин. Действительная площадь среза (в  $\text{мм}^2$ ) меньше расчетной на величину  $\Delta A$  (в  $\text{мм}^2$ ), т. е. на величину припуска, несрезаемого с поверхности заготовки из-за радиального износа инструмента. Реальная площадь среза  $A_p = A_0 - \Delta A$ . На рисунке 3 видно, что несрезаемая площадь может быть представлена в виде трапеции, т. е. площадь  $\Delta A$  равна площади KLMN.

Удельная сила резания  $K_p$  (кгс /  $\text{мм}^2$ ), необходимая для удаления слоя  $\Delta A$ , является постоянной для данного обрабатываемого материала при постоянном значении подачи. Приращение  $\Delta P$  силы, необходимой для удаления слоя  $\Delta A$ , может быть определено из выражения

$$\Delta P_z = K_p \Delta A$$

где  $\Delta P_z$  — величина силы, которую требуется добавлять к вертикальной составляющей силы резания, действующей в течение времени резания (в данном случае  $T_m = 5$  мин).

Полное значение вертикальной составляющей силы, действующей на инструмент в течение определенного времени ( $T_m = 5$  мин), может быть получено из выражения  $P_z = P_{z_H} + \Delta P_z$ .

Измерения и расчет в такой последовательности выполнялись для разных периодов времени  $T_m$  (10, 17, 25, 35, 45, 60 мин).

**Результаты исследования и их обсуждение.** При математическом расчете сил общее уравнение для главной составляющей силы резания принимается в виде  $P_z = P_{z_H} + \Delta P_z$ .

Рассмотрим члены  $P_{z_H}$  и  $\Delta P_z$  этого уравнения (см. рисунок 3).

Начальное значение силы  $P_{z_H}$  может быть определено из выражения

$$P_{z_H} = C_i t^u,$$

где  $C_i$  — постоянная, зависящая от свойств инструментального и обрабатываемого материалов, скорости резания и условий обработки;

$u$  — постоянная, зависящая от подачи и вида операции точения.

По мере увеличения времени обработки измеряемое значение  $P_{z_H}$  уменьшается, однако приращение  $\Delta P_z$  растет в связи с увеличением износа, поэтому полное значение силы  $P_z$  увеличивается. Значения  $P_{z_H}$ , измеренные в опытах, приведены в таблице 1, по которой рассчитаны значения  $C_i$ .

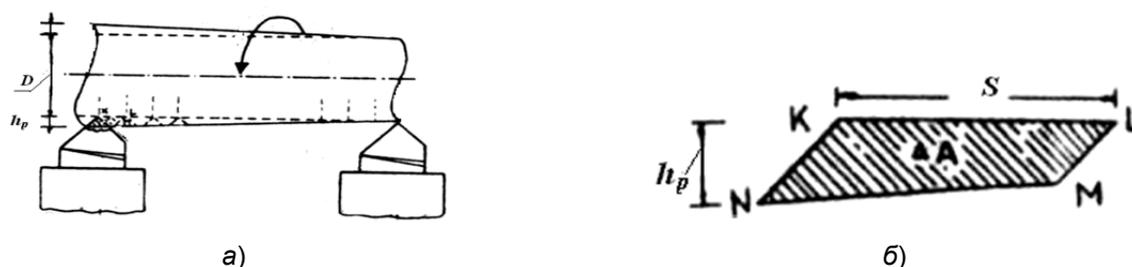


Рисунок 3. — Влияние износа инструмента на образование поверхности заготовки: а — схема обработки; б — сечение несрезаемого слоя

Начальные значения  $P_H$ , т. е. при  $T_m = 0$ , измерялись во всех опытах. Установлено, что все последующие значения  $P_H$  были меньше первоначального, что связано с увеличением действительной силы  $P_z$  резания. Значение  $P_{zH}$ , измеренное при  $T_m = 0$ , дает величину действительной силы  $P_z$ , поскольку приращение  $\Delta P_z$  равно нулю.

Значение постоянной  $C_i$  определялось в каждом опыте, включающем семь проходов, по среднему значению  $P_{zH}$  из выражения

$$C_i = P_H / tS^u.$$

В каждом опыте определяли значения  $P_{zH}$  (по семи проходам), а также значения  $tS^u$ . Значения  $t$  и  $S$  по всем опытам приведены в таблице 1.

Значение  $u$  было постоянным во всех опытах и равным 0,75. Таким образом, для каждого опыта определяли значение  $C_i$ . В таблице 1 приводятся значения  $C_i$  для 16 опытов, а также расчетное значение.

Значение  $\Delta P_z$  возрастает с течением времени обработки в связи с постоянным увеличением износа вершины. Можно принять, что величина  $\Delta P_z$  пропорциональна подаче  $S$  и максимальной величине износа  $h_p$  вершины, т. е.

$$\Delta P_z = Sh_p, \quad (5)$$

что можно также представить в следующем виде:

$$\Delta P_z = C_S Sh_p, \quad (6)$$

где  $C_S$  — постоянный коэффициент, отражающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, условий обработки и скорости на силу резания.

Т а б л и ц а 1. — Определение среднего значения  $C_i$

Номер опыта	$P_{zH}$ , Н	$t$ , мм	$S$ , мм / об	$C_i = P_H / tS^u$
1	163,5	0,5	0,09	199,0
2	369,5	1,0	0,14	161,4
3	790,0	1,5	0,27	140,6
4	2120,0	2,0	0,62	151,7
5	151,0	0,5	0,09	183,8
6	328,0	1,0	0,14	143,3
7	696,0	1,5	0,27	123,8
8	2080,0	2,0	0,62	148,8
9	124,0	0,5	0,09	150,9
10	313,0	1,0	0,14	136,8
11	712,0	1,5	0,27	126,7
12	1827,0	2,0	0,62	130,7
13	127,0	0,5	0,09	154,5
14	283,0	1,0	0,14	122,8
15	721,0	1,5	0,27	128,3
16	1704,0	2,0	0,62	121,9

Примечание. Среднее значение  $C_i$  составило 145,0.

Выражения (5) и (6) экспериментально не подтвердились. На основании опытных данных значения  $C_S$  и  $\Delta P_z$  могут быть получены из выражения

$$C_S = \frac{\Delta P_z}{S^{0,5} h_p} \quad (7)$$

Уравнение (7) получено на основании 112 опытов. В таблице 2 приведены средние значения всех параметров.

Из полученных экспериментальных данных  $C_S = 116$ .

При известных значениях  $P_{zH}$  и  $\Delta P_z$  можно рассчитать полное значение действующей силы:

$$P_z = P_{H_z} + \Delta P_z = C_z t S^u + C_s h_3 S^{0,5}.$$

Тогда выражение, связывающее силу резания и износ, будет иметь следующий вид:

$$h_3 = \frac{P_z - 4,64 t \sqrt[4]{S^3}}{116 \sqrt{S}}.$$

Данные таблицы 2 позволяют заключить, что, измеряя силу резания, можно определить величину износа и по критическому ее значению рассчитать остаточный период стойкости  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_1 \left( \frac{h_{кр_3}}{h_1} - 1 \right),$$

где  $T_1$  — рассматриваемый промежуток времени;

$h_{кр_3}$  — критическое значение величины износа;

$h_1$  — величина износа инструмента по задней поверхности в рассматриваемый промежуток времени.

Т а б л и ц а 2. — Результаты экспериментов

Время резания, мин	Подача $S_0$							
	0,09		0,14		0,27		0,62	
	$C_z = 386,6$		$C_z = 310,0$		$C_z = 223,2$		$C_z = 147,3$	
	$\Delta P_z$	$h_{3cp}$						
5	2,19	0,0632	4,89	0,1129	5,68	0,0943	22,18	0,2429
10	4,947	0,1422	5,26	0,1213	7,55	0,1253	37,80	0,4140
17	10,63	0,3062	13,19	0,304	19,41	0,3222	52,73	0,5774
25	10,88	0,3129	18,57	0,4271	12,27	0,2037	52,09	0,5704
35	11,03	0,3171	10,76	0,2480	31,77	0,5273	66,67	0,7301
45	9,673	0,2795	14,73	0,3396	53,69	0,8910	99,08	1,0850
60	15,287	0,4328	19,30	0,4449	53,39	0,8843	112,97	1,2377

**Заключение.** Экспериментально определены значения постоянных, входящих в зависимости сил резания. Установлены эмпирические зависимости, связывающие силу резания с максимальной величиной износа резца и остаточным периодом стойкости инструмента в условиях робототехнических комплексов.

#### Список цитируемых источников

1. Лищинский, Л. Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Л. Ю. Лищинский. — М. : Машиностроение, 1990. — 312 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1990. — 272 с.
3. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г. Л. Хаега. — М. : Машиностроение, 1989. — 256 с.
4. Нодельман, М. О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента / М. О. Нодельман // Вестн. машиностроения. — 1989. — № 7. — С. 46—48.
5. Маслов, А. Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента / А. Ф. Маслов. — М. : ИТО, 2006. — 169 с.
6. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В. И. Аверченков [и др.]. — Брянск : БГТУ, 2010. — 148 с.
7. Артамонов, Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Е. В. Артамонов. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. — 192 с.
8. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. — М. : Машиностроение, 2011. — 368 с.
9. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. — 272 с.
10. Васин, С. А. Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы / С. А. Васин, С. Я. Хлудов. — М. : Машиностроение, 2006. — 352 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. — М. : Машиностроение, 2001. — Т. 2. — 944 с.
12. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностр. и приборостр. специальностей вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.
13. Справочник конструктора-инструментальщика / В. И. Баранчиков [и др.] ; под общ. ред. В. А. Гречишниковой и С. В. Кирсанова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2006. — 542 с.
14. Гузеев, В. И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезернорасточных станков с числовым программным управлением : справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков. — М. : Машиностроение, 2007. — 368 с.
15. Васин, С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. — М. : Машиностроение, 2006. — 384 с.

Поступила в редакцию 14.10.2021.