

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа: Новых Производственных Технологий
Направление подготовки: 15.03.01 Машиностроение
Профиль «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»

Отчёт по выполнению практических занятий
по дисциплине
«Исследование процессов обработки резанием и режущего инструмента»

Выполнил студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ91			

Проверил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Козлов В. Н.	к.т.н., доцент		

Томск – 2020

Оглавление

Введение	4
1. Практическое занятие № 1. Расчёт технологических составляющих силы резания при разных передних углах резца при обработке стали	5
2. Практическое занятие № 2. Расчёт физических составляющих силы резания при разных передних углах резца.....	9
3. Практическое занятие № 3. Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности и фаске задней поверхности резца при обработке стали	12
4. Практическое занятие № 4. Расчёт параметров эпюр контактных напряжений на передней поверхности и фаске задней поверхности резца при обработке стали	16
5. Практическое занятие № 5. Построение стойкостных зависимостей при обработке стальной заготовки	20
6. Практическое занятие № 6. Расчёт производительности и себестоимости обработки стальной заготовки при изменении скорости резания	23
7. Практическое занятие № 7. Расчёт изменения составляющих силы резания на зубе фрезы при встречном и попутном цилиндрическом фрезеровании	30
8. Практическое занятие № 8. Расчёт изменения составляющих силы резания на зубе фрезы при концевом и торцовом фрезеровании	30

Список лабораторных работ:

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1. Измерение геометрии токарных резцов	5
2. Лабораторная работа № 2. Исследование силовых зависимостей процессов резания ..	9
3. Лабораторная работа № 3. Исследование процессов резания в условиях наростообразования	12
4. Лабораторная работа № 4. Измерение составляющих силы резания при разных передних углах резца при обработке стали	16
5. Лабораторная работа № 5. Измерение составляющих силы резания при моделировании износа резца по задней поверхности при обработке стали	20
6. Лабораторная работа № 6. Исследование изменения геометрии токарного резца при его износе при обработке стали	23
7. Лабораторная работа № 7. Исследование стойкости СМП при обработке стальной заготовки	30
8. Лабораторная работа № 8. Исследование изменения составляющих силы резания при концевом фрезеровании стальной заготовки	30
9. Лабораторная работа № 9. Исследование изменения составляющих силы резания при торцовом фрезеровании стальной заготовки	30
10. Лабораторная работа № 10. Исследование качества обработанной поверхности при круглом шлифовании	30

Практическое занятие № 1
**Расчёт технологических составляющих силы резания
 при разных передних углах резца при обработке стали**

На основании экспериментальных данных по влиянию переднего угла (рис. 1) на технологические составляющие силы резания (табл. 1) построить графики влияния переднего угла γ ($^{\circ}$) и подачи s (мм/об) на технологические составляющие P_x , P_y , P_{xy} и P_z (Н) силы резания.

Расчитать соотношение технологической составляющей P_{xy} (Н) к тангенциальной составляющей P_z (Н): $K_{\mu} = P_{xy}/P_z$.

Построить аналогичные графики влияния толщины среза a (мм) на технологические составляющие P_{xy} и P_z (Н) при разных передних углах.

$$a = s \times \sin \varphi \text{ (мм)},$$

где s – продольная подача (мм/об); φ – главный угол в плане ($^{\circ}$) (рис. 1).

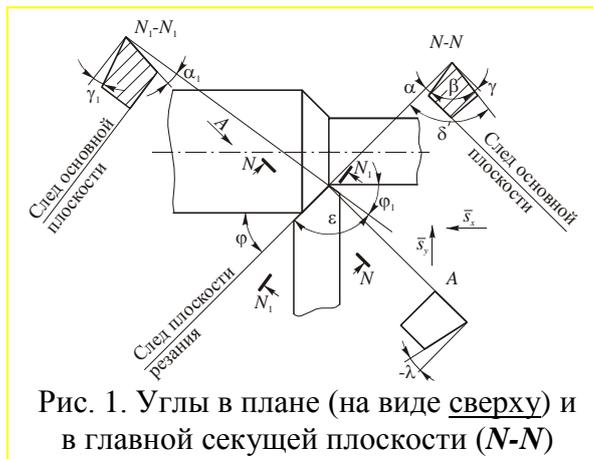


Рис. 1. Углы в плане (на виде сверху) и в главной секущей плоскости (N-N)

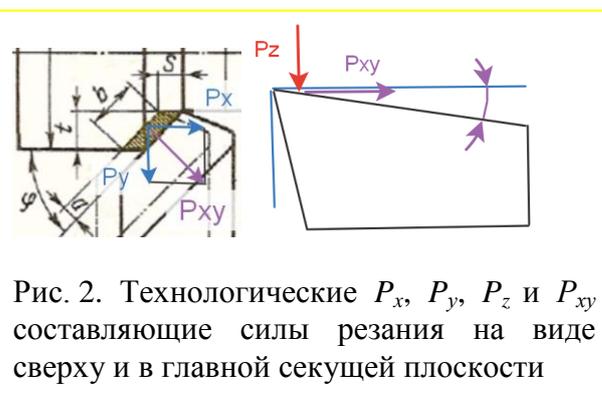


Рис. 2. Технологические P_x , P_y , P_z и P_{xy} составляющие силы резания на виде сверху и в главной секущей плоскости

Табл. 1 – Силы резания, полученные при постоянной глубине резания $t=1,99$ мм									
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^{\circ}$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^{\circ}$, Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_{μ}			P_x	P_z	K_{μ}
0,05	0,07	286	443	0,646	0,05	0,07	223	433	0,516
0,078	0,11	396	619	0,640	0,078	0,11	309	577	0,536
0,163	0,23	742	1216	0,610	0,163	0,23	635	1087	0,584
0,240	0,34	961	1735	0,554	0,240	0,34	864	1592	0,543
0,368	0,52	1144	2370	0,483	0,368	0,52	1078	2222	0,485
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^{\circ}$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^{\circ}$, Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_{μ}			P_x	P_z	K_{μ}
0,05	0,07	167	394	0,646	0,05	0,07	110	354	0,313
0,078	0,11	223	520	0,640	0,078	0,11	137	463	0,295
0,163	0,23	479	981	0,610	0,163	0,23	324	874	0,370
0,240	0,34	650	1414	0,554	0,240	0,34	436	1234	0,353
0,368	0,52	817	1948	0,483	0,368	0,52	556	1674	0,332

a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$ Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_μ			P_{xy}	P_z	K_μ
0,05	0,07	143	221	0,646	0,05	0,07	112	217	0,516
0,078	0,11	198	310	0,640	0,078	0,11	155	144	0,536
0,163	0,23	371	608	0,610	0,163	0,23	318	544	0,584
0,240	0,34	961	1735	0,554	0,240	0,34	432	796	0,543
0,368	0,52	480	1185	0,483	0,368	0,52	539	1111	0,485
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^\circ$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^\circ$, Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_μ			P_{xy}	P_z	K_μ
0,05	0,07	84	197	0,646	0,05	0,07	55	177	0,313
0,078	0,11	114	260	0,640	0,078	0,11	69	232	0,295
0,163	0,23	240	491	0,610	0,163	0,23	162	437	0,370
0,240	0,34	325	707	0,554	0,240	0,34	218	617	0,353
0,368	0,52	409	974	0,483	0,368	0,52	278	837	0,332

a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$ Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_μ			P_{xy}	P_z	K_μ
0,05	0,07	572	886	0,646	0,05	0,07	446	866	0,516
0,078	0,11	792	1238	0,640	0,078	0,11	618	1154	0,536
0,163	0,23	1484	2432	0,610	0,163	0,23	1270	2174	0,584
0,240	0,34	1922	3470	0,554	0,240	0,34	1728	3184	0,543
0,368	0,52	2288	4740	0,483	0,368	0,52	2156	4444	0,485
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^\circ$, Н			a , мм	s , мм/об	Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^\circ$, Н		
		$P_{xy\text{ ср}}$	$P_{z\text{ ср}}$	K_μ			P_{xy}	P_z	K_μ
0,05	0,07	334	788	0,646	0,05	0,07	220	708	0,313
0,078	0,11	446	1040	0,640	0,078	0,11	274	926	0,295
0,163	0,23	958	1962	0,610	0,163	0,23	648	1748	0,370
0,240	0,34	1300	2828	0,554	0,240	0,34	872	2468	0,353
0,368	0,52	1634	3896	0,483	0,368	0,52	1112	3348	0,332

Построить графики изменения составляющих сил резания в зависимости от подачи s , глубины резания t и переднего угла γ в **двойных логарифмических координатах** и определить показатели степеней и коэффициенты в эмпирических формулах

$$P_z = C_{Pz} \times t^{x_{Pz}} \times s^{y_{Pz}} \times \gamma^{m_{Pz}} \times K_{Pz} \quad (\text{H}) \quad (1)$$

$$P_{xy} = C_{Pxy} \times t^{x_{Pxy}} \times s^{y_{Pxy}} \times \gamma^{m_{Pxy}} \times K_{Pxy} \quad (\text{H}) \quad (2)$$

Построить графики изменения составляющих сил резания в зависимости от толщины среза a , глубины резания t и переднего угла γ в двойных логарифмических координатах и определить показатели степеней и коэффициенты в эмпирических формулах

$$P_z = C_{Pz} \times a^{x_{Pz}} \times s^{y_{Pz}} \times \gamma^{m_{Pz}} \times K_{Pz} \quad (\text{H}) \quad (3)$$

$$P_{xy} = C_{Pxy} \times a^{x_{Pxy}} \times s^{y_{Pxy}} \times \gamma^{m_{Pxy}} \times K_{Pxy} \quad (\text{H}) \quad (4)$$

Обобщенные эмпирические уравнения для расчетов составляющих силы резания учитывают влияние основных параметров режима резания и имеют следующий вид:

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} s^{y_{pz}} v^{n_{pz}} K_{pz};$$

$$P_x = C_{px} t^{x_{px}} s^{y_{px}} v^{n_{px}} K_{px};$$

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} s^{y_{py}} v^{n_{py}} K_{py}.$$

Значения **показателей степеней** x_{pz} , y_{pz} и т.д. можно рассчитать из графиков **зависимости составляющей силы** от **глубины резания t** или подачи s , в двойных логарифмических координатах, т.к. график степенной функции $P_z = C'_{pz} \cdot t^{x_{pz}}$ (при $s = \text{const}$) в координатах $\lg P_z - \lg t$ представляет собой прямую линию.

$$x_{pz} = \text{tg} \tau = A/B.$$

Аналогичный график строится при $t = \text{const}$

$$(P_z = C'_{pz} \cdot s^{y_{pz}}).$$

После определения показателей степеней x_{pz} , y_{pz} и т.д. **коэффициенты** C_{pz} , C_{px} и C_{py} рассчитываются из указанных формул при **известных силах P_z , P_x и P_y , определённых из экспериментов.**

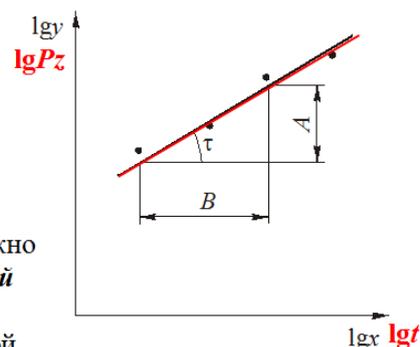


Схема для определения показателя степени k в уравнении $y = C_x \cdot x^k$.
 $k = \text{tg} \tau = (A/B)$.

Отрезки A и B измеряются линейкой на графике $\lg y - \lg x$ ($\lg P_z - \lg t$)

Практическое занятие № 2
**Расчёт физических составляющих силы резания
 при разных передних углах резца при обработке стали**

На основании экспериментальных данных по влиянию переднего угла на технологические составляющие силы резания (см. табл. 1 практического занятия № 1) рассчитать физические составляющие N (Н) и F (Н) силы резания и построить графики влияния переднего угла γ и подачи s (мм/об) на нормальную N (Н) и касательную F (Н) физические составляющие силы резания и.

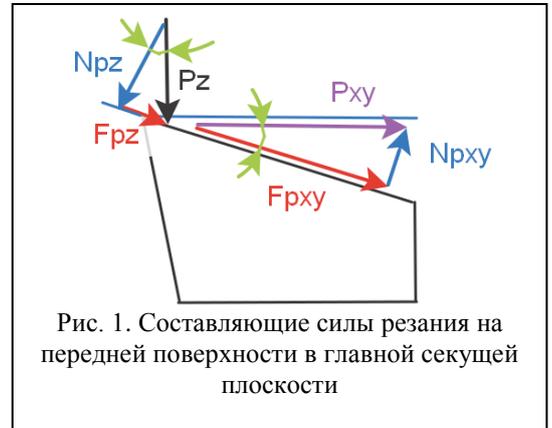


Рис. 1. Составляющие силы резания на передней поверхности в главной секущей плоскости

Расчёт физических составляющих силы резания N и F по технологическим составляющим P_z и P_{xy} при переднем угле $\gamma \neq 0^\circ$ выполняем по формулам, которые получаем из суммы векторов (рис. 1):

$$\vec{P}_z = \vec{N}_{Pz} + \vec{F}_{Pz}; \quad (1)$$

$$\vec{P}_{xy} = \vec{F}_{Pxy} + \vec{N}_{Pxy}. \quad (2)$$

Из этих формул получаем два уравнения (3) и (4) для расчёта физических сил резания:

$$N = N_{Pz} - N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (3)$$

Второе слагаемое со знаком **минус** ($-N_{Pxy}$), т.к. эта составляющая направлена в **обратном** направлении по сравнению с направлением N_{Pz} . Это создаёт парадоксальную ситуацию: при увеличении переднего угла с увеличением технологической силы P_{xy} нормальная физическая сила N в уравнении (3) уменьшается, что при очень больших передних углах (более 25°) может приводит к нулевой нормальной силе, когда вторая часть формулы (3) становится равной первой части, т.е. коэффициент трения увеличивается с увеличением переднего угла γ .

$$F = F_{Pxy} + F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma. \quad (4)$$

Рассчитать средний условный коэффициент трения $\mu_{ср} = F/N$ для каждой подачи s (мм/об) и толщины среза a (мм).

Построить аналогичные графики влияния толщины среза на физические составляющие силы резания при разных передних углах.

Табл. 1 – Силы резания, полученные из экспериментов
при постоянной глубине резания $t=1,99$ мм

a, мм	s, мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +7^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +15^\circ$, Н		
		$P_{xy,cp}$	$P_{z,cp}$	K_μ	F	N	μ_{cp}		P_x	P_z	K_μ	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	286	443	0,646	338	405	0,83		223	433	0,516	327	360	0,909
0,078	0,11	396	619	0,640	469	566	0,83		309	577	0,536	448	477	0,939
0,163	0,23	742	1216	0,610	885	1117	0,79		635	1087	0,584	894	886	1,010
0,240	0,34	961	1735	0,554	1165	1606	0,73		864	1592	0,543	1247	1314	0,949
0,368	0,52	1144	2370	0,483	1425	2214	0,64		1078	2222	0,485	1616	1867	0,866
a, мм	s, мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +25^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +35^\circ$, Н		
		$P_{xy,cp}$	$P_{z,cp}$	K_μ	F	N	μ_{cp}		P_x	P_z	K_μ	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	167	394	0,646	318	286	1.111		110	354	0,313	294	226	1,298
0,078	0,11	223	520	0,640	422	377	1.119		137	463	0,295	378	301	1,255
0,163	0,23	479	981	0,610	849	686	1.237		324	874	0,370	767	530	1,445
0,240	0,34	650	1414	0,554	1187	1007	1.179		436	1234	0,353	1065	761	1,400
0,368	0,52	817	1948	0,483	1564	1420	1.101		556	1674	0,332	1416	1059	1,346

Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности и фаске задней поверхности резца при обработке стали

Для расчета режущего инструмента на прочность необходимо определить (рассчитать) его напряженно-деформированного состояние (НДС). Для этого очень важно перед расчётом приложить к модели внешние нагрузки, имеющие реальную величину и их распределение. Тема отчёта по научно-педагогическому проекту: Исследование распределения контактных напряжений на поверхностях режущего инструмента.

2. Основа для расчёта эпюр – результаты исследований распределения контактных напряжений разными методами разными исследователями

Контактных напряжения (нагрузки) на рабочих поверхностях инструмента могут быть измерены тремя методами: поляризационно-оптическим и методом разрезного резца. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки.

Метод разрезного (составного) резца лишен этого недостатка, но требует создания высокожестких динамометров [1, 2].

Для изучения распределения контактных нагрузок на поверхностях резца используется метод разрезного резца.

При исследовании распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента методом разрезного резца используется специальный четырёхкомпонентный токарный динамометр (рис. 1). Нижний пояс этого динамометра с упругими элементами 4 используется для измерения общих технологических составляющих P_z и P_y силы резания. Это необходимо только для контроля постоянства этих составляющих силы резания в серии экспериментов, независимо от того, на каком участке режущей кромки выполняется резание.

Под серией понимается исследования при постоянных режимах резания (скорость резания v и радиальная подача s), при неизменной геометрии инструмента (передний угол γ и задний угол α) и неизменной ширине искусственной фаски по задней поверхности h_3 , моделирующей износ по задней поверхности.

Верхний пояс динамометра с упругими элементами 3 используется для исследования распределения контактного напряжения путём измерения вертикальной составляющей силы резания P_{zAi} и радиальной составляющей P_{yAi} , действующих на пластину А на участке ΔC_i , находящимся на расстоянии C_i от режущей кромки разрезного резца. Если передний угол $\gamma = 0^\circ$, то нормальная сила N_{Ai} на участке ΔC_i будет равна вертикальной составляющей силы резания P_{zAi} ($N_{Ai} = P_{zAi}$), а касательная сила $F_{Ai} = P_{yAi}$.

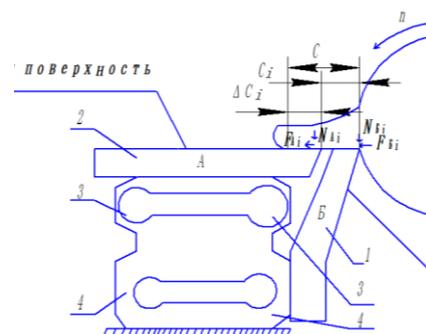


Рис. 1. Схема исследования распределения контактных напряжений на передней поверхности резца методом разрезного резца.

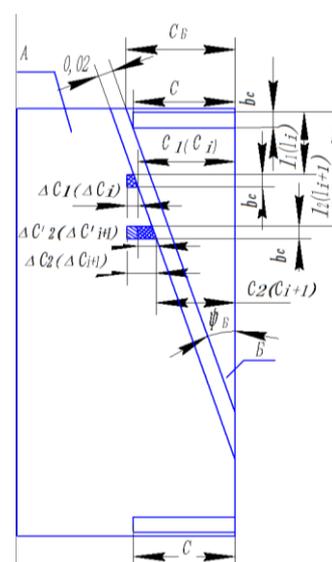


Рис. 2. Схема измерения контактных нагрузок на передней поверхности резца методом разрезного резца

При прямоугольном свободном резании диска из обрабатываемого материала измеряются силы, действующие на пластину А и на пластину В. Последовательно увеличивая длину участка ΔC_i пластины А, измеряем нормальную N_{Ai} и касательную F_{Ai} силы резания, действующие на этом участке и рассчитываем контактные нагрузки как отношение приращения этих сил к приращению площади её поверхности.

Изготавливаются пластины А и В таким образом, чтобы расстояние C_B от режущей кромки до косога зазора с углом ψ_B между пластинами было больше длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента С ($C_B > C$) (рис. 2).

Вначале в резании участвует участок 0, где нет контакта стружки с пластиной А. В этом случае на пластине А силы резания будут равны нулю: $N_{Ai} = 0$ и $F_{Ai} = 0$.

Затем динамометр сдвигается вместе с разрезным резцом вдоль периферии диска на расстояние l_1 до положения 1. В этом случае на пластине А на участке ΔC_1 действуют силы резания $N_{Ai=1}$ и $F_{Ai=1}$. Отношение этих сил к площади контакта есть удельная нормальная и касательная сила резания на участке ΔC_1 .

$$q_{N1} = N_{A1}/(\Delta C_1 \cdot b_c), \quad q_{F1} = F_{A1}/(\Delta C_1 \cdot b_c),$$

где b_c – ширина контакта стружки с передней поверхностью инструмента. В рассматриваемой серии эксперимента $b_c = \text{const}$, т.к. ширина диска и режимы резания неизменны.

Сдвигаем динамометр с разрезным резцом вдоль периферии диска на расстояние l_2 до положения 2.

На пластине А на участке ΔC_2 действуют силы резания $N_{Ai=2}$ (в общем виде N_{Ai+1}) и $F_{Ai=2}$ (в общем виде F_{Ai+1}).

Приращение площади участка 2 ($i+1$) происходит на длину $\Delta C'_2 = \Delta C_2 - \Delta C_1$.

Приращение нормальной силы на этом участке $\Delta C'_2$ рассчитывается по формуле $\Delta N'_{A2} = N_{A2} - N_{A1}$, или в общем виде $\Delta N'_{Ai+1} = N_{Ai+1} - N_{Ai}$, т.е. сила на рассматриваемом участке минус сила на предыдущем участке.

Отношение приращения этой нормальной силы к приращению площади контакта есть удельная нормальная сила резания на участке $\Delta C'_2$ (в общем виде $\Delta C'_{i+1}$).

$$q_{N'2} = \Delta N'_{A2} / (\Delta C'_2 \cdot b_c), \quad \text{или в общем виде:}$$

$$q_{N'i+1} = (N_{Ai+1} - N_{Ai}) / [(\Delta C_{i+1} - \Delta C_i) \cdot b_c].$$

Удельная касательная сила резания на участке $\Delta C'_2$ (в общем виде $\Delta C'_{i+1}$).

$$q_{F'i+1} = (F_{Ai+1} - F_{Ai}) / [(\Delta C_{i+1} - \Delta C_i) \cdot b_c].$$

При смещении динамометра вместе с разрезным резцом вдоль периферии диска на небольшое расстояние l_i приращение длины контакта стружки с пластиной А ΔC_i будет небольшое ($\Delta C_i \rightarrow 0$), приращение площади будет небольшое, поэтому удельная нормальная сила на этом участке будет считаться как нормальное напряжение σ_N ($\sigma_{Ni} \approx q_{Ni}$).

Аналогично и для касательного напряжения τ_F ($\tau_{Fi} \approx q_{Fi}$).

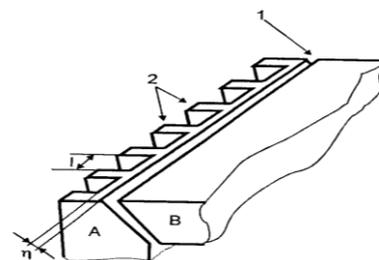


Рис. 3. Схема расположения рабочих пластин повышенной жёсткости при исследовании методом разрезного резца.

1 – щель между рабочими пластинами А и В; 2 – рёбра жёсткости, η – расстояние от режущей кромки до поверхности раздела между пластинами

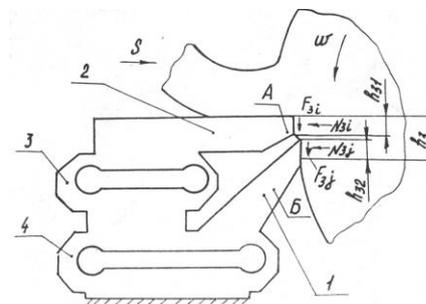


Рис. 4. Схема работы динамометра при исследовании контактных нагрузок на задней поверхности резца на токарном станке

Для исследования распределения (эпюр) контактных нагрузок на передней поверхности инструмента при резании стали и других твёрдых материалов при высоких скоростях резания используется широкий резец (шириной 120 мм), который разрезается таким образом, чтобы размер η (расстояние от режущей кромки до поверхности разреза) (рис. 3) дискретно изменялся от 0 до величины, немного большей, чем длина контакта С стружки с передней поверхностью инструмента. Для увеличения прочности и жёсткости рабочей пластины А на её задней поверхности располагаются рёбра жёсткости.

Ширина диска должна быть меньше на 2...3 мм, чем расстояния I между рёбрами жёсткости пластины А. При обработке стружка будет иметь одинаковую длину контакта с передней поверхностью резца, на какой бы секции ни проводилась обработка. Но на разных секциях длина контакта стружки с поверхностью пластины В будет разная (рис. 3).

Чем меньше разница $x_i = \eta$ (рис. 3) у соседних секций, тем выше точность исследований, но больше их трудоёмкость, должна быть больше ширина разрезного резца.

При измерении контактных нагрузок на задней поверхности резца при прямоугольном свободном резании диска из обрабатываемого материала измеряются силы, действующие на пластину А и на пластину Б (рис. 4). Увеличивая последовательно длину участка h_{31} при неизменной длине фаски износа h_3 , рассчитываем контактные нагрузки как отношение приращения силы к приращению площади контакта на пластине А.

При врезании на площадку длиной h_{31} пластины А действует сила больше, чем на площадку h_{32} пластины Б, что вызывает большую деформацию упругих измерительных элементов 3. Появившийся острый уступ начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания. Щель между пластинами забивается, что приводит к нарушению условий измерения сил.

Анализ вариантов различных схем измерений показывает, что для устранения указанных нежелательных явлений необходимо изменить либо конструкцию динамометра, либо схему резания. Второй путь менее трудоёмкий. По этому варианту пластина Б должна измерять приращение сил на задней поверхности резца (рис. 5).

При врезании под действием сил на площадке h_{31} пластина А переместится немного вниз и влево вследствие упругой деформации измерительных элементов 4. Пластина Б вместе с измерительными элементами 3, закрепленными на упругих элементах 4, тоже переместится в этом же направлении. Поэтому уступа не возникает. Суммарные составляющие силы резания P_y и

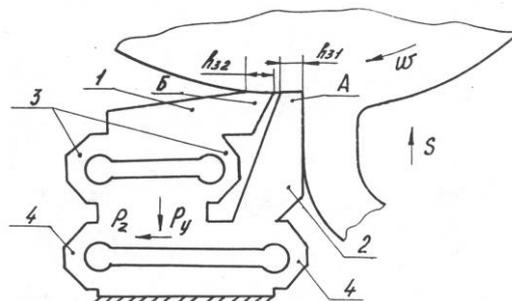


Рис. 5. Схема работы динамометра при исследовании контактных нагрузок на фаске задней поверхности резца на горизонтально-фрезерном станке

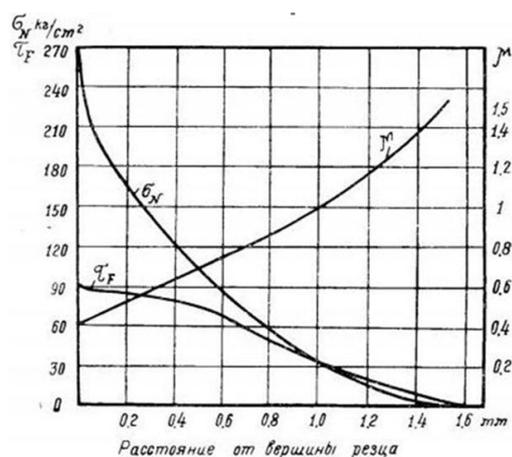


Рис. 6. Распределение нормальных и касательных напряжений на передней поверхности, полученные поляризационно-оптическим методом, при резании свинца [16]

P_z измеряются с помощью упругих измерительных элементов 4, а приращения сил на задней поверхности – элементами 3.

Зазор между пластинами А и Б контролируется пластинчатым щупом толщиной 0,02 мм. При меньшем зазоре возможно соприкосновение пластин, а значит нарушение процесса измерения, что проявляется в уменьшении сил, регистрируемых на пластине А. Большая величина зазора приводит к попаданию обрабатываемого материала в щель, что приводит к выкрашиванию рабочих пластин. В ходе исследований отсутствие контакта пластин контролируется на просвет.

Считается, что при использовании поляризационно-оптического метода выходящая на переднюю поверхность полоса в режущем клине свидетельствует о соответствующем напряжении и на передней поверхности. На основании этого строится кривая распределения нормальной контактной нагрузки на передней поверхности (рис. 6). Нормальная контактная нагрузка – это нагрузка, перпендикулярная к исследуемой поверхности.

На рис. 7 приведены результаты экспериментального определения нормальных контактных нагрузок на фаске задней поверхности, выполненного методом разрезного резца при свободном точении латуни Л63 в условиях сливного стружкообразования. Экстремальный характер зависимости четко обнаруживается во всех случаях.

По мнению авторов, Полетики М.Ф. и Козлова В.Н., это связано с прогибом поверхности резания под действием радиальной составляющей силы резания $R_{y.p.p.}$, действующей на передней поверхности инструмента.

При исследовании распределения контактных

напряжений на фаске задней поверхности (на искусственной фаске износа) выяснилось, что наибольшие контактные напряжения могут находиться как у режущей кромки (см. рис. 6), так и на некотором расстоянии от неё (рис. 8).

В целях выяснения причин расхождения экспериментальных данных в исследованиях, проведенными разными авторами, Козловым В.Н. были проведены опыты

по свободному точению дисков из разных обрабатываемых материалов с использованием разрезного резца. Было выяснено, что характер стружкообразования влияет на вид эпюр контактных нагрузок на задней поверхности: при сливной стружке (обрабатываемый материал латунь Л63) наибольшая величина контактных нагрузок отстоит от режущей кромки, а при элементной (обрабатываемый материал латунь ЛМцА 57-3-1) находится непосредственно у режущей кромки (рис. 7).

По физическим силам N и F строим эпюры контактных напряжений на передней поверхности.

1) Рассчитываются касательные контактные напряжения τ (МПа) на передней поверхности инструмента, т.к. их характер мало зависит от режимов резания. Длина пластического участка контакта стружки $c_1 \approx 0,5 \cdot c$. На этом участке, т.е. при $x < 0,5 \cdot c$ у эпюры касательных контактных напряжений τ имеется линия, параллельная передней

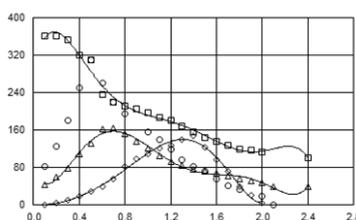


Рис. 7. Распределение нормальных контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента, $\gamma=0^0$, $\alpha_\phi=0^0$.

Л63-Р6М5:

- 1 - $s=0,06$ мм/об, $v=100$ м/мин;
- 2 - $s=0,21$ мм/об, $v=100$ м/мин;
- 3 - $s=0,21$ мм/об, $v=217$ м/мин.
- 4 - ЛМцА 57-3-1 – Р6М5, $s=0,41$ мм/об, $v=100$ м/мин

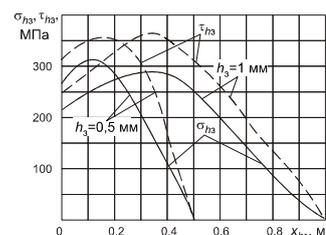


Рис. 8. Распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности резца при точении алюминиевого диска [4].

- $\gamma=10^0$, $\alpha_\phi=0^0$,
- $v=0,6$ м/мин; $s=0,2$ мм/об,
- $h_3=1$ мм и $h_3=0,5$ мм

поверхности (горизонтальный участок при $\gamma=0^\circ$). При дальнейшем отдалении от режущей кромки у эпюры τ прямо пропорциональное уменьшение до нуля.

Строится эпюра касательных контактных напряжений τ (МПа).

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{const}} = F/c \times 0,75 \times b,$$

где τ_{const} - величина τ на горизонтальном участке этой эпюры,

b – ширина контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

2) Переходим к построению эпюры нормальных контактных напряжений σ (МПа). Величину σ_{\max} задаём *сначала приблизительно* сами, в первом приближении $\sigma_{\max} = 2\sigma_{\text{в}}$.

3) На расстоянии l_1 от режущей кромки ($l_1 \approx a$) $\sigma_{l1} \approx 0,93 \times \sigma_{\max}$.

4) В основе лежит закономерность соотношения τ/σ , т.е. изменение условного коэффициента трения $\mu = \tau/\sigma$ вдоль передней поверхности, которая мало зависит от режимов резания и переднего угла γ (рис. 9).

5) При относительной длине контакта $\psi = x_i/c \approx 0,4$, т.е. при $x=0,4 \cdot c$ будет пересечение графика σ с графиком τ , т.к. в этой точке коэф. трения $\mu=1$, то есть там $\sigma=\tau$ (рис. 10 а).

6) в конце контакта стружки с передней поверхностью резца в точке $\psi \approx 0,8$ (т.е. при $x \approx 0,8 \cdot c$) должно быть $\sigma_i \approx \tau_i/1,6$ (рис. 10 б).

7) Через две точки σ : 1) при $x=c$; 2) при $x=0,8 \cdot c$ проводим *прямую линию* до пересечения с вертикалью в точке $x=0,5 \cdot c$ (рис. 10 б).

8) Из полученной точки (п. 7) проводим горизонтальную линию до пересечения с наклонной прямой σ , ниспадающей от режущей кромки (рис. 19 б), т.к. на участке до $x \approx 0,5c$ имеется горизонтальная линия у эпюры нормальных конт. напр. σ , а при дальнейшем отдалении от режущей кромки у эпюры σ имеется прямолинейное уменьшение до нуля в точке $x=c$.

Рассчитанная по объёму (площади) эпюры сила должна быть приблизительно равна соответствующей силе из эксперимента.

Проверяем правильность построения эпюр – сила, рассчитанная по площади (объёму) эпюры должна быть приблизительно равна соответствующей силе из эксперимента.

На расстоянии от режущей кромки $l_1 \approx a$ (мм) $\sigma_{l1} \approx (0,92 \dots 0,93) \times \sigma_{\max}$, т.к. там ещё нет стружки, она только формируется, давление от резца идёт на заготовку, поэтому там имеется примерно равномерное распределение нормальных напряжений σ . Величину σ_{\max} задаём сначала приблизительно сами. Примерно $\sigma_{\max} \approx 2 \sigma_{\text{в}}$ ($\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление разрыв), ищем в справочнике для данного материала и при данной термообработке, т.е. твёрдости НВ. Например, для стали 40Х в прутках (в состоянии поставки, т.е. без дополнительной термообработки) $\sigma_{\text{в}}=495$ МПа). Затем строим эпюру σ (рис. 11) и корректируем её (поправляем), чтобы соблюдалось равенство

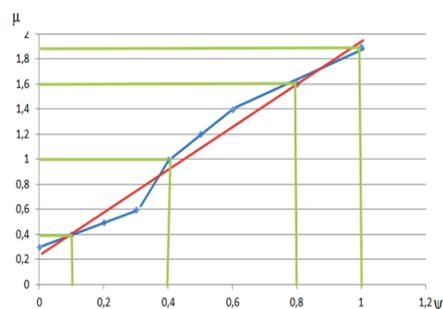
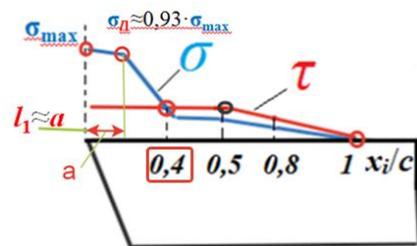
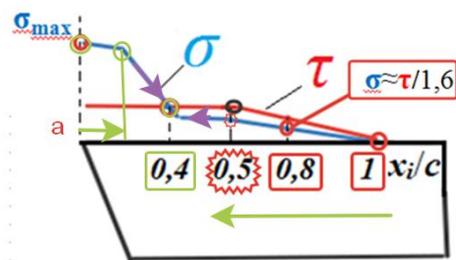


Рис. 9. Изменение условного коэффициента трения $\mu = \tau/\sigma$ вдоль длины контакта стружки с передней поверхностью. $\psi_i = x_i/c$ – относительная длина контакта.



а



б

Рис. 10. Построение эпюры нормальных напряжений σ относительно эпюры касательных контактных напряжений τ на передней поверхности резца

$$N = b \times \int_0^c \sigma_i \times dx$$

где x_i изменяется от 0 (координата у режущей кромки, т.е. при $x_i = 0$ мм) до $x_i = c$ (координата точки отрыва стружки от передней поверхности, т.е. при $x_i = c$). Для этого рассчитываем площадь эпюры σ : $S_\sigma = \Sigma s_{\sigma i}$ (МПа/мм);

Нормальная сила по эпюре σ $N_\sigma = S_\sigma \times b$ (Н) должна быть $\approx N_{\text{эксперимента}}$ (Н);

где b – ширины контакта стружки с п.п. реза, $b = t / \sin \varphi$. Касательная сила по эпюре τ $F_\tau = S_\tau \times b$ (Н) должна быть $\approx F_{\text{эксперимента}}$ (Н);

Площадь эпюры σ $S_\sigma = 160,1$ МПа/мм;

$N_{\text{эп}} \approx P_{z \text{ эп}} = S_\sigma \times b = 160,1 \times 2,82 = 451,2$ Н $\approx P_{z \text{ эксп}} = 446,4$ Н. (по удельным силам) вид эпюры σ назначен правильно.

Площадь эпюры τ : $S_\tau = \frac{(0,23+0,46) \times 293}{2} = 101$ МПа/мм;

$F \approx P_{xy} = S_\tau \times b = 101 \times 2,82 = 284,82$ Н $\approx P_{xy \text{ эксп}} = 283,3$ Н. (по удельным силам) вид эпюры τ назначен правильно.

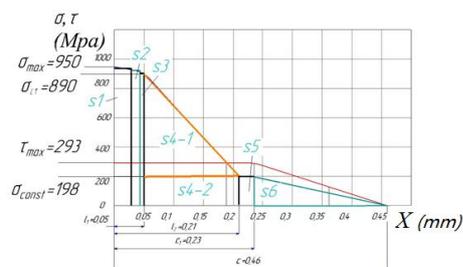


Рис. 11. Проверка правильности построения эпюр нормальных σ и касательных τ контактных напряжений на передней поверхности реза. Сталь 40Х - Т15К6; $t=2$ мм; $v=120$ м/мин; $\gamma=7^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $s=0,07$ мм/об.

Определение длины контакта стружки с передней поверхностью при отсутствии экспериментальных данных

Результаты измерения длины контакта стружки с передней поверхностью реза представлены на рис. 12.

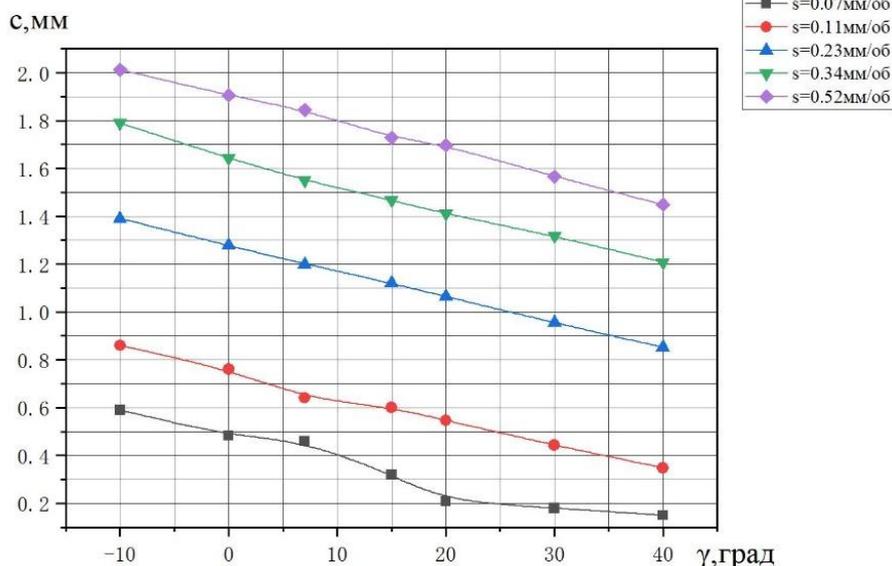


Рис. 12. Влияние величины переднего угла γ ($^\circ$) на длину контакта c (мм) при обработке стали 40Х

По графикам рис. 12 были построены графики влияния толщины среза a и величины переднего угла γ на длину контакта стружки с передней поверхностью c (рис. 12). По графикам рис. 12 были определены уравнения $c = f(\gamma)$ для $s = 0,07-0,52$ мм/об с помощью программного обеспечения OriginLab:

Для подачи $s=0,07$ мм/об, длина контакта $c = -0,01 \cdot \gamma + 0,5$ (мм);

Для подачи $s = 0,11$ мм/об, длина контакта $c = -0.01015 \cdot \gamma + 0.75$ (мм);
 Для подачи $s = 0,23$ мм/об, длина контакта $c = -0.01074 \cdot \gamma + 1.28$ (мм);
 Для подачи $s = 0,34$ мм/об, длина контакта $c = -0.01137 \cdot \gamma + 1.55$ (мм);
 Для подачи $s = 0,52$ мм/об, длина контакта $c = -0.0115 \cdot \gamma + 1.905$ (мм).

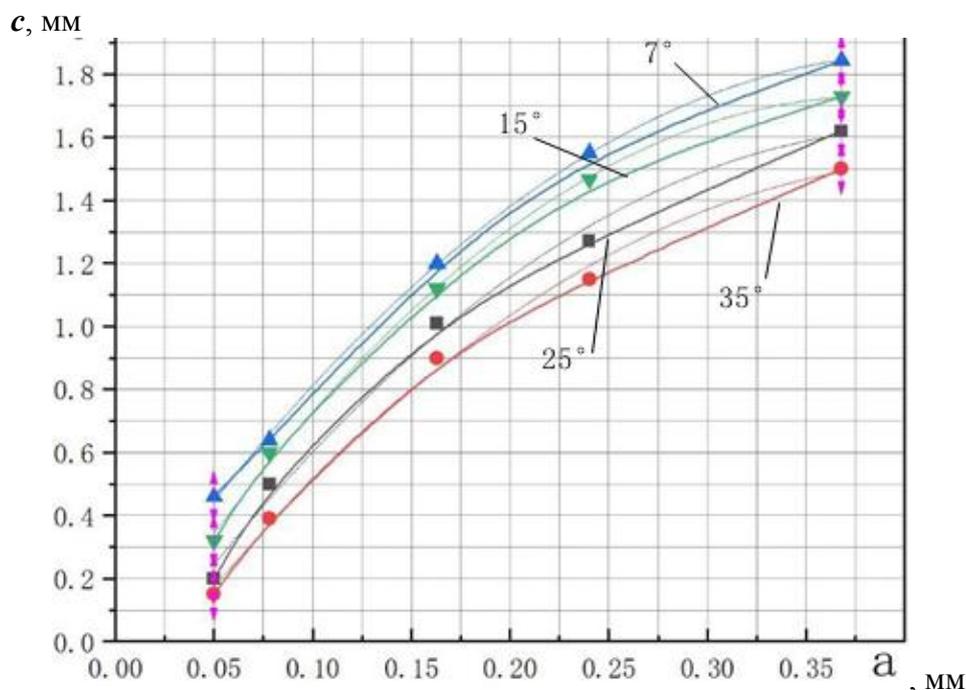


Рис. 13. Графики изменения длины контакта c (мм) от толщины среза a (мм) и переднего угла γ (°). Точками и цветными линиями обозначены графики по результатам измерений, тонкими линиями – при расчёте по формулам $c = f(\gamma)$

По графикам рис. 13 были определены уравнения $c = f(a)$ для $\gamma = +7^\circ$, $+15^\circ$, $+25^\circ$, $+35^\circ$ с помощью программного обеспечения OriginLab:

Если $\gamma = 7^\circ$, длина контакта $c = 0,026 + 8,955a - 10,903a^2$ (мм).

Если $\gamma = 15^\circ$, длина контакта $c = -0,103 + 9,564a - 12,483a^2$ (мм).

Если $\gamma = 25^\circ$, длина контакта $c = -0,016 + 8,728a - 10,638a^2$ (мм).

Если $\gamma = 35^\circ$, длина контакта $c = -0,205 + 8,105a - 9,507a^2$ (мм).

Расчёт параметров эюр контактных напряжений на передней поверхности и фаске задней поверхности резца при обработке стали

I. Углы в плане

Главный угол в плане φ - угол между направлением подачи и проекцией главной режущей кромки на основную плоскость.

Вспомогательный угол в плане φ_1 - угол между направлением подачи и проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

Угол при вершине ε - угол между проекциями главной и вспомогательной режущими кромками на основную плоскость. $\varepsilon = 180^\circ - (\varphi + \varphi_1)$.

Радиус при вершине R (r) играет решающую роль на шероховатость обработанной поверхности, особенно при малой подаче (s менее 0,2 мм/об).

Плоскость $N-N$ называется **главной секущей плоскостью**. Она проходит перпендикулярно **основной плоскости** и проекции **главной режущей кромки** на основную плоскость. Плоскость $N-N$ называется **главной секущей плоскостью**, так как именно в ней и параллельных ей плоскостях, проходящих через любые точки главной режущей кромки, происходит **процесс деформирования обрабатываемого материала** при его переходе в стружку.

В главной секущей плоскости измеряются:

главный передний угол γ - угол между **передней поверхностью** резца (или касательной к ней) и плоскостью, перпендикулярной **к плоскости резания** в рассматриваемой точке главной режущей кромки;

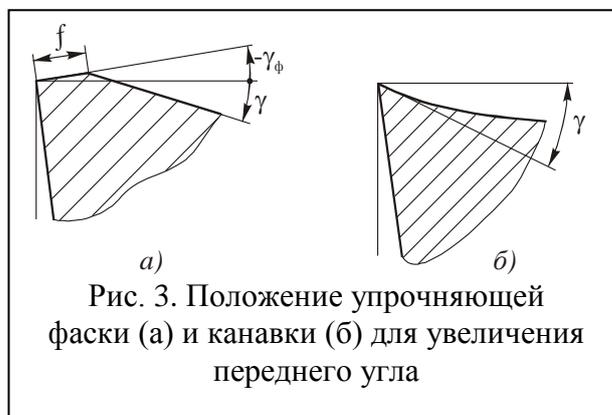
главный задний угол α - угол между главной задней поверхностью резца (или касательной к ней) и плоскостью резания;

угол резания δ - угол между плоскостью резания и передней поверхностью резца (или касательной к ней); **угол заострения β** - угол между главной задней и передней поверхностями резца (или касательными к ним): $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$.

Аналогично и в сечении вспомогательной режущей кромки резца **вспомогательной секущей плоскостью N_1-N_1** .

При измерении переднего угла следует учитывать, что в зависимости от положения передней поверхности относительно основной плоскости **передний угол γ** может иметь **положительное** или **отрицательное** значения. В первом случае передняя поверхность резца направлена вниз от режущей кромки, а во втором случае – вверх от нее. Если передняя поверхность параллельна основной плоскости, то передний угол равен нулю.

У твердосплавных резцов с целью упрочнения режущего клина переднюю поверхность часто затачивают с двумя передними углами. При этом передний угол по фаске затачивают отрицательным $\gamma_\phi = (-5^\circ \dots -15^\circ)$, длина фаски $f \approx (0,2 \dots 0,8) \cdot a$, где a – **толщина срезаемого слоя**, которая зависит от рабочей подачи s и главного угла в плане φ : $a = s \cdot \sin \varphi$, мм.



Передний угол за фаской чаще всего выполняют положительным. Если передняя поверхность криволинейная, то передний угол измеряют между основной плоскостью и плоскостью, касательной к криволинейной передней поверхности резца.

При **поперечной** подаче резца на величины **кинематических переднего и заднего углов** оказывает влияние положение вектора скорости резания, через который проходит плоскость резания. Если вершина резца из точки смещена вверх в точку относительно оси центров токарного станка, то кинематический передний угол увеличивается, а кинематический задний угол уменьшается на эту же величину. При смещении вершины резца вниз относительно оси центров наблюдается обратная картина. **Положительный передний угол γ** затачивается для **облегчения образования стружки** и уменьшения силы резания.

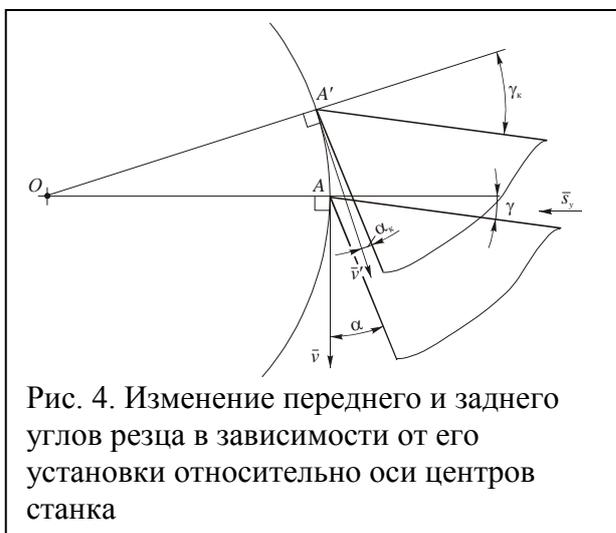


Рис. 4. Изменение переднего и заднего углов резца в зависимости от его установки относительно оси центров станка

Положительный задний угол α создают для **уменьшения трения** между поверхностью резания и задней поверхностью резца. С увеличением заднего угла прочность режущего клина снижается. Поэтому в зависимости от нагрузки на режущий клин, а также от прочности инструментального материала и условий резания чаще всего задний угол $\alpha=6...10^\circ$

В плоскости резания (вид на главную режущую кромку) измеряют **угол наклона главной режущей кромки λ** - угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью. Угол наклона главной режущей кромки λ также, как и передний угол, оказывает влияние на процесс деформирования материала заготовки через **изменение направления схода стружки** по передней поверхности инструмента. Угол λ принято считать **положительным**, когда наиболее уязвимая для разрушения вершина резца занимает наинизшее положение по сравнению с другими точками главной режущей кромки. Благодаря этому вершина резца предохраняется от повреждений, особенно **при прерывистом резании и работе с ударными нагрузками**. При положительных углах стружка сходит в направлении к обработанной поверхности и, царапая ее, увеличивает шероховатость последней.

На **чистовых операциях** применяют **отрицательные** значения угла λ , так как в этом случае нагрузка на режущий клин относительно невелика, а стружка отводится в направлении **от обработанной** поверхности. В этом случае вершина резца по сравнению с другими точками главной режущей кромки занимает наивысшее положение. Если главная режущая кромка параллельна основной плоскости, то угол $\lambda=0^\circ$ - это наиболее часто.

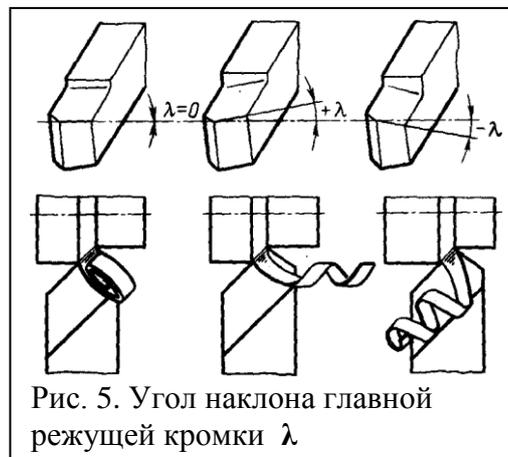


Рис. 5. Угол наклона главной режущей кромки λ

Наличие **отрицательного λ** **ослабляет вершину резца**, поэтому рекомендуется уменьшать подачу и глубину резания в против обработки с нулевым λ

У токарного резца имеется державка и головка резца с **вершиной 1**. Поверхность 2, по которой сходит стружка, называется **передней поверхностью**, а две другие поверхности, обращенные к поверхности резания и к обработанной поверхности, называются соответственно **главная задняя поверхность 3** и **вспомогательная задняя поверхность 4**. При пересечении передней поверхности с главной и вспомогательной задними поверхностями образуются соответственно **главная режущая кромка 5** и **вспомогательная режущая кромка 6**.



Рис. 6. Поверхности и грани (режущие кромки) резца

1,5...2 раза

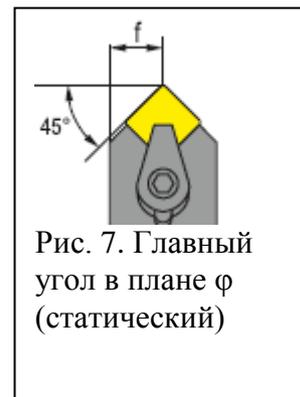


Рис. 7. Главный угол в плане ϕ (статический)

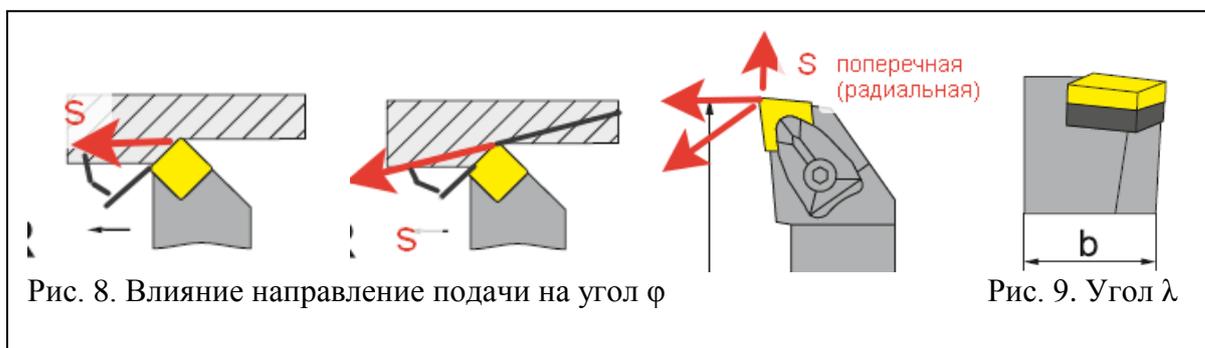


Рис. 8. Влияние направление подачи на угол ϕ

Рис. 9. Угол λ

Лабораторная работа № 2.
Исследование силовых зависимостей процессов резания

Для измерения технологических составляющих силы резания используется трёхкомпонентный токарный динамометр.

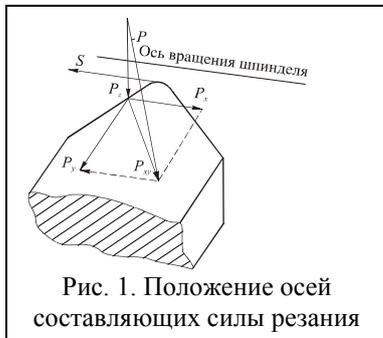


Рис. 1. Положение осей составляющих силы резания

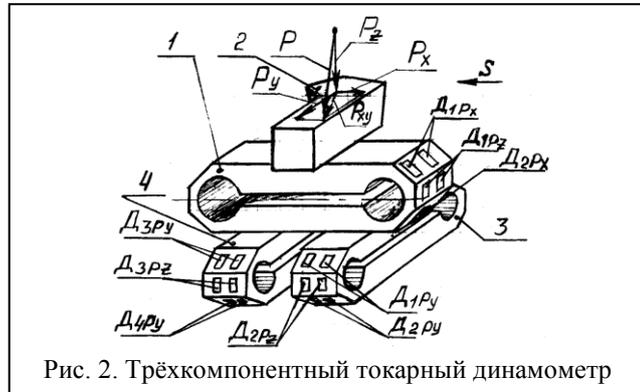


Рис. 2. Трёхкомпонентный токарный динамометр



Рис. 3. Установка резца в динамометр Kistler 9257B на токарном станке (а), настройка усилителя для измерения технологических составляющих силы резания (б), демонстрация на экране изменения составляющих силы резания в процессе резания и их запись отдельным файлом



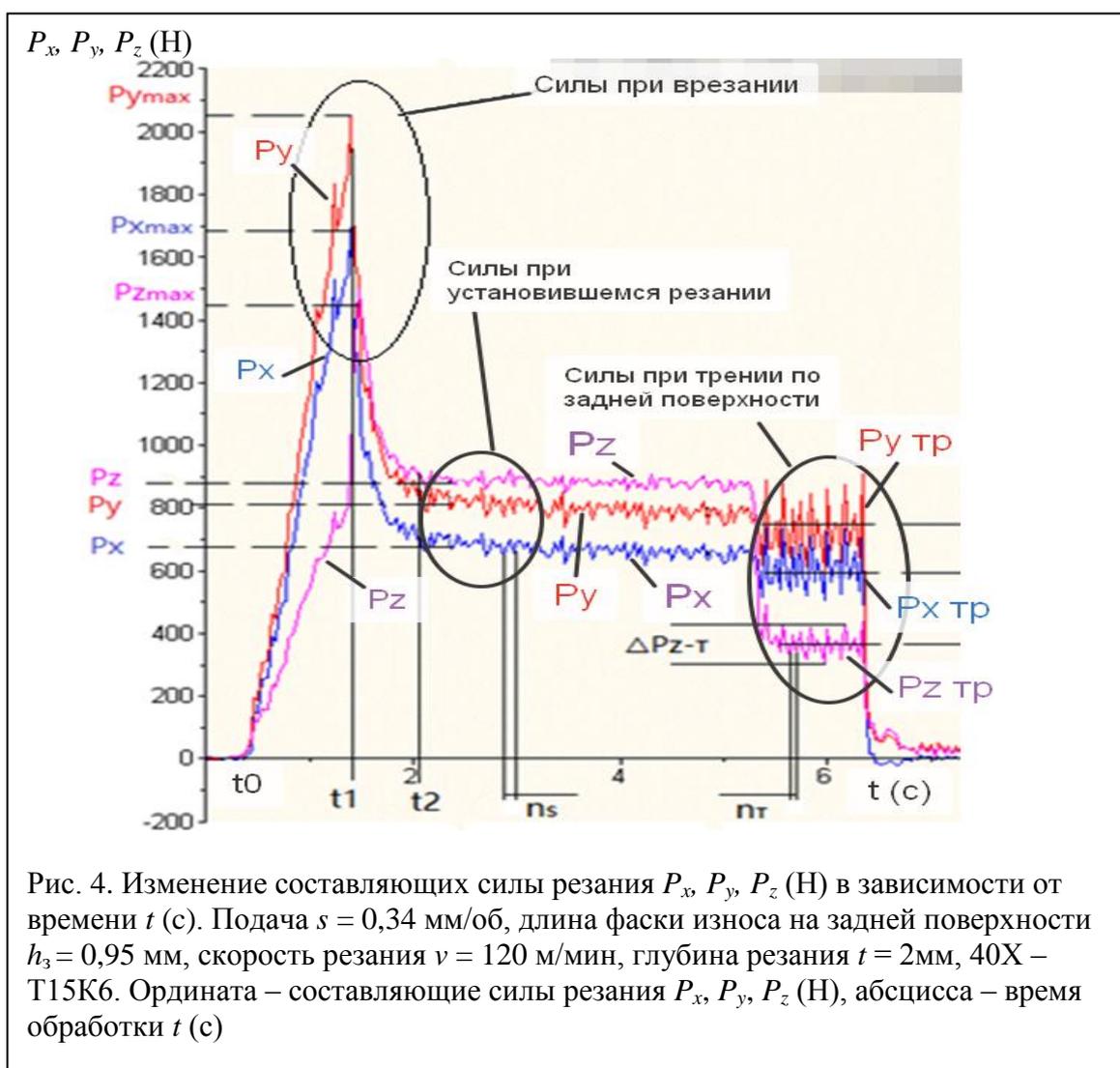
Рис. 4. Портативный микроскоп (а) для измерения общей длины контакта стружки с передней поверхностью резца c (мм) и длины пластического контакта c_1 (мм), нарост на резце (б) и расположение участка пластического контакта c_1 на длине c . b – ширина среза (мм)

При токарной обработке толщина среза a и ширина контакта стружки b с передней поверхностью рассчитываются по формулам:

$$a = s \times \sin \varphi \text{ (мм)}, \quad b = t \times \sin \varphi \text{ (мм)},$$

где s – продольная подача (мм/об); t – глубина резания (мм); φ – главный угол в плане ($^\circ$) (рис. 4).

Для исследования влияния износа на составляющие силы резания на главной задней поверхности режущей пластины затачивалась фаска длиной $h_3 = 0,95$ мм, измеряемая перпендикулярно главной режущей кромке, с задним углом $\alpha_h = 0^\circ$, моделирующая износ по задней поверхности. Радиус округления режущей кромки $\rho = 0,003$ мм соответствовал естественной заточке инструмента.



После измерения технологических составляющих P_z , P_y и P_x силы резания с фаской наибольшей длины $h_3 = 0,9$ мм при различных подачах и глубине резания, резец перетачивался только по главной задней поверхности, что обеспечивало постоянство заднего угла на фаске задней поверхности $\alpha_h = 0^\circ$. Последовательное уменьшение длины фаски за счёт переточки по задней поверхности позволило получить данные об изменении сил на фаске задней поверхности при различных подачах и глубине резания.

При врезании токарного резца происходит сначала увеличение всех составляющих силы резания до момента образования стружки, после чего силы уменьшаются до

величины, характерной для установившегося резания (рис. 4). Увеличение сил резания при врезании объясняется нами вдавливанием слоя металла под режущую кромку из-за наличия округления режущей кромки, что особенно сильно увеличивает составляющие P_y и P_x , т.е. результирующую P_{xy} . Тангенциальная составляющая P_z , при врезании являющаяся силой трения по задней поверхности, увеличивается по сравнению с установившемся резанием менее существенно, что связано с малым коэффициентом трения на фаске задней поверхности и на радиусном участке режущей кромки, контактирующего с поверхностью резания.

При установившемся резании острым резцом тангенциальная составляющая P_z становится больше P_x и P_y , но меньше P_{xy} , что говорит о среднем коэффициенте трения больше единицы (рис. 5). При анализе контактных процессов на передней поверхности необходимо оперировать не силами, а контактными напряжениями, распределение которых было получено методом разрезного резца [5, 9], а характер их распределения изучался поляризационно-оптическим методом [5] и лазерной интерферометрии [12].

После переточки по резца по задней поверхности он устанавливался на динамометр и производилась настройка на прежнюю глубину резания, однако она может быть установлена с погрешностями, связанными с **неточностью настройки лимба** поперечной подачи на ноль в разных сериях эксперимента, из-за упругой деформации системы СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка) и с **особенностями самого процесса резания**.

Чтобы исключить эту погрешность глубины резания выполнялось измерение фактической глубины резания ($t_{факт}$) измерением диаметра заготовки до и после точения, а затем по фактической силе резания (например, $P_{z факт}$) и фактической глубине резания ($t_{факт}$) рассчитывались удельные силы резания (например, $q_{z факт}$), а затем **рассчитывались** составляющие силы резания (например, $P_{z расч}$) по задаваемой (настраиваемой) глубине резания ($t_{настр}$).

$q_{pz} = q_{pz факт} = P_{z факт} / (t_{факт} \times s)$ (Н/мм²) или (МПа);

$P_{z расч} = q_{pz факт} \times t_{настр} \times s$ (Н).

Такой способ позволяет увеличить точность определения составляющих сил резания, что особенно важно для определения характера распределения контактных напряжений и их величины на искусственной **фаске задней поверхности** методом переменной фаски. При этом делаются допущения, что при изменении длины фаски силы

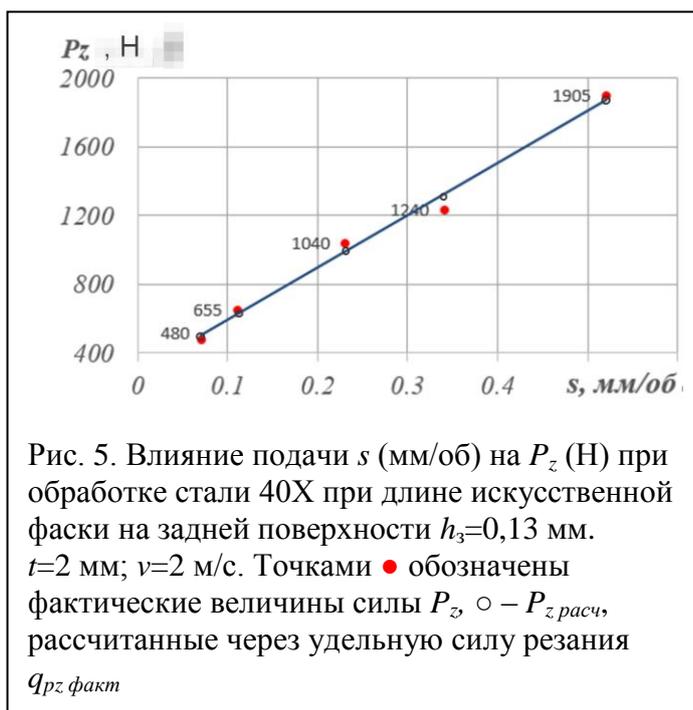


Рис. 5. Влияние подачи s (мм/об) на P_z (Н) при обработке стали 40X при длине искусственной фаски на задней поверхности $h_3=0,13$ мм. $t=2$ мм; $v=2$ м/с. Точками \bullet обозначены фактические величины силы P_z , \circ – $P_z расч$, рассчитанные через удельную силу резания

$q_{pz факт}$

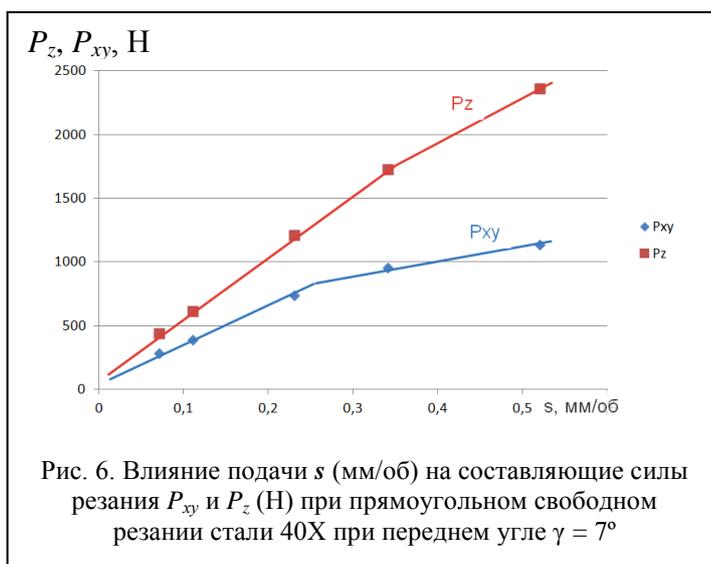


Рис. 6. Влияние подачи s (мм/об) на составляющие силы резания P_{xy} и P_z (Н) при прямоугольном свободном резании стали 40X при переднем угле $\gamma = 7^\circ$

на передней поверхности не изменяются и контактные напряжения на i -том участке фаске задней поверхности σ_{hi} и τ_{hi} мало зависят от величины напряжений на соседних участках, т.е. σ_{hi-1} и τ_{hi-1} , σ_{hi+1} и τ_{hi+1} .

Глубина резания t (мм) в расчётах уточнённых, или расчётных, технологических составляющих $P_{z\text{ расч}}$ и $P_{zxy\text{ расч}}$ силы резания принималась равной средней глубине резания $t_{\text{ср}}$ (мм) в серии экспериментов и называлась **условной** глубиной резания $t_{\text{усл}}$ (мм), чтобы отличать её от настраиваемой. Т.к. при исследовании старались выдержать настраиваемую глубину резания, то $t_{\text{усл}} \approx t_{\text{настр}}$ (мм).

Расчёт физических составляющих силы резания N и F по технологическим составляющим P_z и P_{xy} при переднем угле $\gamma \neq 0^\circ$ выполняем по формулам, которые получаем из суммы векторов (рис. 4.3):

$$\vec{P}_z = \vec{N}_{Pz} + \vec{F}_{Pz}; \quad (1)$$

$$\vec{P}_{xy} = \vec{F}_{Pxy} + \vec{N}_{Pxy}. \quad (2)$$

Из этих формул получаем два уравнения (3) и (4) для расчёта физических сил резания:

$$N = N_{Pz} - N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (3)$$

Второе слагаемое со знаком **минус** ($-N_{Pxy}$), т.к. эта составляющая направлена в **обратном** направлении по сравнению с направлением N_{Pz} ;

$$F = F_{Pxy} + F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma. \quad (4)$$

С помощью динамометра измеряем технологические силы P_z , P_x и P_y . Рассчитываем P_{xy} и заносим в таблицу 1. Рассчитываем физические составляющие силы резания и также заносим в таблицу 1.

Необходимость расчёта физических составляющих N_i и F_i силы резания вызвана необходимостью определения распределения контактных напряжений, напрямую связанных с длиной контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Без этих сил эпюры контактных напряжений правильно построить невозможно, а значит и рассчитать НДС инструмента.

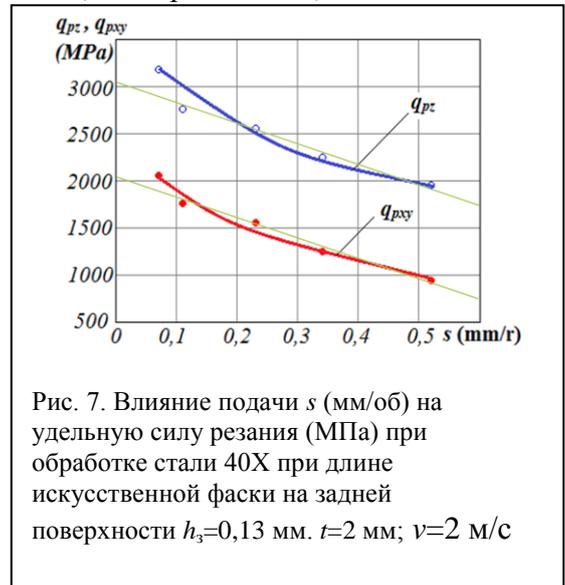


Рис. 7. Влияние подачи s (мм/об) на удельную силу резания (МПа) при обработке стали 40X при длине искусственной фаски на задней поверхности $h_3=0,13$ мм. $t=2$ мм; $v=2$ м/с

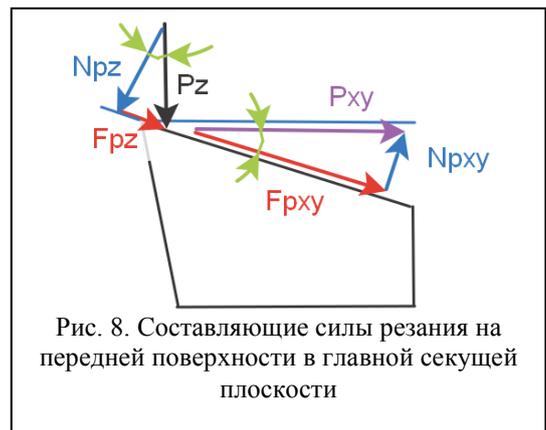


Рис. 8. Составляющие силы резания на передней поверхности в главной секущей плоскости

Табл. 1 – Силы резания, рассчитанные по удельным силам резания, полученных из экспериментов при постоянной условной глубине резания $t=1,99$ мм

a, мм	s, мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +7^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +15^\circ$, Н		
		$P_{xy,cp}$	$P_{z,cp}$	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}		P_{xy}	P_z	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	286	443	0,646	338	405	0,83		223	433	0,516	327	360	0,909
0,078	0,11	396	619	0,640	469	566	0,83		309	577	0,536	448	477	0,939
0,163	0,23	742	1216	0,610	885	1117	0,79		635	1087	0,584	894	886	1,010
0,240	0,34	961	1735	0,554	1165	1606	0,73		864	1592	0,543	1247	1314	0,949
0,368	0,52	1144	2370	0,483	1425	2214	0,64		1078	2222	0,485	1616	1867	0,866
a, мм	s, мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +25^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +35^\circ$, Н		
		$P_{xy,cp}$	$P_{z,cp}$	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}		P_{xy}	P_z	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	167	394	0,646	318	286	1.111		110	354	0.313	294	226	1.298
0,078	0,11	223	520	0,640	422	377	1.119		137	463	0.295	378	301	1.255
0,163	0,23	479	981	0,610	849	686	1.237		324	874	0.370	767	530	1.445
0,240	0,34	650	1414	0,554	1187	1007	1.179		436	1234	0.353	1065	761	1.400
0,368	0,52	817	1948	0,483	1564	1420	1.101		556	1674	0.332	1416	1059	1.346

Обобщенные **эмпирические** уравнения для расчетов составляющих силы резания учитывают влияние основных параметров режима резания и имеют следующий вид:

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} s^{y_{pz}} v^{n_{pz}} K_{pz};$$

$$P_x = C_{px} t^{x_{px}} s^{y_{px}} v^{n_{px}} K_{px};$$

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} s^{y_{py}} v^{n_{py}} K_{py}.$$

Значения **показателей степеней** x_{pz} , y_{pz} и т.д. можно рассчитать из графиков **зависимости составляющей силы от глубины резания t** или подачи s , в двойных логарифмических координатах, т.к. график степенной функции $P_z = C'_{Pz} \cdot t^{x_{pz}}$ (при $s = const$) в координатах **$lg P_z - lgt$** представляет собой прямую линию.

$$x_{pz} = tg \tau = A/B.$$

Аналогичный график строится при $t = const$ ($P_z = C'_{Pz} \cdot s^y$).

После определения показателей степеней x_{pz} , y_{pz} и т.д. **коэффициенты** C_{Pz} , C_{Pz} и C_{Pz} рассчитываются из указанных формул при **известных силах P_z , P_x и P_y , определённых из экспериментов.**

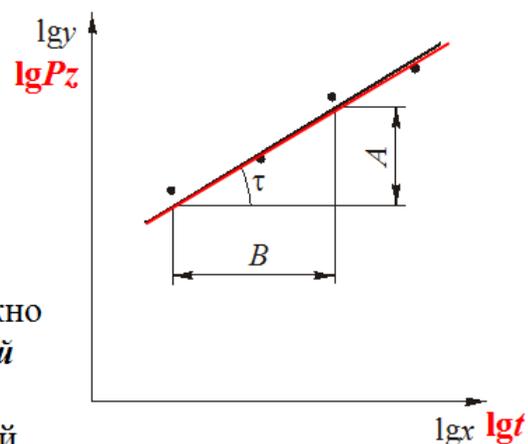


Схема для определения показателя степени k в уравнении $y = C_x \cdot x^k$.
 $k = tg \tau = (A/B)$.

Отрезки A и B измеряются **линейкой** на графике $lgy - lgx$ (**$lg P_z - lgt$**)

Лабораторная работа № 3.
Исследование процессов резания в условиях наростообразования

Цели работы: исследовать влияние скорости резания на силы резания, температуру и ударную стружку.

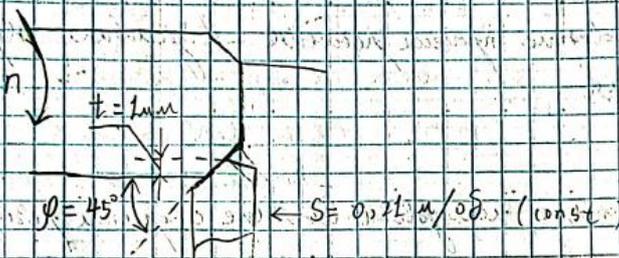
Порядок выполнения:

1. Обточить заготовку с постоянной подачей S (мм/об); глубиной резания t (мм), ~~переменной~~ ^{переменной} скоростью резания V (м/мин). Изменяем частоту вращения шпинделя станка n (об/мин).

$$V = \frac{\pi \cdot d_{\text{заг}} \cdot n}{1000} \quad (\text{м/мин}) \quad d_{\text{заг}} - \text{мм}; \quad n - \text{об/мин}$$

$$d_{\text{заг}} = 80,4 \text{ мм} \quad d_{\text{после обработки}} = 78,4 \text{ мм}$$

$$t = \frac{d_{\text{заг}} - d_{\text{после обра.}}}{2} = \frac{80,4 - 78,4}{2} = 1 \text{ мм}$$



толщина среза $a = S \cdot \sin \phi = 0,21 \cdot \sin 45^\circ = 0,21 \cdot 0,707 = 0,148 \text{ мм}$

При этом записываем силу тока I по Кандальцу (P_z, P_y, P_x)

2) Рассчитываем силы $P_z = I_{Pz} \cdot K_{Pz}$

a_1 — толщина стружки

↓
углообразование
коэффициент

$$K_{Pz} = \frac{P_{z1}}{I_{Pz1}} = \frac{980}{100} = 9,8 \left(\frac{\text{Н}}{\text{мА}} \right)$$

усредн по толщине стружки

$$K_{Px} = \frac{P_{x1}}{I_{Px1}} = \frac{318}{50} = 6,36 \left(\frac{\text{Н}}{\text{мА}} \right) \quad K_{a1} = \frac{a_1}{a} = \frac{0,98}{0,148} =$$

$$K_{Py} = \frac{P_{y1}}{I_{Py1}} = \frac{871}{145} = 6,0 \left(\frac{\text{Н}}{\text{мА}} \right)$$

Таблица 1. Влияние скорости резания на температуру, усадку стружки и силы резания

№	n_1 об/мин	v_L м/мин	IP_z кА	P_z Н	IP_y кА	P_y Н	IP_x кА	P_x Н	θ кА	$t_{рез}$ с	a_1 мм	a_2 мм	K_a	R_z
1	12,5	3,2	100	980	115-50	871	50-20	318	10	200	$a_1 = const = 0,148$	0,98	6,53	
2	40	10,2	50	490	80-50	402	40-20	212	11	270		0,76	1,73	
3	80	20,2	47	460,6	70-50	268	36	169,6	19	380		0,33	2,2	
4	160 (38,58)	41,3	50	490	76-50	268	36	169,6	29	600		0,44	2,73	
5	315	79,4	53	519,4	75-50	335	40	212	34	680		0,56	2,4	
6	630	159	50	490	71-50	294,8	35	159	38	760		0,37	2,13	
7	1250	315	51	500	71-50	281,4	35	159	45	900		0,32	2,13	

$$v \uparrow \quad R_a \downarrow \quad \theta_1 = 10^{-3} R_z, \text{ мВ}$$

4) Усадка стружки весовым методом

$$W_{\text{энт. ссы}} = W_{\text{стружка}} \quad W - \text{объем}$$

$$a \cdot b \cdot l = a_1 \cdot b_1 \cdot l_1 \quad K_l = \frac{l}{l_1} \quad (l_1 < l)$$

$$l = \frac{m_{\text{отр}}}{\rho \cdot S \cdot t} \Rightarrow \rho - \text{удельный вес стружки}$$

$$K_l = \frac{l}{l_{\text{отр}}} = \frac{m_{\text{отр}}}{\rho \cdot S \cdot t_{\text{отр}}} = \frac{10^3}{\rho \cdot S \cdot t}$$

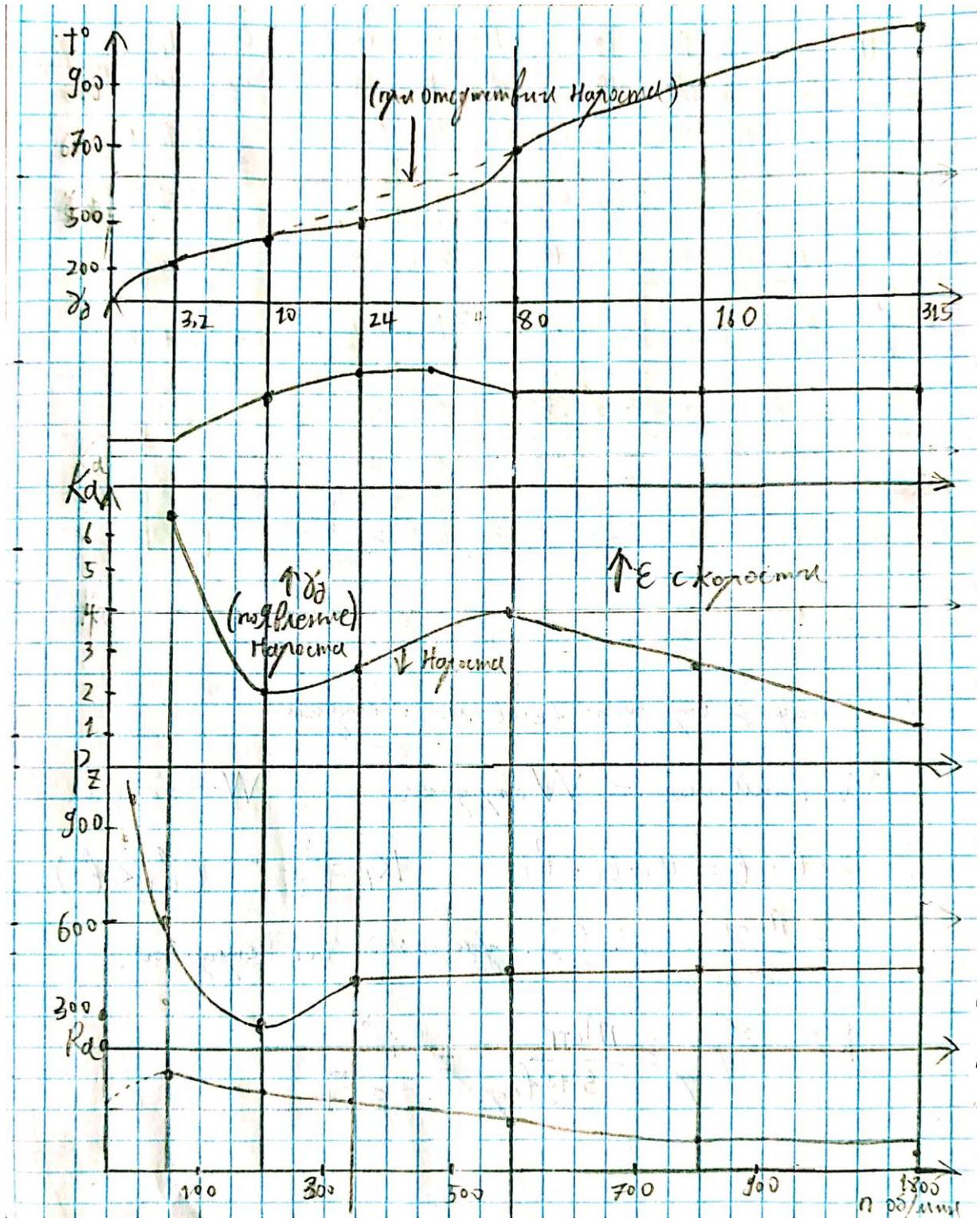


Рис. 1. Влияние скорости резания v (м/мин) на температуру резания t ($^{\circ}\text{C}$), действительный передний угол γ_0 ($^{\circ}$) при образовании нароста, усадку стружки по толщине K_a , составляющую P_z (Н) силы резания и шероховатость обработанной поверхности R_a (мкм)

При разрушении нароста (рис. 2) одна его часть внедряется в обработанную поверхность, а другая уносится со стружкой. Силы сцепления нароста с передней поверхностью достаточно большие и поэтому часто наблюдается **разрушение твердосплавных инструментов**, имеющих пониженное сопротивление на разрыв. По этой причине **твердые сплавы** рекомендуется **использовать** только на тех режимах резания, когда **нарост отсутствует**. Характерным признаком наростообразования является **высокая шероховатость (R_z, Ra)** обработанной поверхности, вызванная **внедрившимися частицами разрушенного нароста**. Нарост **предохраняет заднюю поверхность** инструмента от контакта с обработанной поверхностью, однако **полностью освободить ее от износа не может** из-за периодических срывов



Рис. 2. Образование нароста и его периодическое разрушение

Нарост появляется уже на малых скоростях резания при комнатной температуре и характеризуется в этом случае слабой устойчивостью. При повышении скорости резания температура резания растет и **при температуре резания $\Theta \approx 300^\circ\text{C}$** (в диапазоне скоростей резания $v_1 \dots v_2$) **высота нароста H достигает максимума** (рис.3). При дальнейшем повышении скорости резания в диапазоне $v_2 \dots v_3$ нарост уменьшается из-за уменьшения его прочности и **совсем исчезает** при скорости резания, когда **температура резания $\Theta \approx 600^\circ\text{C}$** .

Резание в области отсутствия нароста, то есть на **повышенных скоростях $v > v_3$** сопровождается **уменьшением** среднего коэффициента трения $\mu_{\text{ср}}$ из-за **увеличения удельного нормального напряжения σ** , но **сохранением** касательного контактного напряжения τ . В свою очередь это вызывает **уменьшение угла действия ω** и **увеличение угла наклона условной плоскости сдвига Φ** . В результате происходит снижение усадки стружки K и силы резания R . Увеличение скорости резания вызывает также **увеличение скорости деформации $\dot{\epsilon}$** в области стружкообразования, что приводит к **уменьшению пластичности** обрабатываемого материала и **уменьшению области** стружкообразования. Это приводит к **увеличению угла наклона условной плоскости сдвига Φ** и **уменьшению силы резания R** .

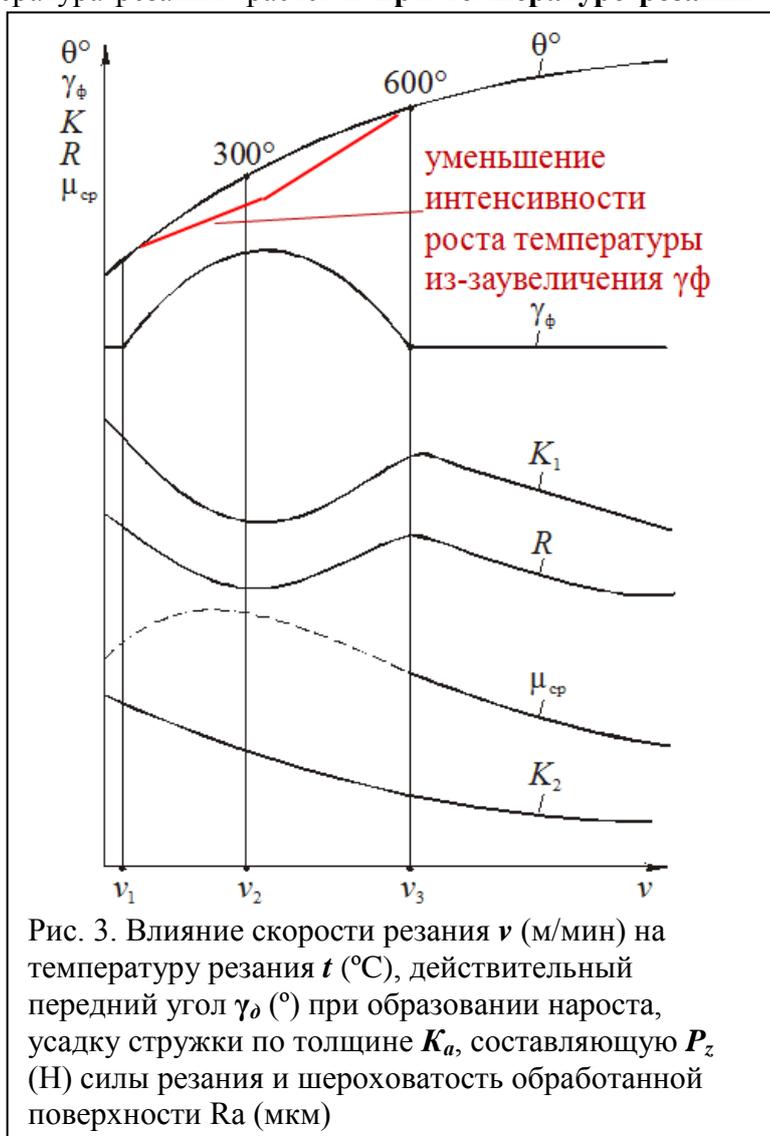


Рис. 3. Влияние скорости резания v (м/мин) на температуру резания t ($^\circ\text{C}$), действительный передний угол γ_d ($^\circ$) при образовании нароста, усадку стружки по толщине K_a , составляющую P_z (Н) силы резания и шероховатость обработанной поверхности Ra (мкм)

iam28@tpi.ru (Илья Андреевич Мезер): таблица измерения сил резания гр. 4AM92 (Иссл проц обраб резанием и РИ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	№	n	v	IPZ	Pz	Ipx	Px	Ipy	Py	θ	S	t	Aw	a	a1	Ka	мстр	l	Kl	Rz	
2		об/мин	м/мин	μА	H	μА	H	μА	H	μА		мм/об	мм	Вт/м	мм	мм			мм		мкм
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	1	12.5	2.7475	20	200	15	165			10	200	0.13	2			0.98	6.53				
5	2	40	8.792	60	600	20	220			11	200	0.13	2			0.26	4.5				
6	3	80	17.584	60	600	20	220					0.13	2								
7	4	160	35.168	60	600	20	220					0.13	2								
8	5	315	69.237	80	800	33	363					0.13	2								
9	6	630	138.474	70	700	30	330					0.13	2								
10	7	1250	274.75	60	600	26	286					0.13	2								
11	8	80	17.584	130	1300	40	440	70	928.9	19	380	0.23	2			0.33	2.2				
12	9	160	35.168	130	1300	55	605	50	663.5	29	600	0.23	2			0.34	2.73				
13	10	315	69.237	110	1100	44	484	75	995.25	34	680	0.23	2			0.36	2.4				
14	11	630	138.474	130	1300	35	385	72	955.44	38	760	0.23	2			0.32	2.13				
15	12	1250	274.75	120	1200	30	330	71	942.17	45	900	0.23	2		0.15	0.32	2.13				

Лабораторная работа № 4.
Измерение составляющих силы резания при разных передних углах реза
при обработке стали

Табл. 1 – Влияние переднего угла γ ($^\circ$) и подачи s (мм/об) на составляющие силы резания при постоянной условной глубине резания $t=1,99$ мм. Сталь 40Х-Т15К6, $\phi = 45^\circ$, $r = 0,05$ мм, $t = 2$ мм														
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +7^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +15^\circ$, Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}		P_{xy}	P_z	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	286	443	0,646	338	405	0,83		223	433	0,516	327	360	0,909
0,078	0,11	396	619	0,640	469	566	0,83		309	577	0,536	448	477	0,939
0,163	0,23	742	1216	0,610	885	1117	0,79		635	1087	0,584	894	886	1,010
0,240	0,34	961	1735	0,554	1165	1606	0,73		864	1592	0,543	1247	1314	0,949
0,368	0,52	1144	2370	0,483	1425	2214	0,64		1078	2222	0,485	1616	1867	0,866
a , мм	s , мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +25^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +25^\circ$, Н				Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, и $\gamma = +35^\circ$, Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +35^\circ$, Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}		P_{xy}	P_z	μ_{cp}	F	N	μ_{cp}
0,05	0,07	167	394	0,646	318	286	1.111		110	354	0.313	294	226	1.298
0,078	0,11	223	520	0,640	422	377	1.119		137	463	0.295	378	301	1.255
0,163	0,23	479	981	0,610	849	686	1.237		324	874	0.370	767	530	1.445
0,240	0,34	650	1414	0,554	1187	1007	1.179		436	1234	0.353	1065	761	1.400
0,368	0,52	817	1948	0,483	1564	1420	1.101		556	1674	0.332	1416	1059	1.346

Измерение составляющих силы резания при моделировании износа резца по задней поверхности при обработке стали

Для исследования влияния износа на составляющие силы резания на главной задней поверхности режущей пластины затачивалась фаска длиной $h_3 = 0,95$ мм, измеряемая перпендикулярно главной режущей кромке, с задним углом $\alpha_h = 0^\circ$, моделирующая износ по задней поверхности. Радиус округления режущей кромки $\rho = 0,003$ мм соответствовал естественной заточке инструмента.

После переточки по резца по задней поверхности он устанавливался на динамометр и производилась настройка на прежнюю глубину резания, однако она может быть установлена с погрешностями, связанными с **неточностью настройки лимба** поперечной подачи на ноль в разных сериях эксперимента, из-за упругой деформации системы СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка) и с **особенностями самого процесса резания**.

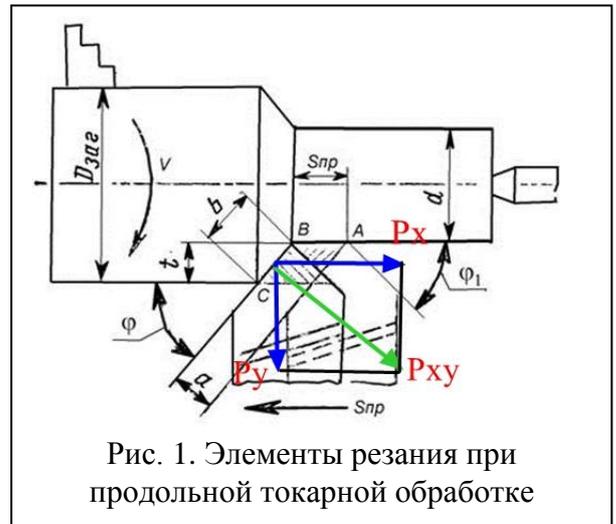


Рис. 1. Элементы резания при продольной токарной обработке

Независимо от типа и назначения режущие инструменты изнашиваются прежде всего по **задним поверхностям**. Наиболее интенсивно изнашиваются участки задних поверхностей, прилегающих к режущей кромке, где контактные напряжения особенно высоки. В результате этого образуется площадка (фаска) износа h_{zn} (h_f) с **нулевым ($\alpha_f = 0^\circ$)** ($\alpha_h = 0^\circ$), а в отдельных случаях и с небольшим **отрицательным задним углом α_f** . При несвободном резании ширина (длина) фаски износа h_{zn} вдоль длины режущих кромок неравномерна. Она несколько **увеличена на вершине резца** (точка A), где высокая температура и условия трения наиболее неблагоприятны. Иногда на **краю площадки** (точка B) наблюдается **локальный износ** в виде узкой проточки, из-за упрочненного поверхностного слоя заготовки.

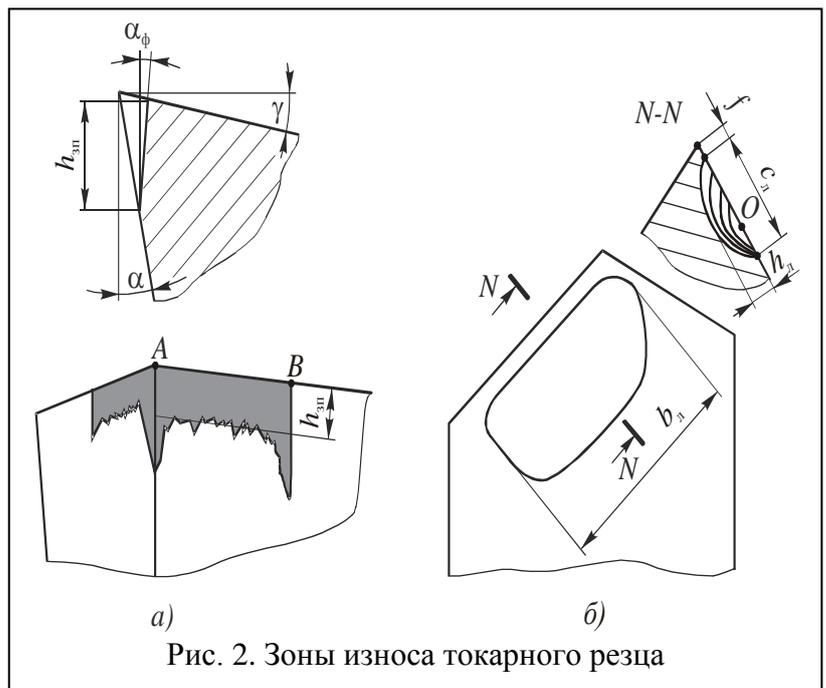


Рис. 2. Зоны износа токарного резца



Рис. 3. Зоны износа токарного резца

Также было исследовано влияние длины фаски износа по задней поверхности на силы, действующие на фаске, при врезании при обработке стали (рис. 4).

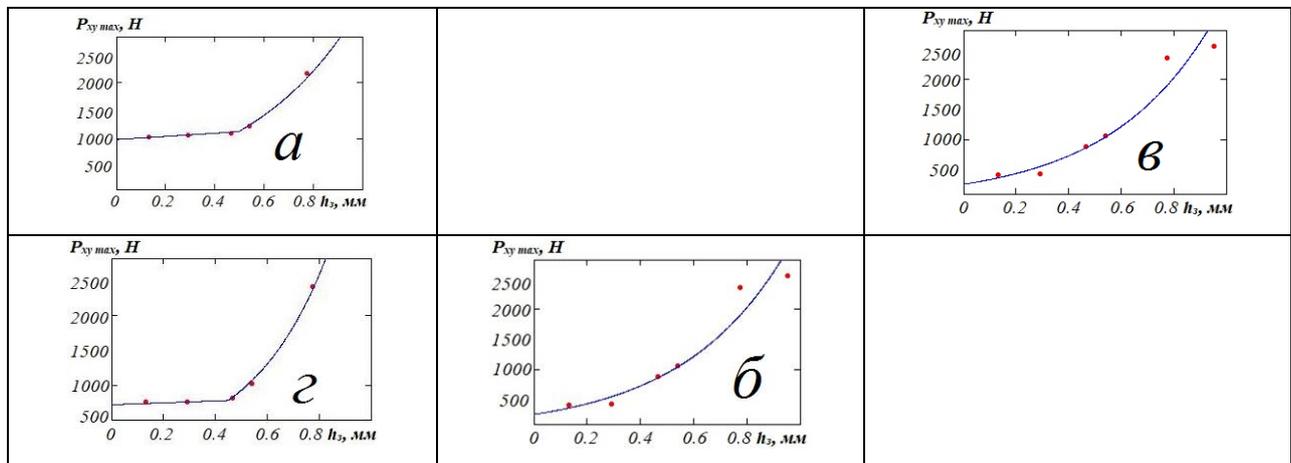


Рис. 4. Влияние длины фаски по задней поверхности h_3 (мм) на составляющую $P_{xy\max}$ силы резания на фаске задней поверхности (на нормальную силу на фаске задней поверхности N_h) при врезании на различных подачах. Сталь 40X - T15K6, $t=2$ мм, $v=120$ м/мин. а) $s=0,07$ мм/об; б) $s=0,11$ мм/об; в) $s=0,23$ мм/об; г) $s=0,34$ мм/об; д) $s=0,52$ мм/об.

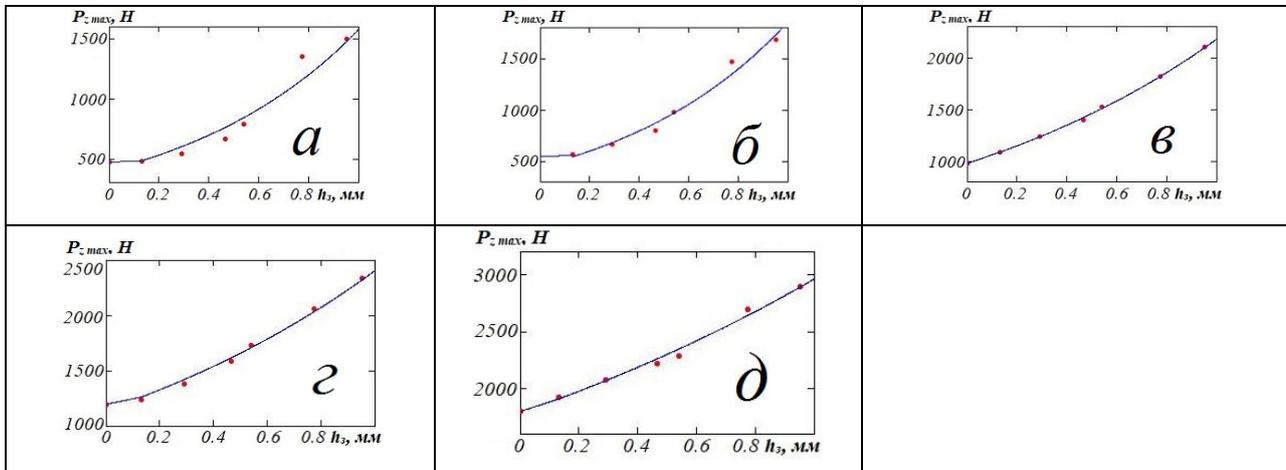
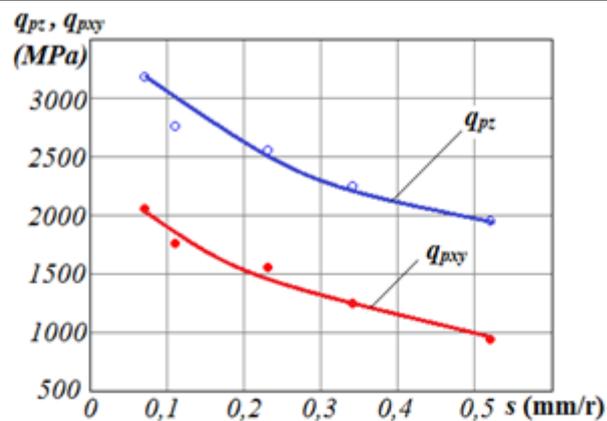
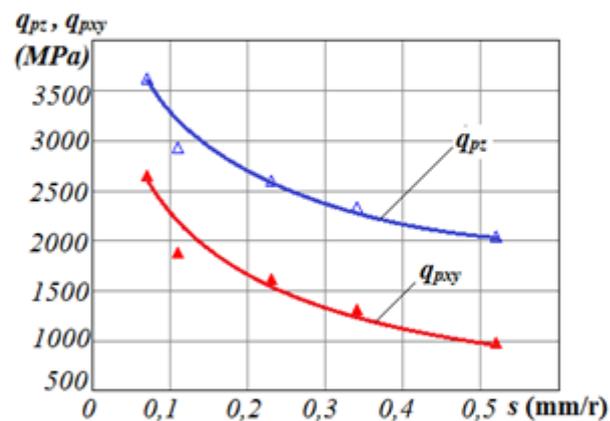


Рис. 5. Влияние длины фаски износа по задней поверхности h_3 на составляющую $P_{z\max}$ силы резания на фаске задней поверхности (на касательную силу на фаске задней поверхности F_h) при врезании на различных подачах. Сталь 40X - T15K6, $t=2$ мм, $v=120$ м/мин. а) $s=0,07$ мм/об; б) $s=0,11$ мм/об; в) $s=0,23$ мм/об; г) $s=0,34$ мм/об; д) $s=0,52$ мм/об

a) $h_f=0.13$ мм



б) $h_f=0.29$ мм



в) $h_f=0.95$ мм

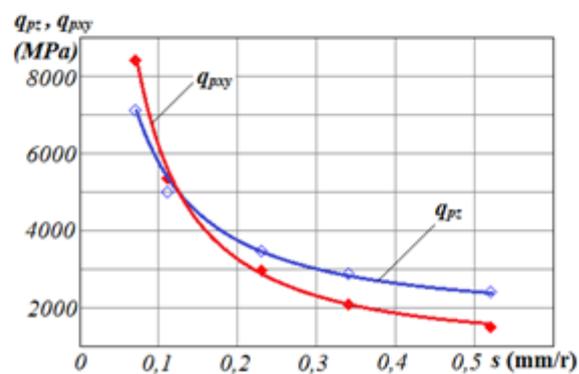


Рис. 5. Влияние длины фаски износа по задней поверхности h_f (мм) и подачи s (мм/об) на удельные силы резания. Сталь 40Х-Т15К6, $\varphi = 45^\circ$, $r = 0,05$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $t = 2$ мм.

Исследование изменения геометрии токарного резца при его износе при обработке стали

Износ режущего инструмента есть результат трения стружки о переднюю поверхность инструмента и его задней поверхности об обработанную поверхность. Это процесс, протекающий при высоких температурных и контактных нагрузках. По сравнению с износом деталей в машинах при резании удельные давления выше в 300...400 раз, а температура - в 15...20 раз. Кроме того, при резании износ происходит на очень малых площадках контакта, верхние слои которых могут испытывать пластические деформации.

Различают **четыре основных вида износа** режущих инструментов: 1) механический; 2) адгезионный; 3) диффузионный; 4) химический (окислительный).

Механический (абразивный) износ происходит в результате резания - трения твердых включений инструментального и обрабатываемого материалов (упрочненные частицы нароста, карбиды, нитриды, интерметаллиды* и др.) о переднюю и заднюю поверхности инструмента. Особенно много указанных включений находится в чугунах, а также в высоколегированных сталях и сплавах. Например, в алюминиевых сплавах этими частицами являются высокотвердые частицы кремния. Интерметаллические соединения – химические соединения металлов с металлами, например, $CuAl_2$, $MgZn_2$, Al_2CuMn . Входят в структуру большого числа промышленных металлических сплавов, обеспечивая им упрочнение

При черновой обработке отливок это могут быть остатки формовочного песка, заполняющие раковины отливок и действующие как абразивный материал.

В наибольшей степени **механический (абразивный) износ** проявляется при работе инструментов из быстрорежущих сталей и наблюдается в виде **царапин**, канавок и других микронеровностей на передней и задней поверхностях инструмента. В меньшей степени механический износ наблюдается

твердосплавных инструментах из более высокой твердости и износостойкости твердых сплавов.

Адгезионный износ является результатом действия сил адгезии, есть сил межмолекулярного взаимодействия ювенильных (новых, юных - химически чистых, очищенных от окислов)

свежеобразованных поверхностей

стружки и заготовки при их контакте с поверхностями инструмента в процессе совместного трения.

Диффузионный износ происходит в результате взаимного переноса (диффузии) атомов контактирующих инструментального и обрабатываемого материалов. Скорость диффузионных процессов зависит от подвижности атомов, которая, в свою очередь, определяется температурой резания. Диффузия становится заметной при температуре резания свыше 800...900°C, т.е. в области применения твердых сплавов и СТВ.

При резании твердосплавными инструментами материалов на основе железа наиболее быстро диффундирует углерод, имеющий наименьший радиус атомов, и значительно медленнее кобальт, вольфрам и титан. В результате поверхность твердого сплава обезуглероживается. При этом в твердый сплав проникает железо, ухудшающее его структуру, происходит охрупчивание и разупрочнение твердого сплава до такой степени, что отдельные участки этих слоев разрушаются и уносятся обрабатываемым материалом и стружкой.

При резании стали двухкарбидными сплавами группы ТК карбиды титана растворяются в стали медленнее, чем карбиды вольфрама. Аналогично железо быстрее диффундирует в карбид вольфрама, нежели в карбид титана. Поэтому **двухкарбидные сплавы в меньшей степени подвержены диффузионному износу**, чем однокарбидные.



Рис. 1. Зоны износа токарного резца

При обработке **чугунов** ($C > 2.14 \dots 4,3\%$) диффузия **углерода** из твердого сплава замедляется, **температура резания меньше**, чем при резании сталей; поэтому **однокарбидные** сплавы из-за повышенной **прочности** карбидов вольфрама **превосходят двухкарбидные** и по **износостойкости**. **Однокарбидные** твердые сплавы используют также при резании **цветных металлов** и сплавов, при обработке **титановых сплавов** (из-за химического сродства двухкарбидные сплавы дают худшие результаты).

Химический (окислительный) износ происходит за счет окисления при высоких температурах трущихся слоев благодаря высокой проникающей способности кислорода и ускоренного его соединения с ювенильными поверхностями стружки и инструмента. Образовавшиеся окисные пленки очень хрупки и поэтому легко разрушаются, оголяя нижеследующие слои, которые в свою очередь также окисляются и подвергаются разрушению. Окислительное изнашивание существенно увеличивается **при температуре** резания более **700°C**. У твердых сплавов наиболее быстро **окисляется кобальтовая связка**, при разрушении которой нарушается монолитность сплава, **ослабляется связь между зёрнами карбидов** титана и вольфрама. Окислительный износ можно существенно уменьшить за счет применения **инертных газов**: азота, аргона и гелия

Независимо от типа и назначения режущие инструменты изнашиваются прежде всего по **задним поверхностям**. Наиболее интенсивно изнашиваются участки задних поверхностей, прилегающих к режущей кромке, где контактные напряжения особенно высоки. В результате этого образуется площадка (**фаска**) износа $h_{зп}$ (h_f) с **нулевым** ($\alpha\phi = 0^\circ$) ($\alpha h = 0^\circ$), а в отдельных случаях и с небольшим **отрицательным задним углом $\alpha\phi$** . При несвободном резании ширина (**длина**) фаски износа $h_{зп}$ вдоль длины режущих кромок неравномерна. Она несколько **увеличена на вершине резца** (точка *A*), где высокая температура и условия трения наиболее неблагоприятны. Иногда на **краю площадки** (точка *B*) наблюдается **локальный износ** в виде узкой проточкины, из-за упрочненного поверхностного слоя заготовки.

Износ по **передней поверхности** протекает с **образованием лунки** шириной c_l , длиной b_l и глубиной. Здесь точка *O* наибольшей глубины лунки примерно соответствует **максимуму температуры** резания на площадке контакта стружки с передней поверхностью. Передний край лунки отстоит на небольшом расстоянии f от режущей кромки. Лунка располагается параллельно режущей кромке, несколько не доходя до вспомогательной режущей кромки.

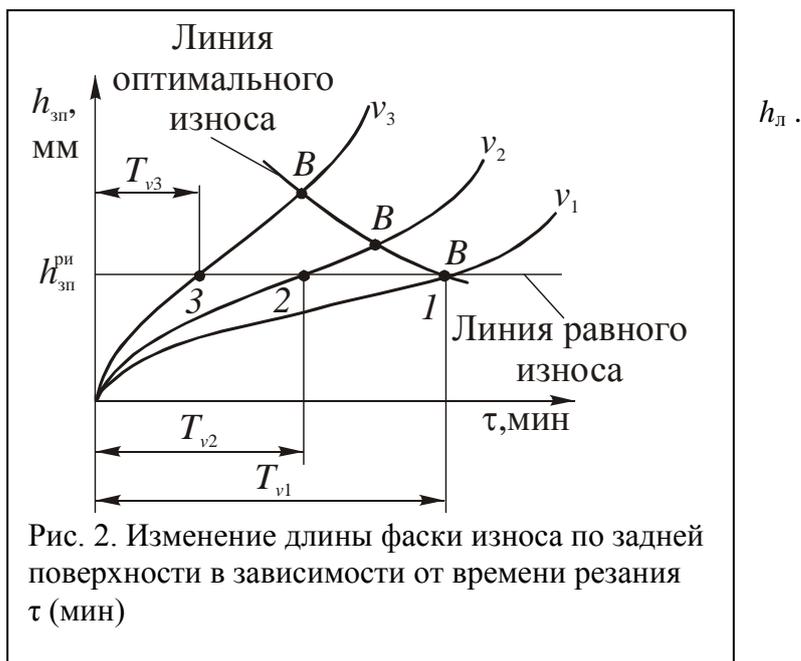
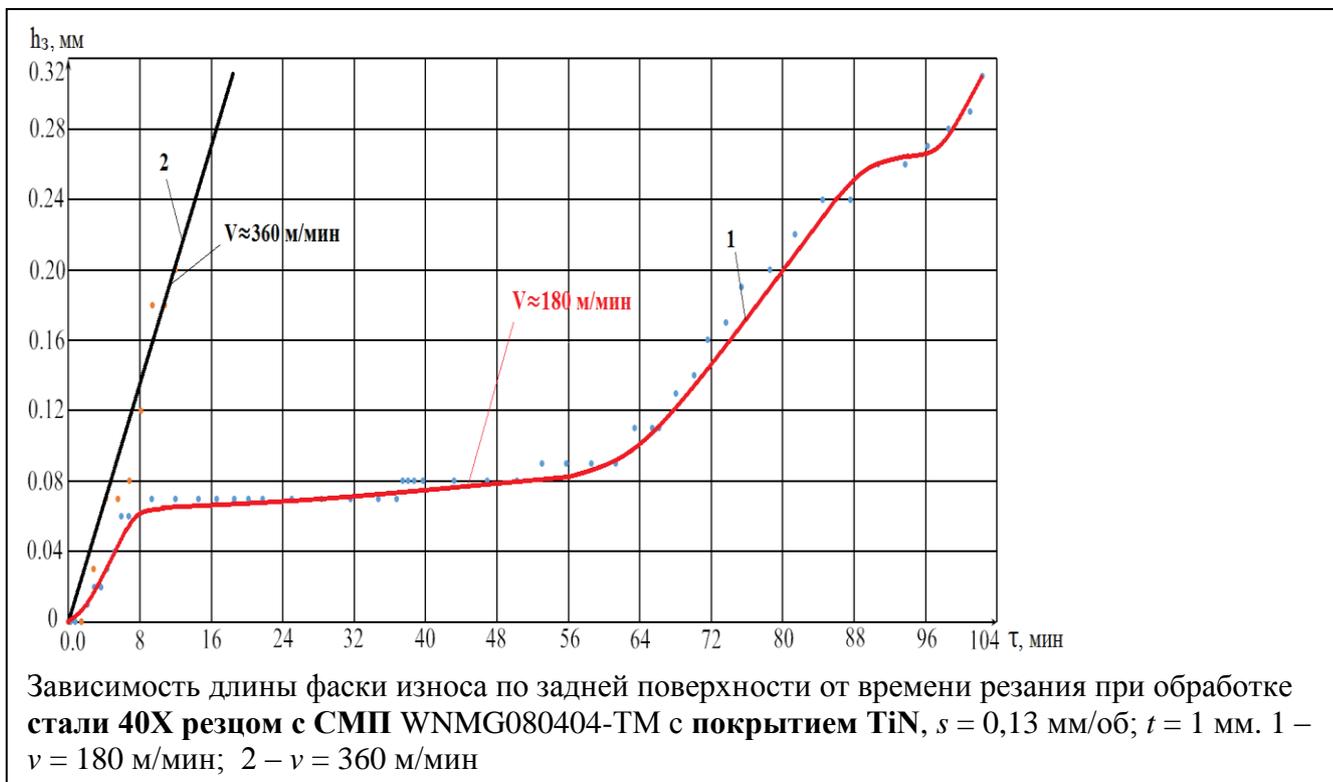


Рис. 2. Изменение длины фаски износа по задней поверхности в зависимости от времени резания τ (мин)

При построении кривых износа по задней поверхности для разных скоростей резания $v_3 > v_2 > v_1$ видно, что с ростом скорости резания кривые становятся круче и происходит смещение точки *B* в сторону больших допустимых значений $h_{зп}$, т.е. в этом случае за оптимальный износ, строго говоря, следовало бы принимать для каждой скорости свое значение $h_{зп}$. Однако на практике с целью упрощения износ по задней поверхности $h_{зп}^{рн}$ принимают одинаковым (равновеликим) для всего семейства кривых износа и называют его **критерием равного износа**. В ряде случаев, например на автоматических линиях или на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) целесообразно применять более производительный и более экономичный **критерий оптимального износа**, о котором будет сказано далее. Численные значения критериев

затупления определяют экспериментально. Они зависят от многих условий резания и, главным образом, от сочетания свойств режущего и обрабатываемого материалов.

При **несвободном течении твердым сплавом сталей и чугунов** наибольшая величина фаски износа измеряется у **вершины реза** в главной секущей плоскости, т.е. в месте с наихудшими условиями теплоотвода. При этом допустимое максимальное значение фаски износа составляет: при **обработке стали** $h_{зп}=0,8...1,0$ мм, а при обработке чугуна с подачей $s \leq 0,3$ мм/об – $h_{зп}=1,4...1,7$ мм и с подачей $s > 0,3$ мм/об – $h_{зп}=0,8...1,0$ мм.



Момент затупления режущего инструмента иногда определяют и по **технологическим** критериям: а) **увеличение шероховатости** обработанной поверхности, вызванное износом инструмента; б) **потеря размера детали** при чистовой обработке; в) **появление «свиста»**; г) **появление вибраций**; д) **изменение цвета стружки**; е) изменение характерных особенностей стружки и т.п. Обычно **величина износа инструмента при использовании этих критериев ниже принятого при определении стойкости**, обеспечивающей **максимальное время работы** инструмента.

Наибольшее влияние на износ инструментов оказывает **температурно-скоростной фактор**. Поэтому уже в первых работах по совершенствованию режущих инструментов *F.W. Taylor* (Ф.У. Тейлор) предложил **оценивать их работоспособность** путем нахождения зависимости «стойкость-скорость» ($T-v$).

Исследование стойкости СМП при обработке стальной заготовки

Время непрерывной работы инструмента до его замены или переточки называется **стойкостью** инструмента T . Момент наступления этой замены определяется **критерием износа**.

Под **критерием износа** понимается наступления явления, после которого резание нецелесообразно и режущий инструмент требуется сменить или переточить. В качестве критериев могут быть использованы следующие параметры:

1. Существенное ухудшение качества обработанной поверхности (увеличение шероховатости, появление рисок или надрывов и т.п.);
2. Появление свиста или вибрации во время резания;
3. Увеличение силы резания, особенно радиальной составляющей P_y , что приводит к увеличению упругой деформации системы СПИД и уменьшению точности обработки;
4. Изменение цвета стружки (например, появление синей стружки при обработке быстрорежущим инструментом недопустимо, т.к. этот цвет свидетельствует о температуре более 620°C , после которой наступает отпуск и твёрдость инструментального материала резко уменьшается, делая дальнейшее резание невозможным);

5. Появление конусности вместо цилиндрической формы, что свидетельствует об увеличении интенсивности размерного износа h_p (см. рис. 1);
6. Увеличение ширины фаски износа по задней поверхности до предельно допустимой величины. Например, при черновом точении (по 14...11 качеству) конструкционной незакалённой стали твёрдосплавным резцом $h_{3\max} = h_{f\max} = 0,75$ мм, при полувальцовом точении (по 10...9 качеству) – $h_{3\max} = h_{f\max} = 0,2$ мм (рис. 2).

Могут быть и другие критерии износа, например, ухудшение завивания стружки, появление местного износа на главной задней поверхности в месте контакта с загрязнённой твёрдыми окислами и окалиной обрабатываемой поверхностью (ус), износ вершины инструмента (при сверлении и фрезеровании это износ по уголкам) и т.п.

Чаще всего в качестве наиболее объективного критерия износа принимается предельно допустимый износ по задней поверхности ($h_{3\max}$), тем более, что все остальные параметры вызваны увеличением h_3 .

Виды износа режущего инструмента по его природе (причине появления) классифицируются следующим образом:

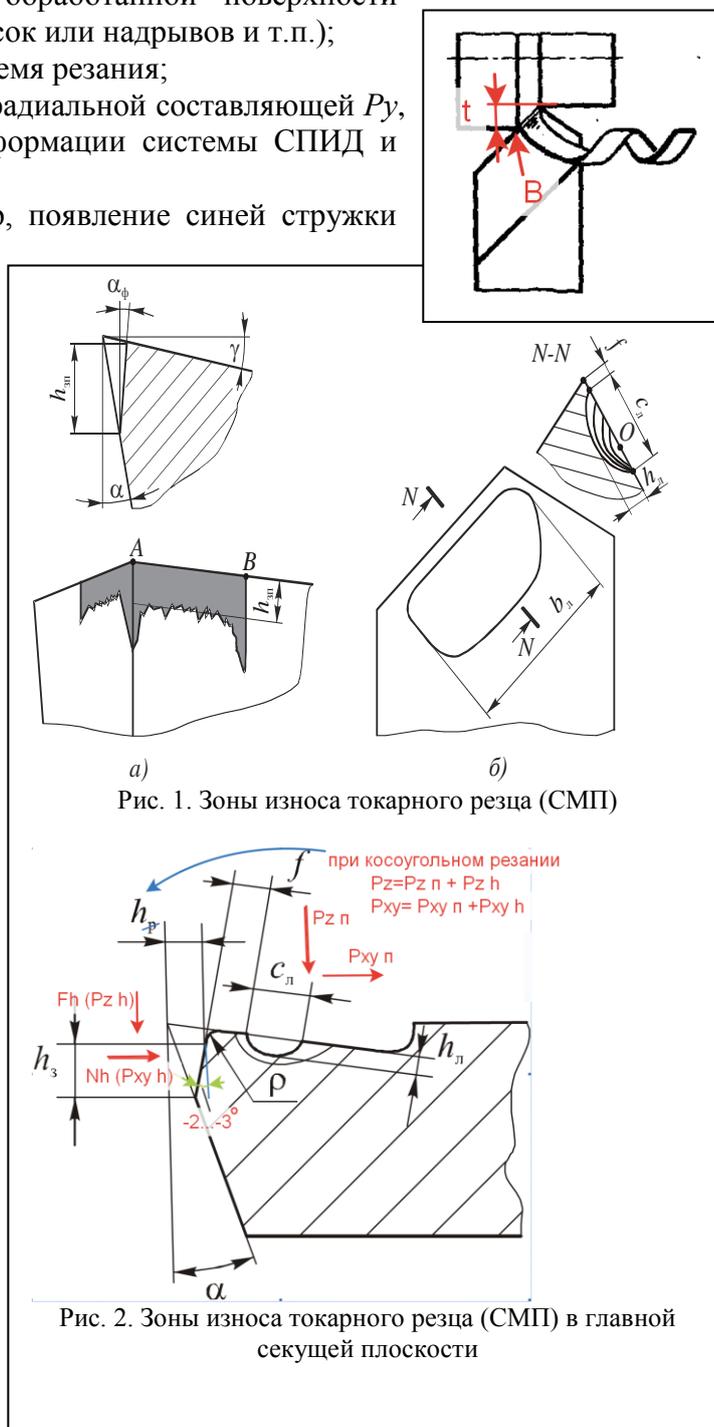


Рис. 1. Зоны износа токарного резца (СМП)

Рис. 2. Зоны износа токарного резца (СМП) в главной секущей плоскости

1. Абразивный износ.
2. Адгезионно-усталостный.
3. Химический (окислительный).
4. Диффузионный.

Для построения стойкостных зависимостей производится обработка заготовки из выбранного обрабатываемого материала с постоянной подачей, глубиной и скоростью резания. Инструментальный материал, геометрия инструмента, глубина резания и подача выбираются оптимальными для исследуемого вида обработки (например, получистового точения) и обрабатываемого материала.

Выбирается критерий износа (предельно допустимый параметр при износе). Чаще всего выбирается ширина износа по задней поверхности h_3 . Например, при получистовом точении незакалённой стали $h_{3\text{ макс}}=0,25$ мм. Если износ будет больше, то увеличится радиальная составляющая силы резания P_y и из-за повышенной упругой деформации системы СПИД требуемой точности обработки достигнуть не удастся.

Наибольшее влияние на допустимую скорость резания оказывают свойства **обрабатываемого материала**. Например, при резании **закалённой стали** или высокопрочного чугуна скорость резания в **200 раз меньше**, чем при **обработке алюминия**. Далее по убывающей следует **влияние инструментального материала**, при изменении которого скорость резания может изменяться до **75 раз**, а при изменении геометрии инструмента, глубины и ширины среза – до **3...5 раз**.

При стойкостных испытаниях используется оптимальная геометрия режущего инструмента. С **увеличением переднего угла γ** снижаются степень деформации, силы резания и трения, **уменьшается тепловыделение**, что способствует **повышению стойкости инструмента**.

Однако **увеличение угла γ** приводит к **уменьшению угла**

заострения и поэтому **ухудшает отвод теплоты** от режущей кромки и **снижает прочность** режущего клина. Влияние переднего угла на стойкость T представляет собой горбообразную кривую, максимуму которой соответствует **оптимальное значение переднего угла**. Для **быстрорежущих** резцов при точении **стали 45 $\gamma_{\text{опт}}=18^\circ$** , а **чугуна - $\gamma_{\text{опт}}=0...5^\circ$** . Для **твёрдых сплавов $\gamma_{\text{опт}}=+10...-10^\circ$** , для минералокерамики, эльбора и алмазы **$\gamma_{\text{опт}}=0...-15^\circ$** .

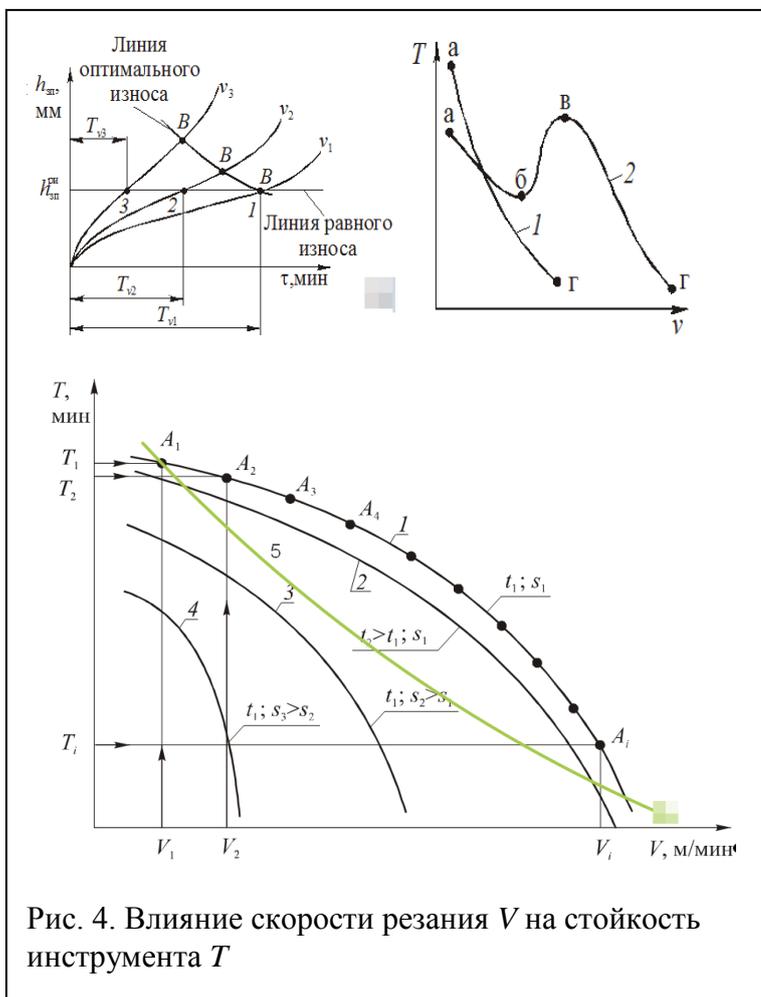


Рис. 4. Влияние скорости резания V на стойкость инструмента T

Задний угол α обеспечивает зазор между заготовкой и задней поверхностью режущего клина и, тем самым, способствует снижению интенсивности износа инструмента и повышению его стойкости. Угол α также как и угол γ влияет на **прочность** режущего клина через изменение угла заострения β , а также на условия отвода теплоты от вершины инструмента и поэтому зависимость $T-v$ также принимает экстремальный характер. При этом, чем **меньше подача** s , тем **больше оптимальный угол** $\alpha_{\text{опт}}$. При снижении прочности обрабатываемого материала и повышении прочности и износостойкости инструментального материала угол $\alpha_{\text{опт}}$ увеличивают.

У проходных резцов $\alpha_{\text{опт}}=6...8^\circ$, у отрезных и фасонных резцов, работающих с меньшей подачей, $\alpha_{\text{опт}}=10...12^\circ$, а у дисковых фрез, работающих с подачей $0,01$ мм/зуб - $\alpha_{\text{опт}}=30^\circ$.

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}}$$

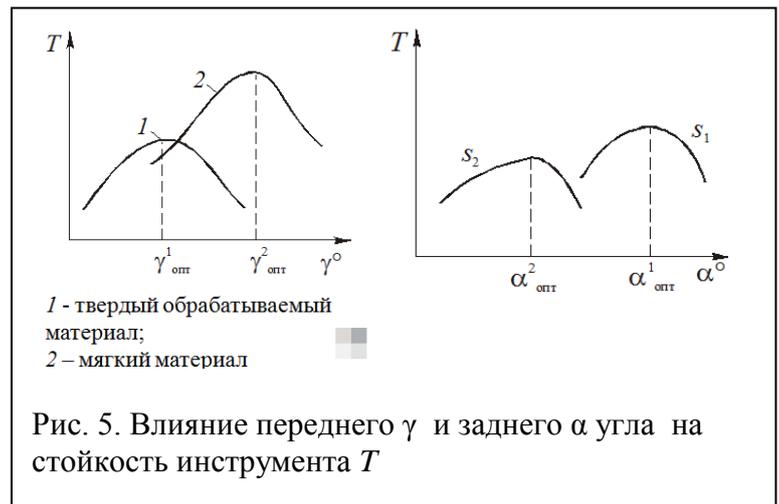


Рис. 5. Влияние переднего γ и заднего α угла на стойкость инструмента T

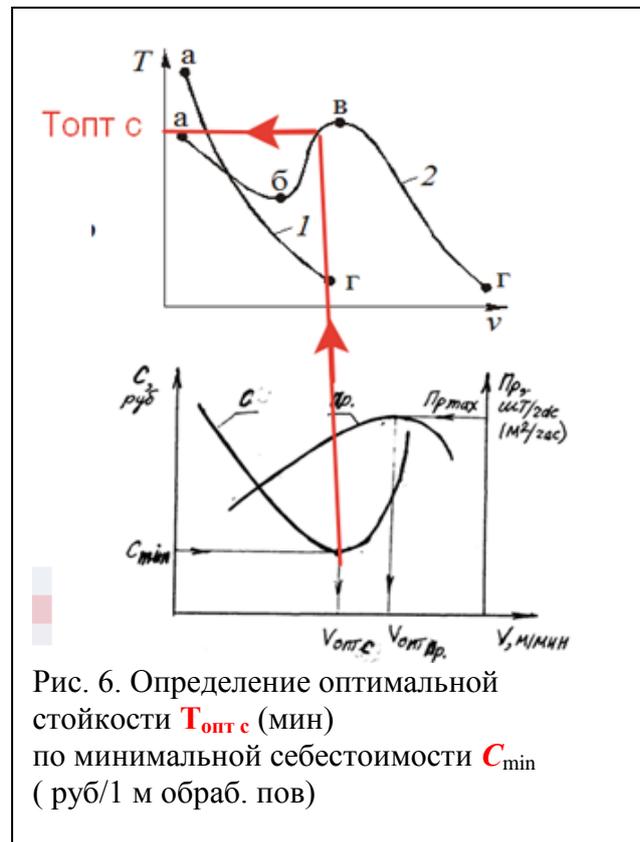
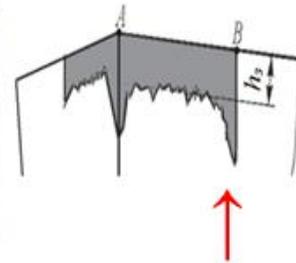
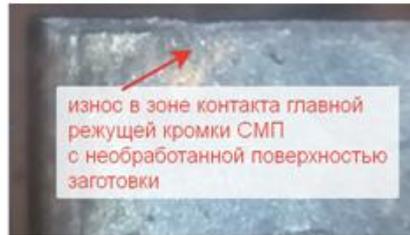


Рис. 6. Определение оптимальной стойкости $T_{\text{опт с}}$ (мин) по минимальной себестоимости C_{min} (руб/1 м обраб. пов)

Исследование влияния вида износостойкого покрытия на стойкость СМП



Износ h_3 по задней поверхности и **локальный износ**

Рис. 21. Типы стружки: а) полукольца; б) нормальная; в) допустимая форма; г) недопустимая форма

Рис. 20. СМП-WNMG080404 с покрытием TiN с износом на **нерабочей кромке** ($v = 360$ м/мин)

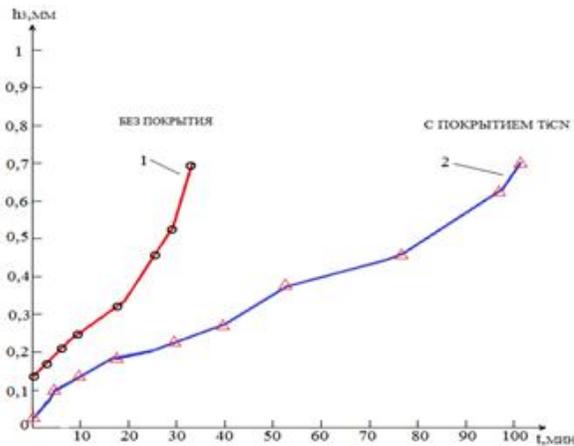


Рис. 22. Изменение h_3 [мм] от времени t [мин] течения стали 40X. $v = 300$ м/мин; $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм. 1 – T15K6 без покрытия; 2 – T15K6 с покрытием $TiCN$

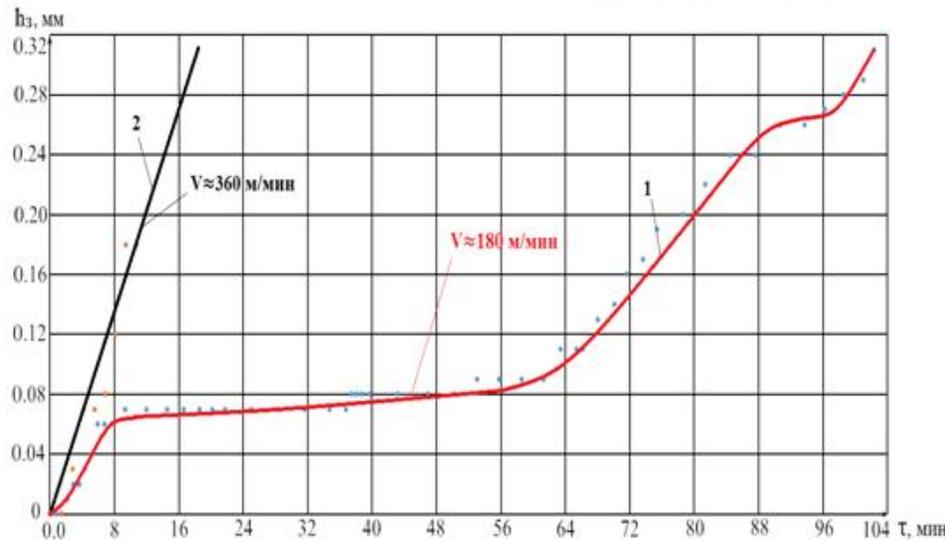
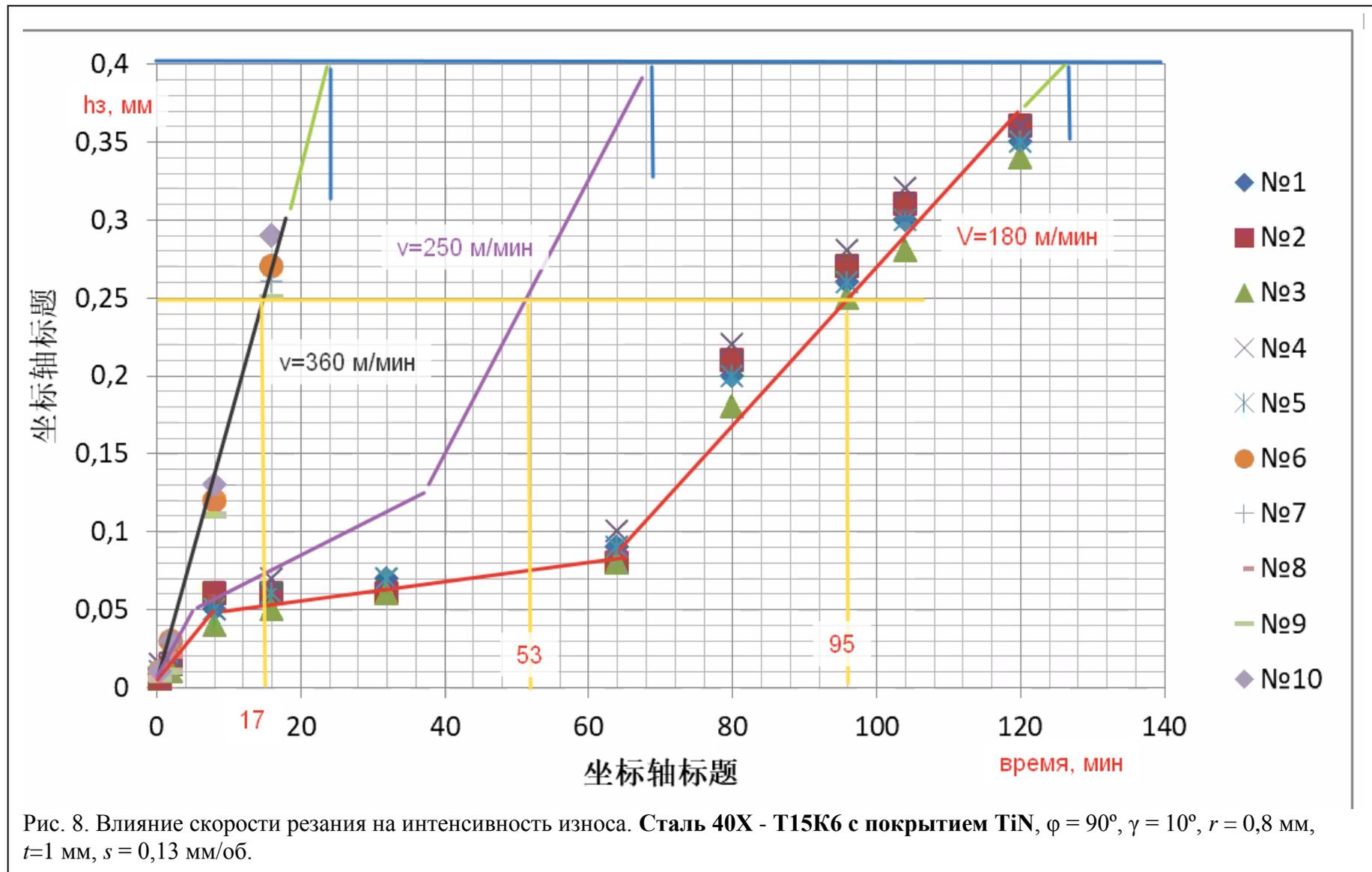


Рис. 23. Зависимость длины фаски износа по задней поверхности от времени резания при обработке стали 40X - WNMG080404-ТМ с покрытием TiN , $s = 0,13$ мм/об; $t = 1$ мм. 1 – $v = 180$ м/мин; 2 – $v = 360$ м/мин

Рис. 7. Графики изменения длины фаски износа по задней поверхности h_3 (мм) СМП в зависимости от времени его непрерывной работы τ (мин)



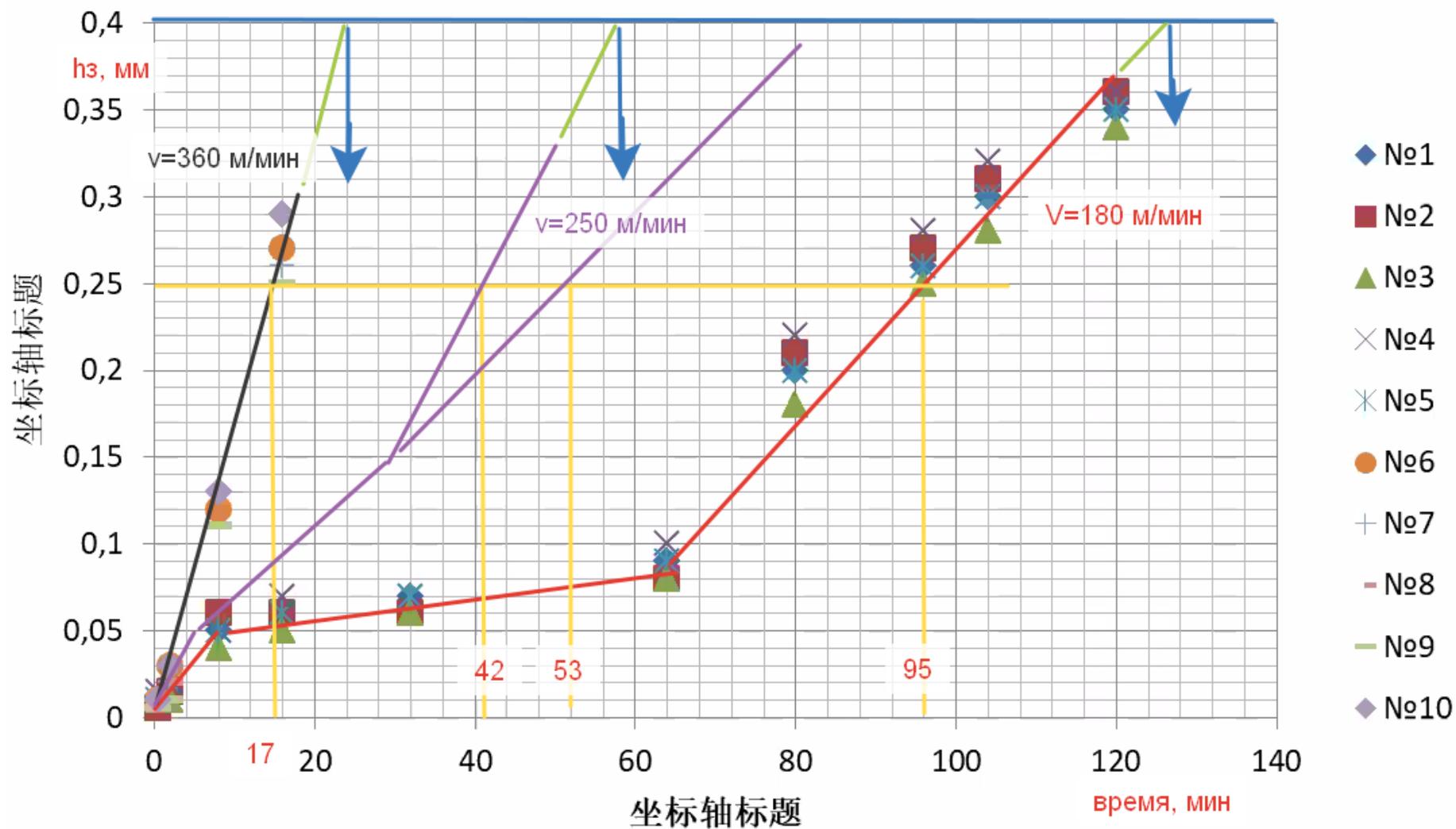
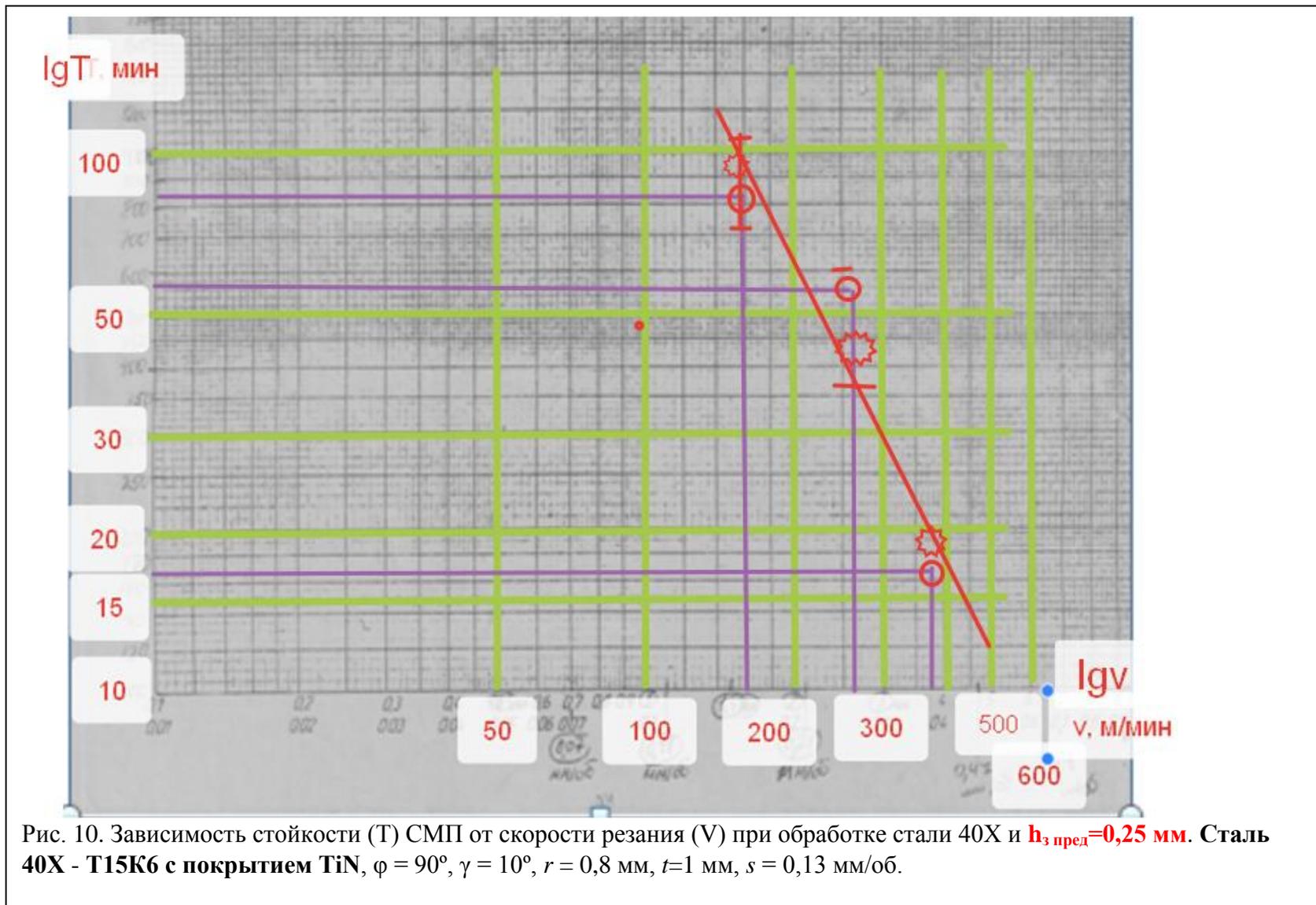


Рис. 9. Зависимость изменения длины фаски h_z от времени резания при обработке стали 40X. Сталь 40X - T15K6 с покрытием TiN, $\varphi = 90^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $r = 0,8$ мм, $t = 1$ мм, $s = 0,13$ мм/об.

$V = 500$ м/мин $\rightarrow T \approx 12$ мин. $n = (1000 \times V) / (\pi d) = (1000 \times 500) / (\pi \times 70) = 2274$ об/мин, 1600 м/мин – перегрев заднего центра



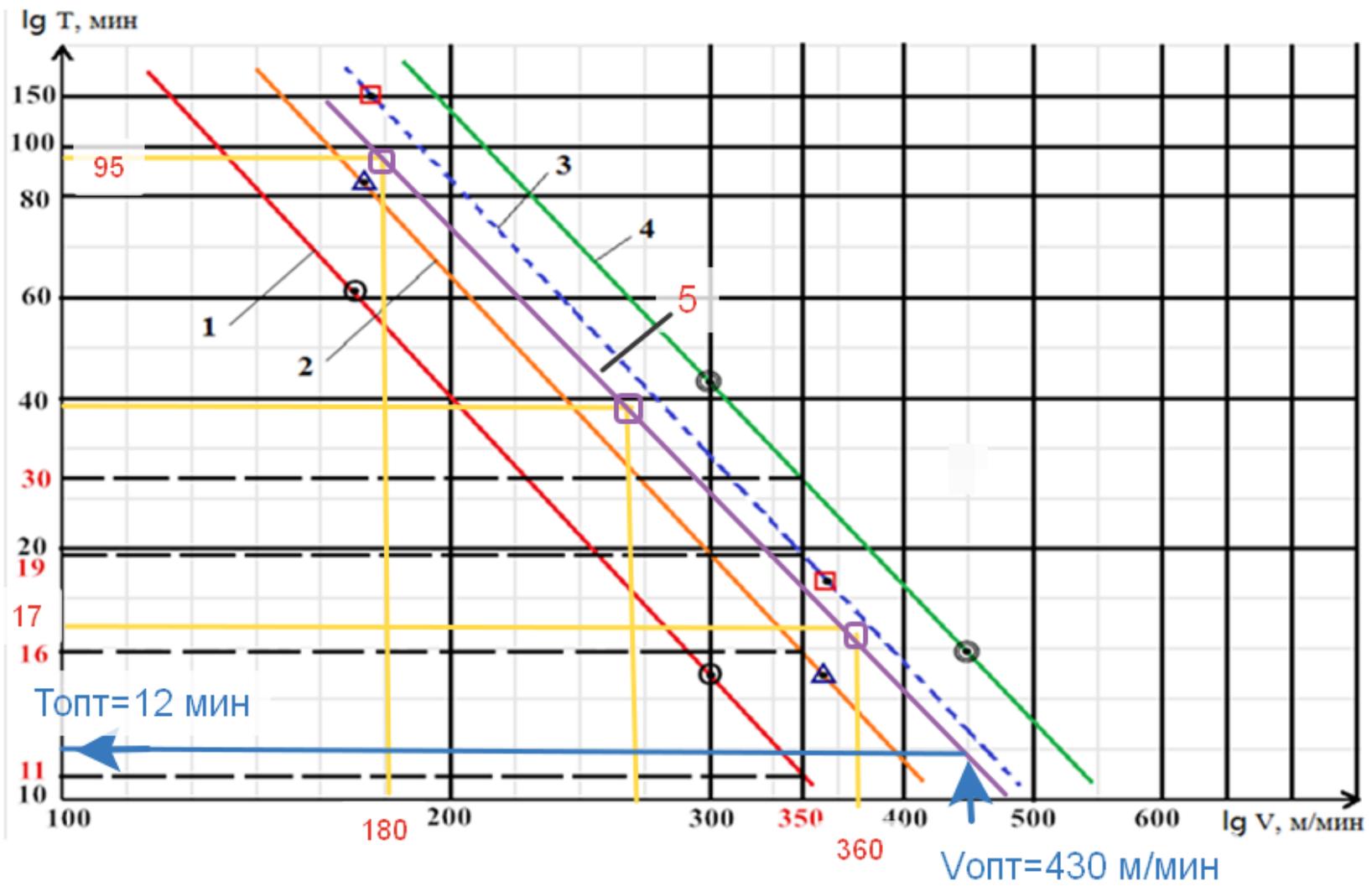


Рис. 11. Зависимость стойкости (Т) СМП с износостойкими покрытиями (1, 2, 3, 4) от скорости резания (V) при обработке стали 40X и $h_3=0,2$ мм: 1- без покрытия, 2, 5 - с покрытием TiN, 3- с покрытием AlTiN, 4- с покрытием TiCN

Таблица 1. Сравнение эффективности применения покрытий

Тип пластин (3 вершины)	Цена (С), руб/шт (Стоимость)	Стойкость Т, мин	$L_{обр}, м$ ($T \times 350$)	$S_{обр}, м^2$	Цена обработки 1 м ($C_{уд}$), (удельная себестоимость) руб/м
1. СМП без покрытия	100 (3 вершины)	11	3 850	0,50	0,026 /3
2. СМП с покрытием TiN	120 (3 вершины)	16	5 600	0,73	0,021 /3
3. СМП с покрытием AlTiN	150 (3 вершины)	19	6 650	0,86	0,023 /3
4. СМП с покрытием TiCN	200 (3 вершины)	30	10 500	1,37	0,019 /3 (кол-во вершин) Цеховая себестоимость 1,5 руб /1 м

$L_{обработки} = T \times v = T \times 350$; $C_{уд} = \text{Стоимость} / L_{обработки}$.

Таблица 2. Изменение длины фаски износа по задней поверхности h_3 (мм) в зависимости от времени точения τ (мин)

Время точения τ , мин		0,5	2	8	16	32	64	80	96	104	120
СМП, $v=180$ м/мин	Вершина №1	0,01	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,26	0,30	0,35
	Вершина №2	0,005	0,015	0,06	0,06	0,06	0,08	0,21	0,27	0,31	0,36
	Вершина №3	0,01	0,01	0,04	0,05	0,06	0,08	0,18	0,25	0,28	0,34
	Вершина №4	0,015	0,021	0,05	0,07	0,07	0,10	0,22	0,28	0,32	0,36
	Вершина №5	0,01	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,26	0,30	0,35
СМП, $v=360$ м/мин	Вершина №1	0,01	0,03	0,12	0,27	----					
	Вершина №2	0,01	0,02	0,13	0,26						
	Вершина №3	0,01	0,02	0,11	0,25						
	Вершина №4	0,005	0,01	0,11	0,25						
	Вершина №5	0,01	0,03	0,13	0,29						

ЗАДАНИЕ по лаб. работе № 8:

По экспериментальным данным в табл. 1 построить график изменения h_3 от времени обработки τ , задаться критерием стойкости и построить стойкостные зависимости поданным для 2-х скоростях резания: 180 и 360 м/мин.

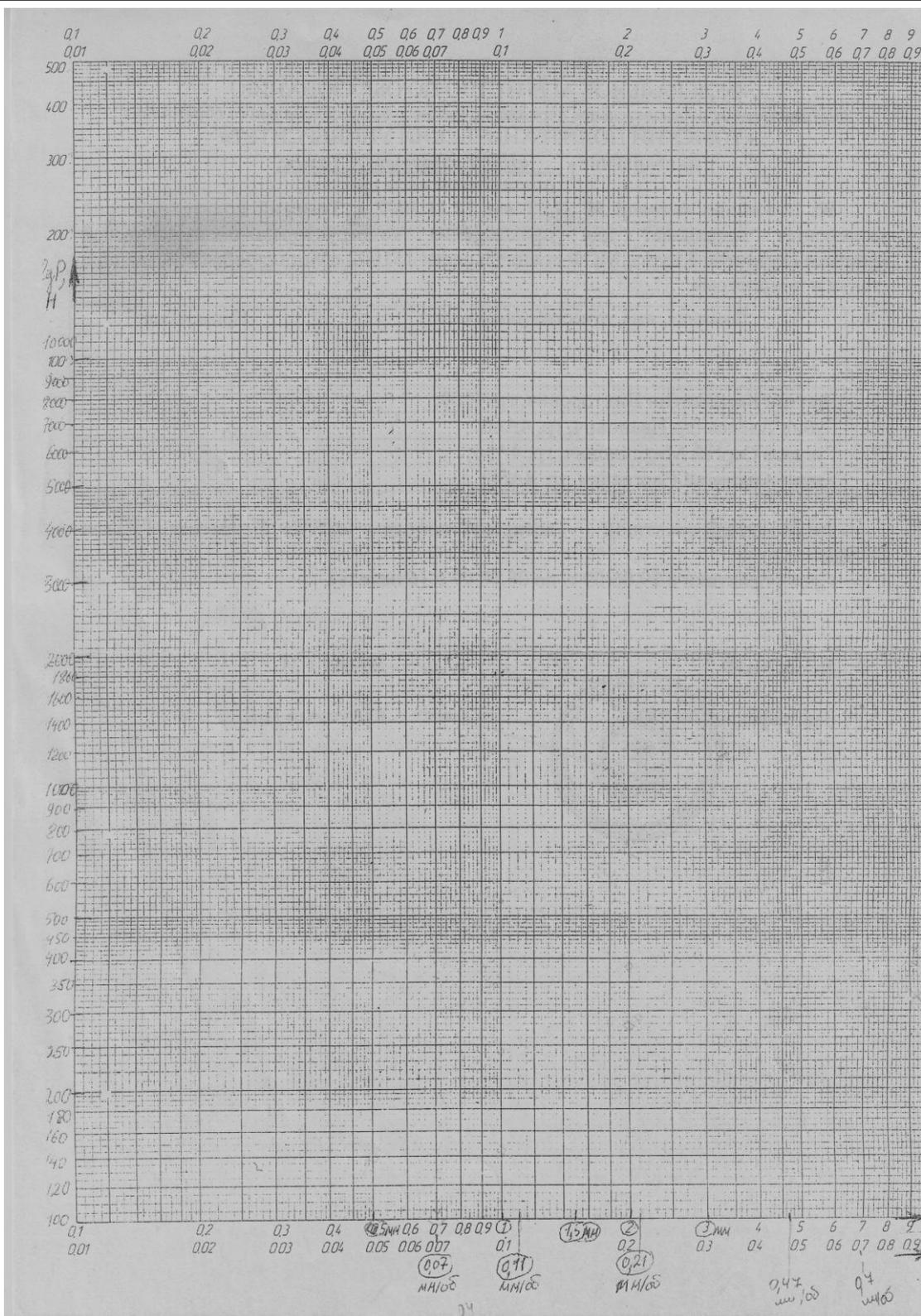


Рис. 12. Логарифмическая бумага

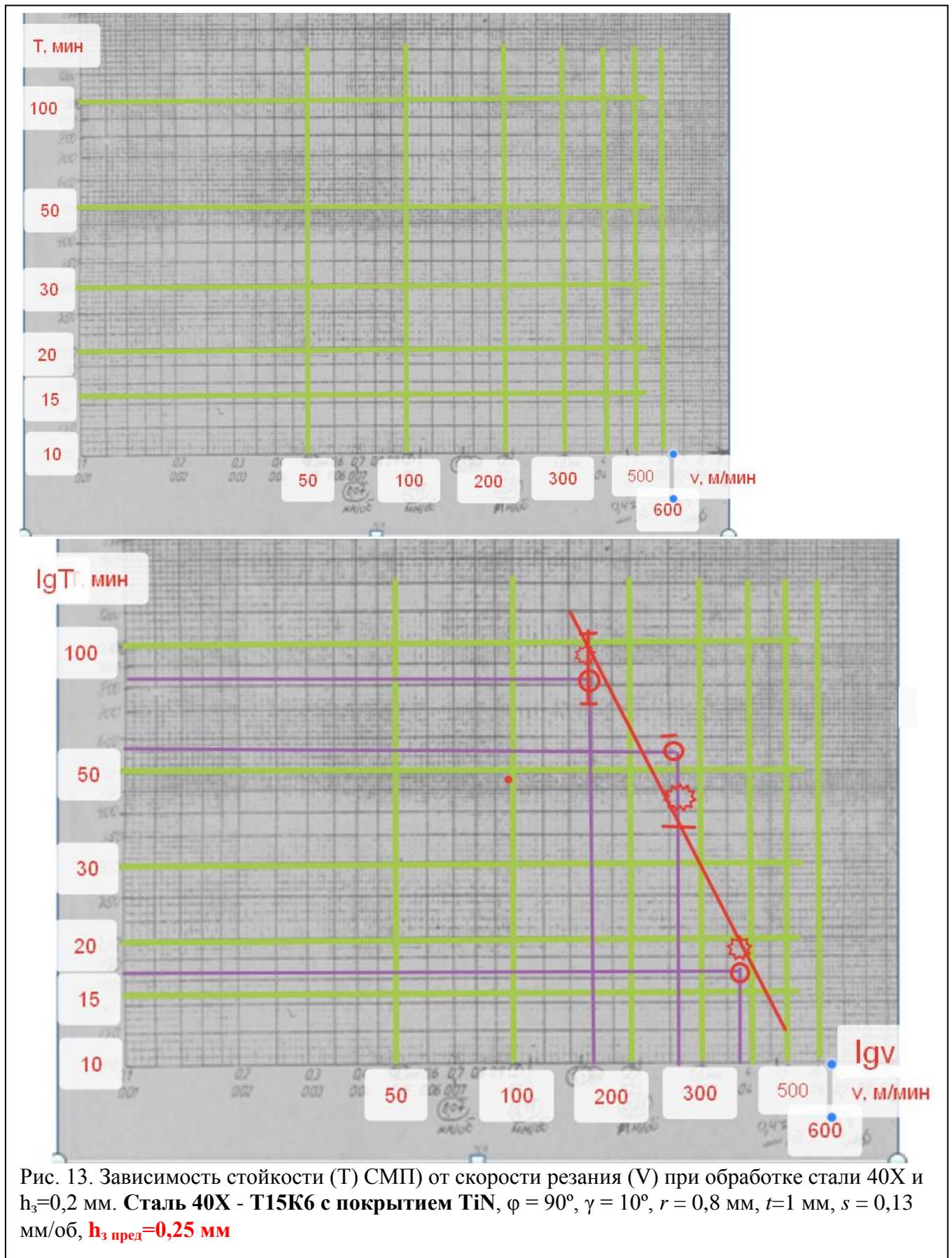


Рис. 13. Зависимость стойкости (Т) СМП от скорости резания (V) при обработке стали 40X и $h_3=0,2$ мм. Сталь 40X - T15K6 с покрытием TiN, $\varphi = 90^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $r = 0,8$ мм, $t=1$ мм, $s = 0,13$ мм/об, $h_{з\text{ пред}}=0,25$ мм

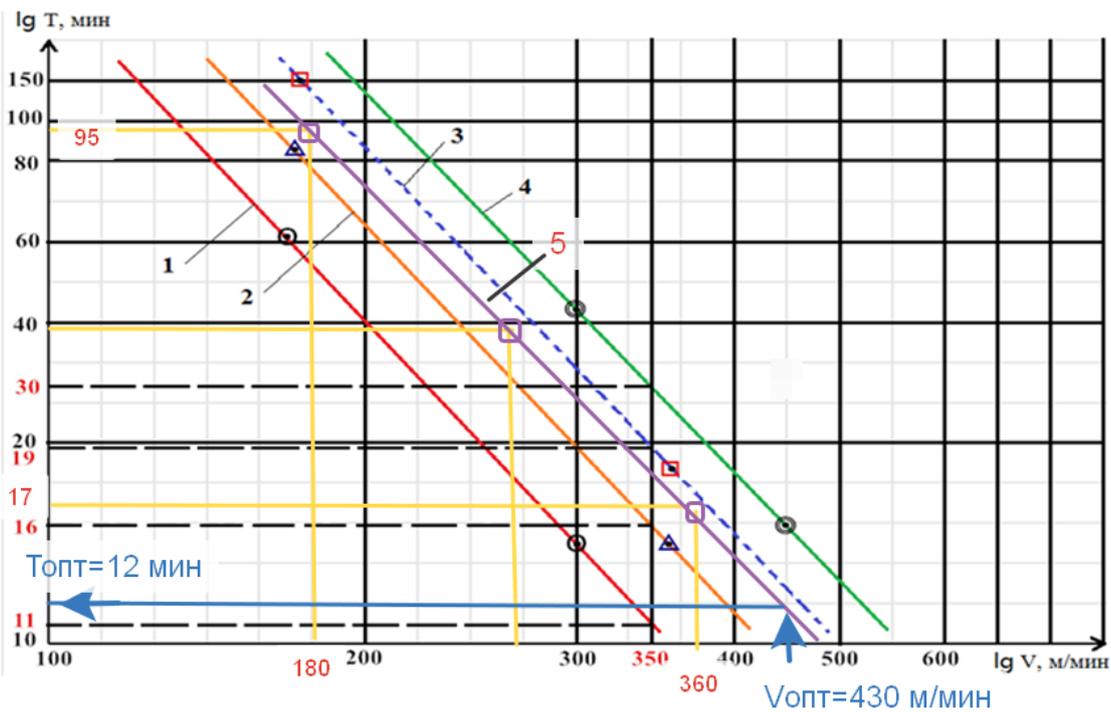


Рис. 14. Зависимость стойкости (Т) СМП с износостойкими покрытиями (1, 2, 3, 4) от скорости резания (V) при обработке стали 40X и $h_3=0,2$ мм: 1- без покрытия, 2, 5 - с покрытием TiN, 3- с покрытием AlTiN, 4- с покрытием TiCN

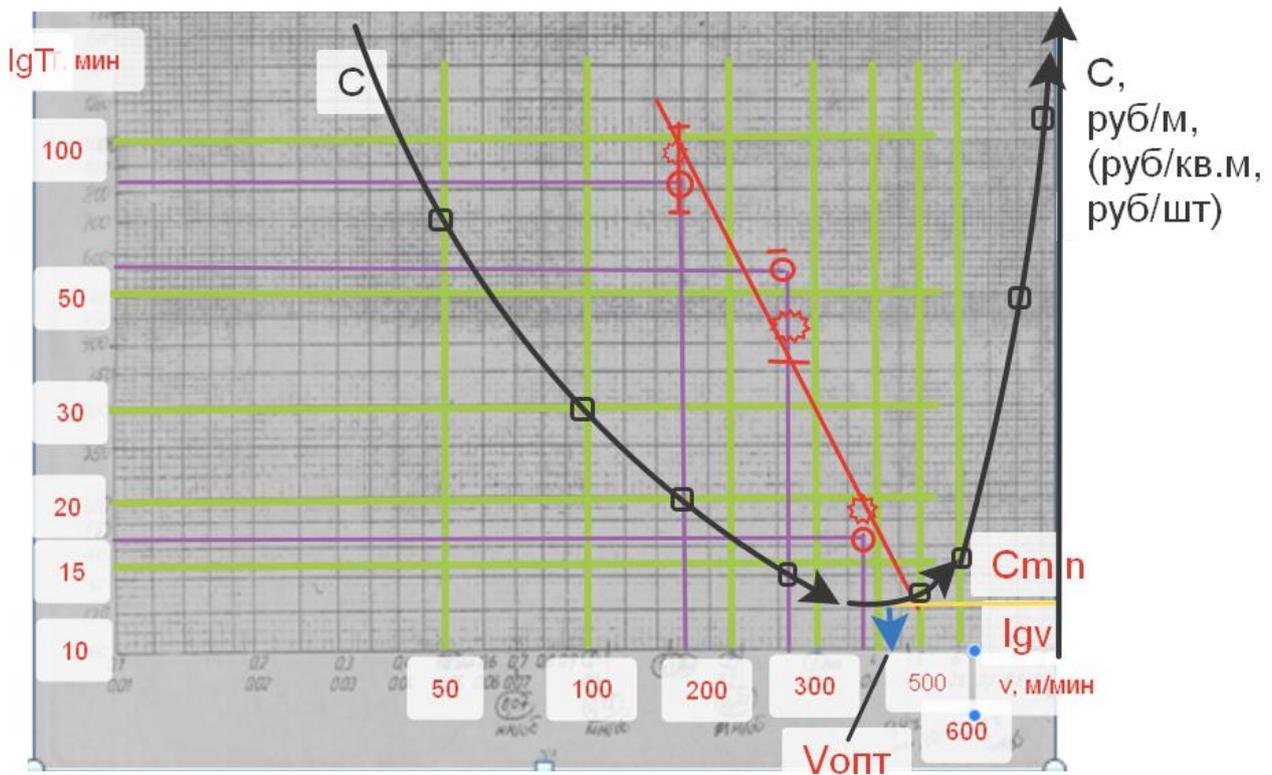


Рис. 15. Зависимость **стойкости (Т)** и **себестоимости (С)** СМП с износостойким покрытием от скорости резания (V) при обработке стали 40X и $h_{з\text{ пред}}=0,2$ мм. **Сталь 40X - Т15К6 с покрытием TiN**, $\varphi = 90^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $r = 0,8$ мм, $t=1$ мм, $s = 0,13$ мм/об.

Таблица 3. Цеховая себестоимость 1 погонного метра обработки

Скорость резания v , м/мин	50	100	200	300	500	600	700	900
Цеховая себестоимость 1 погонного метра обработки C , руб/м	7	3	2	1,5	14	15	50	100
	700	300	200	150	140	150	500	1000

Таблица 4. Изменение длины фаски износа по задней поверхности h_3 (мм) силы резания P_y (P_z) и других параметров в зависимости от времени точения τ (мин)

Время точения τ , мин		0,5	2	8	16	32	64	80	96	104	120
СМП, $v=180$ м/мин	Вершина №1	0,01	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,26	0,30	0,35
	Сила P_y (P_z), Н										
	Вершина №2	0,005	0,015	0,06	0,06	0,06	0,08	0,21	0,27	0,31	0,36
	Сила P_y (P_z), Н										
	Вершина №3	0,01	0,01	0,04	0,05	0,06	0,08	0,18	0,25	0,28	0,34
	Сила P_y (P_z), Н										
	Вершина №4	0,015	0,021	0,05	0,07	0,07	0,10	0,22	0,28	0,32	0,36
	Сила P_y (P_z), Н										
	Вершина №5	0,01	0,02	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,26	0,30	0,35
	Сила P_y (P_z), Н										
	$\Delta d_{дет}$, мм										
СМП, $v=360$ м/мин	Вершина №1	0,01	0,03	0,12	0,27	----					
	Вершина №2	0,01	0,02	0,13	0,26						
	Вершина №3	0,01	0,02	0,11	0,25						
	Вершина №4	0,005	0,01	0,11	0,25						
	Вершина №5	0,01	0,03	0,13	0,29						

Лабораторная работа № 8.
**Исследование изменения составляющих силы резания
при концевом фрезеровании стальной заготовки**

Лабораторная работа № 9.
**Исследование изменения составляющих силы резания
при торцовом фрезеровании стальной заготовки**

Лабораторная работа № 10.
Исследование качества обработанной поверхности при круглом шлифовании