
УДК 621.787

Д. Г. Шатуров, С. А. Сухоцкий

МЕТОДИКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ РЕЗАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИЗМАТИЧЕСКОГО РЕЗЦА

UDC 621.787

D. G. Shaturov, S. A. Sukhotsky

TECHNIQUE FOR DETERMINING CUTTING FORCES AND FRICTION COEFFICIENTS ON WORKING SURFACES OF A PRISMATIC CUTTER

Аннотация

Приведена методика по определению сил резания и коэффициентов трения на передней и задней рабочих поверхностях призматического резца с пластинами из твердого сплава при точении. Определены зависимости сил резания и коэффициентов трения от режимов обработки и профиля передней поверхности режущей пластины инструмента.

Ключевые слова:

сила резания, коэффициент трения, точение, скорость резания, подача, глубина резания.

Abstract

The article provides a technique for determining cutting forces and friction coefficients on the front and rear working surfaces of a prismatic carbide-tipped cutter in turning. The dependence of the cutting forces and friction coefficients on the machining conditions and the profile of the front surface of a cutting tool insert has been determined.

Keywords:

cutting force, coefficient of friction, turning, cutting speed, feed, depth of cut.

Введение

Обработка деталей сопровождается большими контактными усилиями на передней и задней поверхностях режущих пластин инструмента. Для уменьшения сил резания и среднего коэффициента трения при обработке заготовок предлагается использовать пластины из твердого сплава с предварительно нанесенным на их переднюю поверхность рельефом в виде канавки, расположенной параллельно главному режущему лезвию и отстоящей от него на величину, соизмеримую с толщиной срезаемого слоя. В поперечном сечении канавка имеет радиусный профиль.

Были определены оптимальные

режимы резания при токарной обработке. Использовались пластины из твердого сплава с рельефом на передней поверхности и без него.

Определение сил при токарной обработке на задней и передней поверхностях резца

Составляющие силы резания на передней и задней поверхностях призматического резца с твердосплавными пластинами определяли экспериментальным путем согласно авторскому свидетельству [1].

Способ включает измерение составляющих сил резания при уменьшении толщины срезаемого слоя и

определение этих составляющих при нулевой толщине среза. С целью повышения точности и сокращения времени определения сил при обработке отключают подачу и измеряют составляющие силы резания в течение времени одного оборота детали с момента отключения подачи, при этом силы на задней поверхности резца определяют в точке перегиба построенного графика зависимости составляющих силы резания от времени оборота детали.

На рис. 1 изображена схема обработки, на рис. 2 – параметры процесса резания призматическим резцом после отключения подачи: развертка на плоскости траектории вершины резца и изменение текущей подачи за один оборот детали после ее отключения (*а*); толщины сечения среза и силы резания (*б*); силы, действующие на задней поверхности резца (*в*).

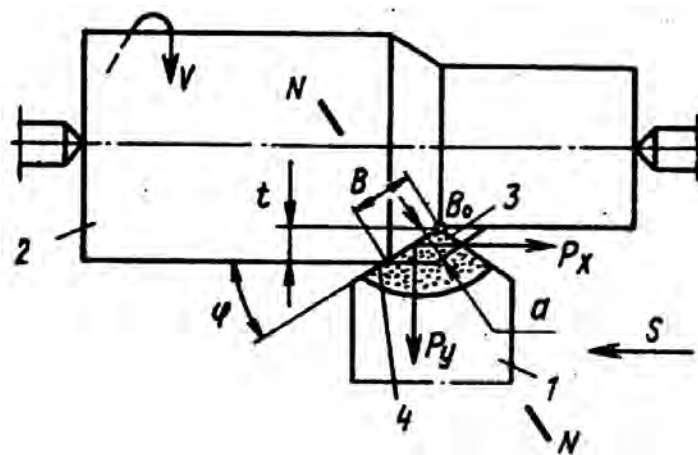


Рис. 1. Схема обработки: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – сечение среза; 4 – главное режущее лезвие резца

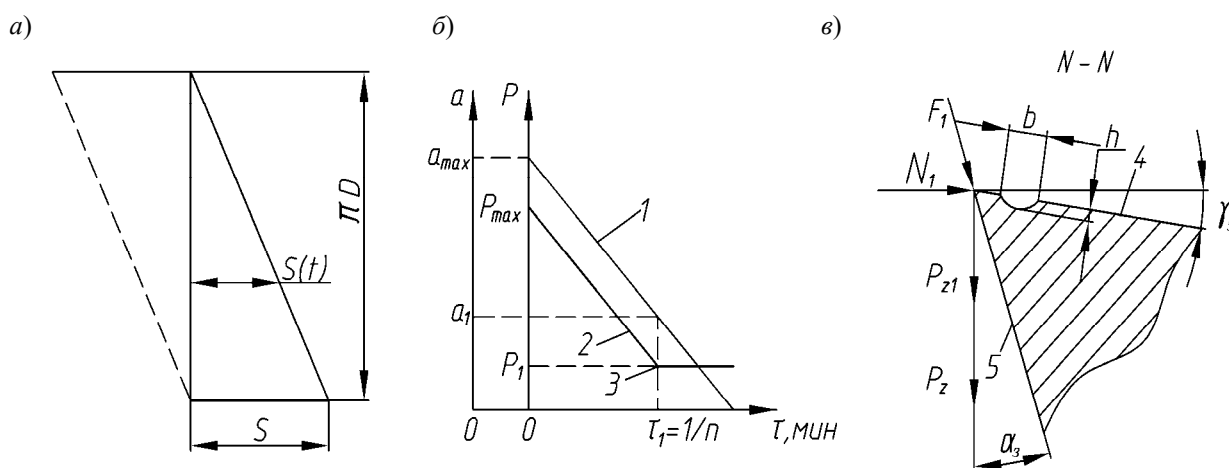


Рис. 2. Параметры процесса резания призматическим резцом после отключения подачи: 1 – $a = f(t)$; 2 – $P(P_x, P_y, P_z) = f(t)$; 3 – точка перегиба силы P ; 4, 5 – передняя и задняя поверхности резца соответственно; $P_1 (P_{x1}, P_{y1}, P_{z1})$ – сила на задней поверхности резца; P_{max} – общая сила резания; a_1 – величина упругой деформации обрабатываемого материала

Способ определения сил на задней и передней поверхностях резца осуществляют следующим образом.

Резцом 1 обрабатывают деталь 2, снимая припуск глубиной t . Деталь 2 имеет скорость вращения V , а резец пе-

ремещается с подачей, равной S . Параметры сечения 3 среза для резца (см. рис. 1)

$$a = S \sin \varphi; \quad (1)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где a – толщина среза, мм; S – подача, мм/об; b – ширина среза, мм; t – глубина резания, мм; φ – главный угол в плане резца.

Силы, действующие на задней поверхности резца, определяли в момент отсутствия стружкообразования на передней поверхности 4 резца (см. рис. 2). Отсутствие стружкообразования имеет место при толщине среза, равной вели-

чине a_1 упругой деформации материала, вызванной его обработкой резцом. Для установления момента отсутствия стружкообразования на передней поверхности резца фиксировали трехкомпонентным динамометром М30-3-6к изменение составляющих силы резания после выключения подачи S станка в течение одного оборота детали. На рис. 3 представлена схема измерения составляющих сил резания, а на рис. 4 – установка для проведения эксперимента.

С помощью программного обеспечения ПРОФИ-6К (рис. 5) определяли составляющие силы резания на передней и задней поверхностях режущей пластины во время обработки и через время t_1 одного оборота детали после выключения рабочей подачи (см. рис. 2, б).

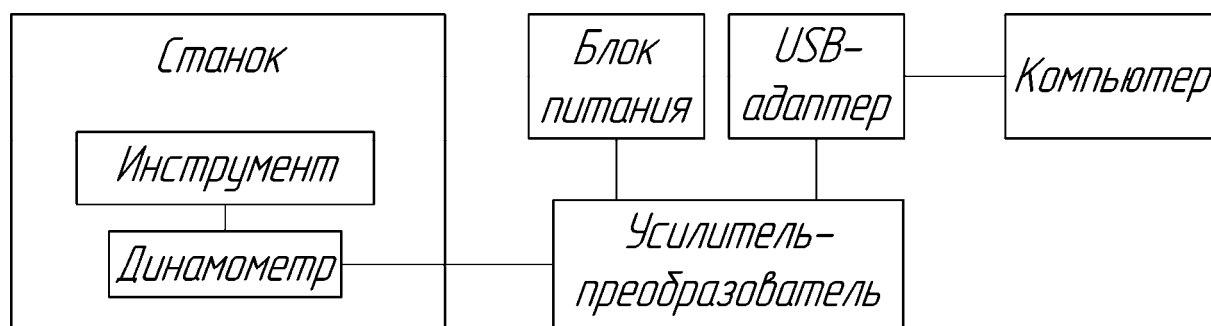


Рис. 3. Схема измерения составляющих сил резания при точении



Рис. 4. Процесс проведения эксперимента

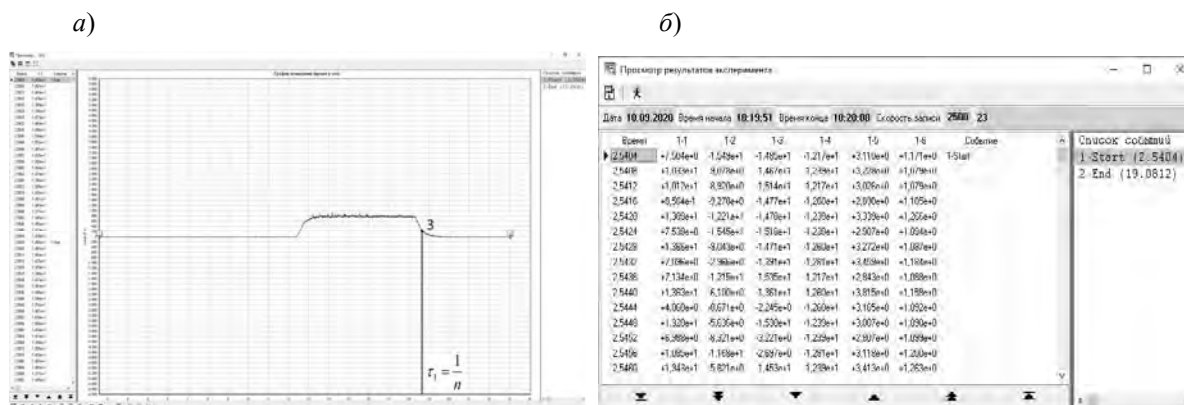


Рис. 5. Окна программы просмотра результатов эксперимента: а – график изменения силы резания от времени; б – таблица измерений сил резания

Измерение составляющих силы резания осуществлялось для резца с пластиной без канавки и с пластиной с канавкой (рельефом) на передней поверхности инструмента. Ширина канавки b составляла 2 мм, глубина h – 1 мм, расстояние от края канавки до лезвия – 0,2 мм. В поперечном сечении канавка имела радиусный профиль.

При $\tau_1 \approx 1/n$ в точке 3 (см. рис. 2, б) осуществлялось измерение составляющих силы резания P_{x1} , P_{y1} , P_{z1} , действующих на задней поверхности резца.

Из общих составляющих силы резания путем вычитания сил на задней поверхности находились составляющие силы P_{x2} , P_{y2} , P_{z2} , действующие на передней поверхности резца.

$$P_z = P_{z1} + P_{z2};$$

$$P_y = P_{y1} + P_{y2};$$

$$P_x = P_{x1} + P_{x2}. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов трения необходимо вычислить силы, приложенные к режущему лезвию и находящиеся в основной плоскости:

$$N_1 = \sqrt{P_{x1}^2 + P_{y1}^2}; \quad (4)$$

$$N_2 = \sqrt{P_{x2}^2 + P_{y2}^2}, \quad (5)$$

где N_1 и N_2 – силы на задней и передней поверхностях режущего лезвия, действующие в основной плоскости, соответственно; P_{x1} и P_{x2} – осевая составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно; P_{y1} и P_{y2} – радиальная составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно.

Сила трения на рабочих поверхностях резца определялась по зависимостям

$$F_3 = P_{z1} \cdot \cos \alpha_3 + N_1 \cdot \sin \alpha_3; \quad (6)$$

$$F_{II} = P_{z2} \cdot \sin \gamma_3 + N_2 \cdot \cos \gamma_3, \quad (7)$$

где F_3 и F_{II} – силы трения на задней и передней поверхностях резца соответственно; P_{z1} и P_{z2} – тангенциальная составляющая силы резания на задней и передней поверхностях режущего лезвия соответственно; α_3 – задний угол заточки режущего лезвия; γ_3 – передний угол заточки режущего лезвия.

Силы, действующие перпендикулярно к рабочим поверхностям резца, находили по формулам

$$N_3 = -P_{z1} \cdot \sin \alpha_3 + N_1 \cdot \cos \alpha_3; \quad (8)$$

$$N_{II} = P_{z2} \cdot \cos \gamma_3 + N_2 \cdot \sin \gamma_3, \quad (9)$$

где N_3 и N_{II} – силы, действующие нормально на заднюю и переднюю поверхности резца соответственно.

Коэффициенты трения на задней и передней поверхностях резца соответственно

$$\mu_3 = \frac{F_3}{N_3}; \quad (10)$$

$$\mu_{II} = \frac{F_{II}}{N_{II}}. \quad (11)$$

Результаты экспериментальных исследований

Следует отметить, что процесс резания лезвийным инструментом в зоне скоростей наростообразования имеет свои особенности, которые заключаются в том, что инструмент в главной секущей плоскости имеет геометрию, отличную от геометрии, полученной при заточке. А именно, имеет место увеличенный радиус округления режущей кромки (лезвия) за счет свешивающейся за лезвие шапки нароста, контактирующей с поверхностью резания и имеющей в 2–3 раза увеличенную твердость по отношению к твердости обрабатываемого материала. При уменьшении толщины срезаемого слоя от максимума до нуля, после отключения подачи, процесс резания за один оборот заготовки постепенно плавно полностью переходит в процесс поверхностного пластического деформирования (ППД) твердой радиусной шапкой нароста поверхности резания, что приводит к увеличению сил на задней поверхности резца. Повышение при этом температуры в зоне контакта несколько уменьшает данный процесс увеличения сил.

Другая особенность состоит в том, что сходящая стружка контактирует не с передней поверхностью резца, а с промежуточным более или менее неподвижным слоем в виде подошвы нароста. После отключения подачи, из-за кратковременности процесса уменьшения толщины среза до нуля, увеличенные силы адгезии отрыва подошвы нароста с передней поверхности резца фиксируются при максимальном фактическом переднем угле.

В результате экспериментальных исследований при точении стали 45 резцами с пластинами из твердого сплава Т15К6 ($\gamma_3 = 10^\circ$, $\alpha_3 = 9^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 12^\circ$) установлено, что с увеличением глубины резания t и подачи S имеем увеличение всех составляющих сил (рис. 6), а возрастание скорости резания V приводит к незначительному их изменению (табл. 1–3).

При этом составляющие силы резания для резцов с рельефом значительно меньше таких же сил для резцов без рельефа. Так, при режимах резания $V = 41$ м/мин, $S = 0,24$ мм/об и $t = 1,0$ мм имеем уменьшение силы P_z на 28 %, а сил P_x и P_y примерно на 50 %. На передней поверхности для резца микрорельефа при скорости резания $V = 41$ м/мин имеет место экстремальное (максимальное) значение коэффициента трения $\mu_{II} = 1,44$, а для резца с рельефом при этой же скорости резания имеем экстремальное (минимальное) значение коэффициента трения $\mu_{II} = 0,64$ и экстремальное (максимальное) значение коэффициента трения $\mu_L = 0,71$ при скорости $V = 64$ м/мин (рис. 7, табл. 2 и 3). Тогда при скорости резания $V = 41$ м/мин следует ожидать для резца без рельефа минимальный коэффициент усадки стружки, максимальный фактический передний угол резца, температуру резания 300°C и максимальную стойкость инструмента. Эти утверждения согласуются с результатами, представленными в [2, 3].

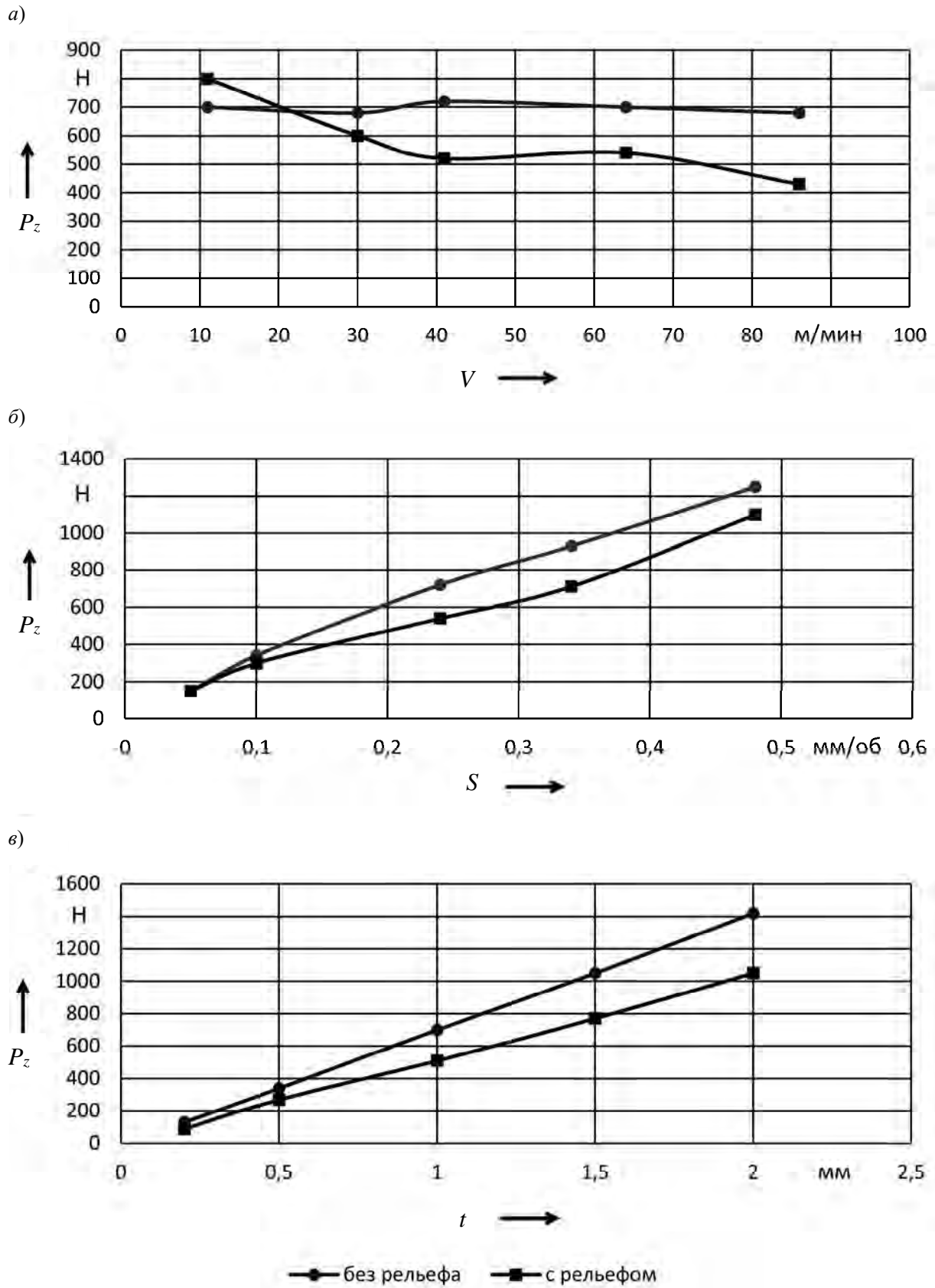


Рис. 6. Влияние режимов обработки на тангенциальную составляющую силу резания P_z : а – от скорости V ; б – от подачи S ; в – от глубины резания t

Табл. 1. Значения составляющих сил резания (тангенциальной P_z , осевой P_x и радиальной P_y) от режимов обработки (скорости резания V , подачи S , глубины резания t)

Режим обработки		P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н	
		без рельефа	с рельефом	без рельефа	с рельефом	без рельефа	с рельефом
V , м/мин	11	700	800	300	400	360	400
	30	680	600	360	260	400	280
	41	720	520	440	220	480	250
	64	700	540	420	250	430	280
	86	680	430	380	230	420	260
S , мм/об	0,05	150	150	80	70	65	70
	0,1	340	300	150	150	170	160
	0,24	720	540	420	250	480	250
	0,34	930	710	510	320	610	400
	0,48	1250	1100	600	500	790	600
t , мм	0,2	130	90	25	15	80	70
	0,5	340	270	160	160	260	120
	1	700	510	440	220	455	250
	1,5	1050	770	670	325	650	350
	2	1420	1050	950	500	850	450

Табл. 2. Значения составляющих сил резания, касательных F_z , F_n , нормальных N_z , N_n и коэффициентов трения μ_z и μ_n на задней (1) и передней (2) рабочих поверхностях резца (с пластиной из твердого сплава без рельефа на передней поверхности) соответственно от режимов обработки

Номер п/п	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н		N_z , Н	F_z , Н	N_n , Н	μ_z	N_n , Н	F_n , Н	N_n , Н	μ_n
				1	2	1	2	1	2								
1	11	0,24	1	240	460	110	190	120	240	163	263	123	2,13	306	381	400	0,95
2	30			300	380	120	240	150	250	192	326	143	2,29	347	407	314	1,30
3	41			320	400	150	290	200	280	250	355	197	1,80	403	466	324	1,44
4	64			230	470	140	280	180	250	228	263	189	1,39	375	451	398	1,13
5	86			180	500	130	250	140	280	191	208	161	1,29	375	456	427	1,07
6	41	0,05	1	58	92	30	50	25	40	39	63	29	2,15	64	79	79	0,99
7		0,1		170	170	80	70	80	90	113	186	85	2,18	114	142	148	0,96
8		0,24		360	360	170	250	220	260	278	399	218	1,83	361	418	292	1,43
9		0,34		380	550	200	310	250	360	320	425	257	1,66	475	563	459	1,23
10		0,48		380	870	200	400	260	530	328	427	265	1,61	664	805	741	1,09
11	41	0,24	0,2	35	95	10	15	35	45	36	40	30	1,32	47	63	85	0,74
12			0,5	160	180	80	80	100	160	128	178	101	1,76	179	207	146	1,42
13			1	350	350	180	260	210	245	277	389	218	1,78	357	413	283	1,46
14			1,5	450	600	240	430	210	440	319	494	245	2,02	615	710	484	1,47
15			2	600	820	300	650	300	550	424	659	325	2,03	851	981	660	1,49

Табл. 3. Значения составляющих сил резания, касательных F_3 , F_n , нормальных N_3 , N_n и коэффициентов трения μ_3 и μ_n на задней (1) и передней (2) рабочих поверхностях резца (с пластиной из твердого сплава с рельефом на передней поверхности) соответственно от режимов обработки

Номер п/п	V, м/мин	S, мм/об	t, мм	P_z , Н		P_x , Н		P_y , Н		N_1 , Н	F_3 , Н	N_3 , Н	μ_3	N_2 , Н	F_n , Н	N_n , Н	μ_n
				1	2	1	2	1	2								
16	11	0,24	1	250	550	130	270	150	250	198	275	162	1,70	368	419	512	0,82
17	30			120	480	60	200	100	180	117	135	99	1,37	269	314	452	0,69
18	41			160	360	90	130	120	130	150	179	126	1,42	184	218	341	0,64
19	64			160	380	90	160	130	150	158	180	134	1,34	219	255	357	0,71
20	86			130	300	120	110	140	120	184	154	165	0,94	163	191	283	0,67
21	41	0,05	1	40	110	20	50	30	40	36	45	30	1,48	64	74	103	0,72
22		0,1		150	150	80	70	80	80	113	164	91	1,80	106	120	139	0,86
23		0,24		150	390	90	160	100	150	135	167	112	1,49	219	256	367	0,70
24		0,34		260	450	140	180	150	250	205	286	167	1,71	308	350	418	0,84
25		0,48		380	720	200	300	220	380	297	418	242	1,73	484	551	670	0,82
26	41	0,24	0,2	20	70	5	10	30	40	30	24	27	0,88	41	48	66	0,73
27			0,5	100	170	80	80	55	65	97	113	82	1,37	103	119	159	0,75
28			1	160	350	90	130	120	130	150	179	126	1,42	184	217	331	0,65
29			1,5	190	580	100	225	125	225	160	210	132	1,59	318	372	547	0,68
30			2	350	700	200	300	200	250	283	386	231	1,67	391	456	659	0,69

Заключение

1. Приведена методика определения сил и коэффициентов трения на рабочих поверхностях резца с использованием оригинального метода с остановкой подачи резца в процессе резания.

2. Установлено, что коэффициент трения на задней рабочей поверхности резца без рельефа примерно на 25 % больше, чем на передней: $\mu_3 / \mu_n = 1,8 / 1,44 = 1,25$ ($V = 41$ м/мин, $S = 0,24$ мм/об, $t = 1,0$ мм). Этим можно объяснить превалирующий износ задней поверхности резца.

3. Установлено, что коэффициент трения μ_n на передней поверхности резца без рельефа имеет экстремум (максимальное его значение) при скорости

резания $V = 41$ м/мин.

4. Установлено, что наличие рельефа на передней поверхности приводит к уменьшению коэффициента трения на рабочих поверхностях: на задней μ_3 – в 1,27 (1,8/1,42), а на передней μ_n – в 2,25 (1,44/0,64) раза.

5. Определено, что коэффициент трения μ_n на передней поверхности резца для резца с рельефом имеет два экстремума: один с минимальным значением $\mu_n = 0,64$ при скорости резания $V = 40$ м/мин, другой с максимальным значением $\mu_n = 0,71$ при скорости резания $V = 64$ м/мин. При этом уменьшение коэффициента трения μ_n , по сравнению с резцом без рельефа, составляет 1,59 (1,13/0,71) раза.

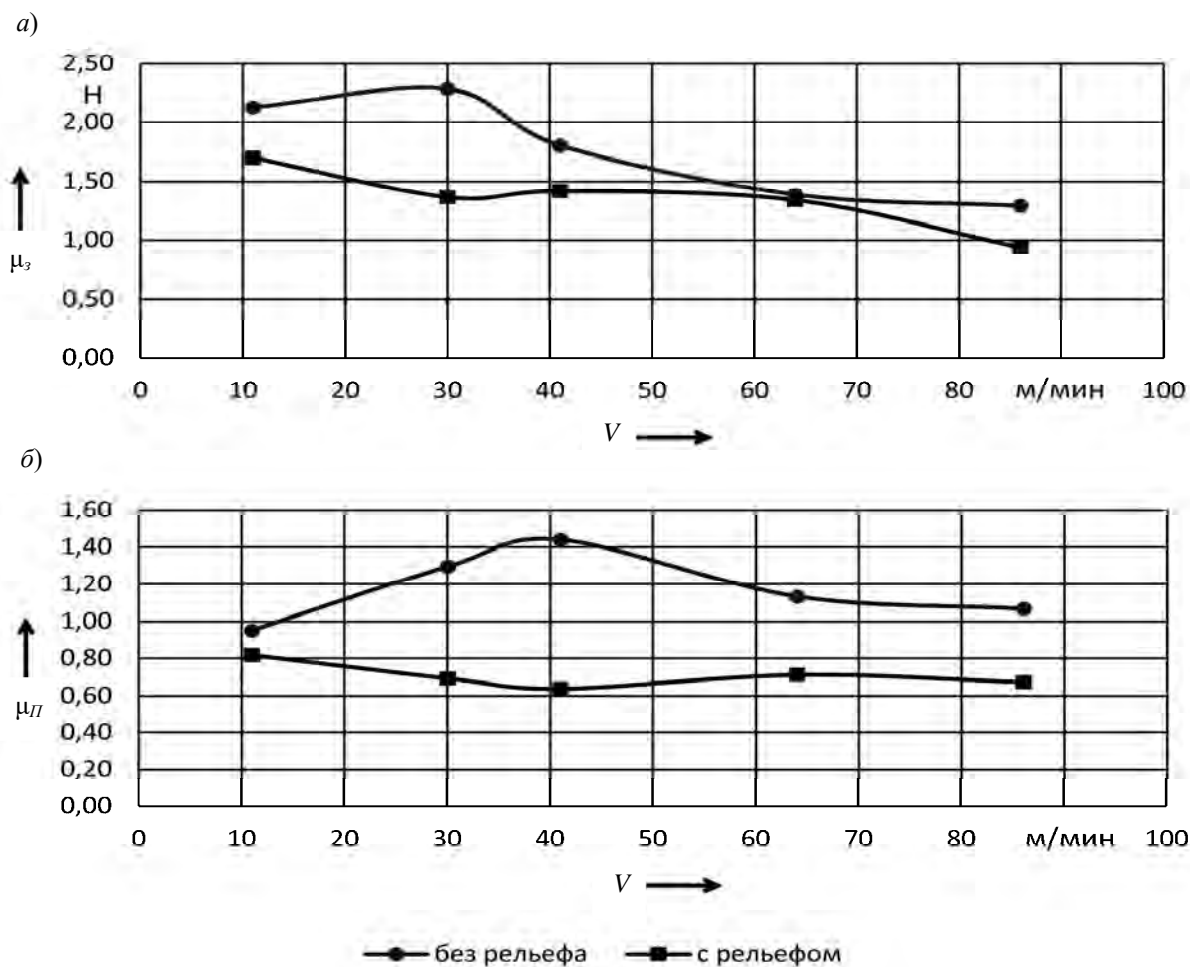


Рис. 7. Влияние скорости резания на коэффициент трения на задней μ_z (а) и передней μ_l (б) рабочих поверхностях резца

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ определения сил на задней поверхности резца и упругой деформации материала при его обработке: а. с. SU 1207632 / Г. Ф. Шатуров, В. Н. Подураев. – Оpubл. 30.01.1986.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Кожевников, Д. В. Резание металлов: учебник / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – Москва: Машиностроение, 2007. – 304 с.

Статья сдана в редакцию 13 октября 2020 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-46-19-67.

Сергей Александрович Сухоцкий, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-297-46-19-67.

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.