

А. Д. МАКАРОВ

ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Москва 1966

В книге рассматривается комплекс вопросов, связанных с размерным износом режущих инструментов при обработке жаропрочных и высоколегированных материалов, применяемых во многих отраслях машиностроения. Анализируются существующие и излагаются новые методы определения характеристик обрабатываемости и оптимальных режимов резания с учетом размерной стойкости инструмента и точности обработки и приводятся соответствующие номограммы.

Даны рекомендации по повышению размерной стойкости инструмента, производительности и экономичности обработки.

Книга представляет интерес для инженеров-технологов механических цехов и научных работников, проводящих исследования в области обработки металлов резанием. Она может быть также полезна преподавателям и студентам технологических специальностей машиностроительных вузов.

Рецензент инж. Н. П. Чернов

Редактор инж. М. А. Колосов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность автоматизации технологических процессов в машиностроении в значительной мере определяется стабильностью параметров точности, получаемых при обработке деталей.

Одна из главных причин снижения точности обработки на металлорежущих станках — изменение размеров режущего инструмента вследствие его износа. Из-за низкой размерной стойкости инструмента операции окончательной обработки поверхностей с точными размерами иногда приходится исключать из автоматических линий. Особенно актуальна задача изучения и повышения размерной стойкости инструмента для обработки жаропрочных и других труднообрабатываемых материалов, скорости резания которых в ряде случаев в 50—100 раз меньше, чем для обычных конструкционных сталей.

Существующие нормативы по режимам резания установлены вне зависимости от размерной стойкости инструмента, поэтому пользование ими иногда приводит к повышенному расходу инструмента и снижению точности и производительности обработки.

Применяемые в настоящее время методы определения обрабатываемости металлов резанием и принципы разработки рациональных режимов резания не могут дать нормативов, которые в полной мере отвечали бы требованиям автоматизированного производства. Кроме того, они весьма трудоемки и требуют значительного расхода обрабатываемого материала. В то же время большие резервы повышения размерной стойкости инструментов, заключающиеся в оптимальном сочетании подач и скоростей резания, почти не используются.

В настоящей работе рассматривается комплекс вопросов, связанных с оптимальным ведением процессов обработки жаропрочных и высоколегированных материалов, применяемых в авиационном производстве и других отраслях машиностроения. На основе анализа существующих характеристик обрабатываемости металлов предлагаются новые характеристики и методы их определения, а также новые методы установления рациональных режимов реза-

ния с учетом размерной стойкости инструмента и точности обработки.

В книге вводится ряд новых понятий — поверхностный относительный износ инструмента, скорость размерного износа, оптимальные скорость и температура резания и др. и доказывается, что оптимальный поверхностный относительный износ может выступать как в качестве объективного показателя обрабатываемости, так и в качестве универсальной характеристики размерной стойкости инструмента.

Приводимые в работе аналитические зависимости и номограммы могут служить основой для подбора оптимальных режимов резания ряда жаропрочных материалов и автоматизации технологических процессов механической обработки. В книге дается также описание разработанного автором метода повышения размерной стойкости инструментов (проходных и расточных резцов, торцовых фрез) и приборов для измерения их радиального износа.

Экспериментальные работы проводились на кафедре резания металлов и инструментов авиационного института им. Орджоникидзе. В этих исследованиях участвовали инженеры А. Н. Кустов, Л. Ш. Шустер, Л. Н. Волгарев, В. В. Кривошеев, Р. А. Танатаров, а также студенты-дипломники института К. И. Саяпин, Р. Х. Хамматов, В. В. Зайнуллин, М. С. Зайнуллина, Р. К. Нигматуллин, Ю. М. Кичко, В. Д. Швецов. Указанным товарищам автор выражает глубокую признательность.

Все пожелания и замечания по книге следует направлять в издательство «Машиностроение» (Москва, К-51, Петровка, 24).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A — сумма переменных элементов себестоимости операции, зависящих от скорости резания, в коп;
- $A_{2,5}$ — сопротивление сдвига при относительной деформации сдвига, равной 2,5, в н/мм²;
- $a_{\text{раб}}$ — минутная заработная плата рабочих с начислениями в коп;
- $a_{\text{ст}}$ — затраты, связанные с эксплуатацией станка в течение 1 мин его работы, в коп;
- Π — площадь обработанной поверхности в см²;
- Π_o — производительность обработки при работе на оптимальной скорости резания в см²/мин;
- $\Pi_э$ — производительность обработки при работе на экономической скорости резания в см²/мин;
- a — толщина среза в мм;
- a_1 — толщина стружки в мм;
- b — ширина среза в мм;
- B — ширина фрезеруемой заготовки в мм;
- c — ширина контакта стружки с передней поверхностью резца в мм;
- D — коэффициент диффузии в см²/сек;
- E — термоэлектродвижущая сила, возникающая в паре резец—деталь, в мв;
- E_o — термоэлектродвижущая сила, соответствующая оптимальной скорости резания, в мв;
- F — касательная сила на передней поверхности в н;
- F' — касательная сила на задней поверхности в н;
- f_k — площадь контакта стружки с передней поверхностью в мм²;
- f_3 — ширина фаски по задней поверхности в мм;
- $h_{o\text{ л}}$ — линейный относительный износ инструмента в мк/мм;
- $h_{o\text{ п}}$ — поверхностный относительный износ в мк/10³ см²;

$h_{o.l.o}, h_{o.p.o}$ — оптимальный линейный и поверхностный относительные износы, т. е. относительные износы, соответствующие оптимальной скорости резания;

$h_{o.l.z}, h_{o.p.z}$ — экономический линейный и поверхностный относительные износы, т. е. относительные износы, соответствующие экономической скорости резания;

h_r — радиальный (размерный) износ или текущая величина размерного износа в $\mu\text{м}$;

h_n — начальный радиальный износ в $\mu\text{м}$;

h_z — общая или текущая ширина фаски износа по задней поверхности в $\mu\text{м}$;

$h_{z.n}$ — ширина фаски износа по задней поверхности в конце периода начального износа в $\mu\text{м}$;

h'_z — ширина фаски износа задней поверхности на вершине резца в мм ;

h_c — глубина наклепанного слоя в $\mu\text{м}$;

H — микротвердость обработанной поверхности;

H_1 — микротвердость инструментального материала в зоне контакта;

H_2 — микротвердость обрабатываемого материала в зоне контакта;

H_3 — микротвердость прирезцовой стороны стружки;

H_p — расчетная высота неровностей в $\mu\text{м}$;

H'' — теплота разрыхления или энергия активации;

j — жесткость расточного резца в н/мм ;

l — конечная или текущая длина пути резания в м ; длина дополнительной режущей кромки резца в мм ;

l_n — длина начального участка пути резания в м ;

l_o — степень перекрытия;

L — длина заготовки при фрезеровании; длина прохода при точении в мм ;

L_n — длина прохода фрезы, соответствующая начальному износу зуба, в мм ;

N — нормальная сила на передней поверхности в н ;

N' — нормальная сила на задней поверхности в н ;

N_e — эффективная мощность резания в квт ;

n — число оборотов станка в минуту;

P_x, P_y, P_z — осевая, радиальная и вертикальная составляющие усилия резания в н ;

Q_c — удельная работа стружкообразования в н/мм^2 ;

Q — количество обработанных деталей за период стойкости в шт. ;

q_N, q_F — нормальная и касательная удельные нагрузки на передней поверхности в н/мм^2 ;

q'_N, q'_F — нормальная и касательная удельные нагрузки на задней поверхности в н/мм^2 ;
 R — равнодействующая сил на передней поверхности или сила стружкообразования в н ;
 R_z — высота неровностей обработанной поверхности в мк ;
 S_d — стоимость эксплуатации инструмента за период его стойкости в коп.
 s — подача в мм/об ;
 S_K — максимальная подача, допускаемая чистотой обработки, в мм/об ;
 S_z — подача на зуб в мм/зуб ;
 T — период стойкости; общее или текущее время работы инструмента в мин ;
 T_M — максимальный период стойкости в мин ;
 T_O — оптимальный период стойкости, соответствующий оптимальной скорости резания, в мин ;
 T_a — экономический период стойкости, соответствующий наименьшей себестоимости обработки, в мин ;
 T_n — время работы резца за период начального износа в мин ;
 T_p — размерная стойкость в 10^3 см^2 ;
 $T_{y.p}$ — удельная размерная стойкость в $10^3 \text{ см}^2/\text{мк}$;
 t — глубина резания в мм ;
 t_{cm} — время на смену затупившегося резца и его подналадку за период стойкости в мин ;
 t_m — машинное время обработки одной детали в мин ;
 v — скорость резания в м/мин ;
 v_o — оптимальная скорость резания, соответствующая наименьшей интенсивности износа или наибольшей размерной стойкости инструмента, в м/мин ;
 v_m — скорость резания, соответствующая максимальному периоду стойкости инструмента, в м/мин ;
 v_a — экономическая скорость резания, соответствующая наименьшей себестоимости обработки или наибольшей производительности общественного труда, в м/мин ;
 v_T — скорость резания, соответствующая периоду стойкости T , в м/мин ;
 v_h — скорость размерного износа в мк/мин ;
 $v_{h o}$ — оптимальная скорость размерного износа, соответствующая оптимальной скорости резания, в мк/мин ;
 $v_{h a}$ — экономическая скорость размерного износа, соответствующая экономической скорости резания, в мк/мин ;
 α — задний угол в град ;

- β — угол заострения в *град*;
- γ — передний угол в *град*;
- $\gamma_{\text{прод}}$ — передний угол в продольной плоскости резца в *град*;
- Δ_0 — удельный износ инструмента по задней поверхности в *мк/мин*;
- ζ — усадка стружки;
- θ_0 — оптимальная температура резания (контакта), соответствующая оптимальной скорости резания, в $^{\circ}\text{C}$;
- θ_p — рациональная температура контакта, соответствующая максимальному периоду стойкости T_M , в $^{\circ}\text{C}$;
- $\theta_э$ — температура резания, соответствующая экономическому периоду стойкости $T_э$, в $^{\circ}\text{C}$;
- λ — угол наклона главной режущей кромки в *град*;
- μ — средний коэффициент трения стружки с передней поверхностью резца;
- μ' — коэффициент трения обрабатываемого изделия с задней поверхностью резца;
- φ — главный угол резца в плане в *град*;
- φ_1 — вспомогательный угол в плане в *град*;
- ω — угол действия в *град*.
-

Глава I

УСТАНОВЛЕНИЕ СТОЙКОСТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА РЕЗЦА

1. Элементы износа инструмента и методы их измерения

Все существующие методы определения обрабатываемости металлов и установления стойкостных зависимостей $v=f(T)$ и $v=f(T, t, s)$ представляют собой исследования закономерностей износа инструментов. Стойкостные зависимости выражают связь между скоростью резания и величиной износа его режущих элементов. Величинами, характеризующими износ, или элементами износа, являются ширина фаски износа по задней поверхности, размеры лунки на передней грани, укорочение резца в радиальном направлении (размерный износ резца), потеря массы инструмента и др. Совершенно естественно, что тот элемент износа, который непрерывно и наиболее закономерно возрастает с увеличением времени работы, и должен быть положен в основу соответствующих зависимостей [108].

По данным А. М. Даниеляна [21] при обработке стали быстрорежущими и твердосплавными резцами наиболее закономерно во времени возрастает глубина лунки, затем ширина фаски износа задней поверхности. Другие элементы износа передней и задней граней резца в процессе работы изменяются менее закономерно и не могут быть использованы при выводе стойкостных зависимостей. Большинство исследователей устанавливает стойкостные зависимости на основе износа по задней поверхности, так как ширина фаски износа h_3 гораздо легче поддается измерению, чем глубина лунки. Ширину фаски износа h_3 можно измерить при помощи любого измерительного микроскопа, допускающего смещение перекрестия или имеющего штриховую головку. Для этой цели хорошо подходит отсчетный микроскоп МИР-1, лупа прибора Бринеля и др.

Однако наиболее интересным и важным элементом износа инструмента, непосредственно связанным с точностью изготовления де-

талей, является радиальный, или размерный, износ. Преимущество использования радиального износа в качестве критерия затупления обусловлено тем, что он непосредственно связывается с требованиями к точности и чистоте обработанной поверхности.

Существует несколько методов определения радиального износа.

1. На некотором расстоянии от вершины резца на передней грани наносят тонкую риску [9]. Расстояние от вершины резца до края риски измеряется до опыта и после него с помощью инструментального микроскопа. Радиальный износ определяется как разность этих расстояний после прохождения резцом определенного пути резания. Для повышения точности измерения одну из боковых сторон резца необходимо обработать и использовать в качестве базы как при измерении на микроскопе, так и при установке на станке.

2. Величина радиального износа измеряется на проекторе [21], на экране которого очертывают контур режущей кромки резца до опыта и после некоторого времени работы. Величина смещения вершины резца равна радиальному износу.

Величину этого износа можно определить также по замерам на фотоснимках.

3. Находит применение метод определения радиального износа по ширине фаски износа задней поверхности и тангенсу заднего угла, хотя указанный метод в ряде случаев может привести к недопустимо большим погрешностям.

4. Радиальный износ можно определить путем измерения конусности обрабатываемой детали [9]. Однако этот метод требует трудоемкой подготовки специальных образцов, что резко увеличивает продолжительность испытаний и уменьшает возможность маневрирования при выборе длины пути резания между остановками процесса резания.

5. Отдельные исследователи [12] измеряют радиальный износ с помощью вертикального оптиметра или индикатора на специальной подставке.

Из рассмотренных методов непосредственного измерения износа 1-й, 2-й, 5-й требуют снятия резца со станка, что отражается на точности полученных результатов. Действительно, точность указанных методов измерения износа не высока (в пределах 2—15 мк).

Автором разработан комплексный прибор, обеспечивающий быстроту и высокую точность измерения как радиального износа, так и температурного удлинения резца [55].

Прибор (рис. 1) крепится на резцедержателе станка гайками, навертываемыми на болты, крепящие резец, и состоит из кронштейна 5, к которому винтами прикреплен корпус 4. В корпусе плавно перемещается шпиндель 3 с измерительным наконечником 1. В задний торец шпинделя со смещением в 10 мм относительно оси ввернут винт, в головку которого упирается измерительный наконечник ортотеста или миниметра. Такое эксцентричное расположение винта обеспечивает возможность беспрепятственного отвода измерительного наконечника 1 от резца путем перемещения рукоятки 2 по

П-образному вырезу влево и назад; при этом наконечник ортотеста выходит из контакта с головкой винта. Головка ортотеста закреплена винтом 6 в хомуте 8, который перемещается вдоль оси прибора по пазу кронштейна 5 и фиксируется в нужном положении

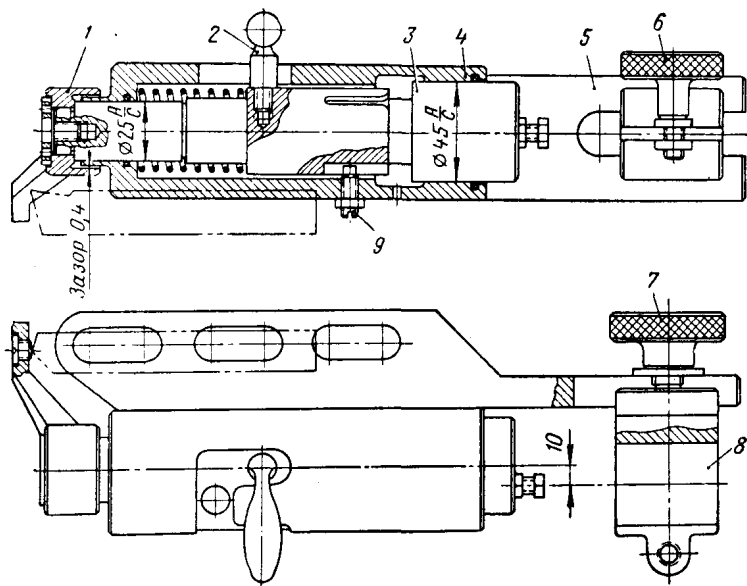


Рис. 1. Прибор для измерения радиального износа и температурного удлинения резца

винтом 7. В корпус 4 ввернут винт 9, цилиндрическая часть которого входит в паз шпинделя и обеспечивает определенное угловое положение наконечника 1 при его повторных установках.

Прибор прост в изготовлении, удобен в работе и позволяет измерять радиальный износ с точностью до 1 мк, не снимая резца со станка.

2. Относительный и удельный износ резца при различной длине пути резания

Относительный износ, характеризующий интенсивность радиального износа, определялся по формуле

$$h_{o.л} = \frac{(h_r - h_n) 1000}{l - l_n} \text{ мк/км.} \quad (1)$$

Удельный износ, представляющий из себя отношение ширины фаски износа по задней поверхности в мк к времени работы резца в мин, подсчитывался по формуле

$$\Delta_0 = \frac{h_3 - h_{3.н}}{T - T_n} \text{ мк/мин.} \quad (2)$$

Как относительный, так и удельный износ подсчитаны лишь по участку вполне установившегося (так называемого нормального) износа.

Относительный и удельный износы, были подсчитаны при чистой обточке осевой стали $\sigma_B = 62,5 \text{ кг/мм}^2$ ($\approx 625 \text{ Мн/м}^2$) резцами с механически закрепленными минералокерамическими пластинками ЦМ332, а также с пластинками твердого сплава Т15К6, Т30К4 и Т60К6 (табл. 1).

Геометрические параметры режущей части резцов были постоянными, а именно: $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1 \text{ мм}$.

Первая остановка резания за период нормального износа делалась через 1300—2000 м длины пути резания, что соответствовало проточке всей длины заготовки. Конечные точки кривых износа соответствовали длине пути резания 10 000—12 000 м.

Погрешности определения относительного $\delta h_{o.l}$ и удельного $\delta \Delta_0$ износов

$$\delta h_{o.l} = \frac{h_{o.l.k} - h_{o.l.n}}{h_{o.l.k}} 100\%; \quad (3)$$

$$\delta \Delta_0 = \frac{\Delta_{o.k} - \Delta_{o.n}}{\Delta_{o.k}} 100\%. \quad (4)$$

Как видно из табл. 1, при сокращении продолжительности испытаний в 3 раза (когда относительный износ определяется сразу после первой остановки процесса резания в периоде нормального износа) погрешность определения относительного износа из 10 опытов колеблется от 0,7 до 36%, причем для 8 опытов из 10 она составляет 0,7—10%. Средняя величина погрешности определения относительного износа по 10 опытам составляет 9,77%.

Погрешность же определения удельного износа в этом случае колеблется в значительно более широких пределах от 15 до 254%, причем средняя величина погрешности по тем же 10 опытам составляет 95,8%.

На рис. 2 приведены графики радиального износа и ширины фаски износа по задней поверхности резцов Т30К4 в зависимости от длины пути резания при точении осевой стали с различными сочетаниями v , s , f . Бросается в глаза более строгая закономерность кривых $h_r = f(l)$ по сравнению с кривыми $h_a = f(l)$.

Период приработки во всех опытах заканчивается при $l_n = 2000 \text{ м}$. При подстановке в формулу (1) значений $l = 3000$; 4000; 6000; 8000 и 10 000 м величина $h_{o.l}$ изменяется в довольно узких пределах. Поэтому относительный износ вполне надежно может быть определен при $l = 3000 \div 4000 \text{ м}$.

При подстановке в формулу (2) различных значений продолжительности резания T , соответствующих длине пути резания в 3000, 4000, 6000, 8000 и 10 000 м, находим, что Δ_0 колеблется в более широких пределах. Например, при $t = 0,50 \text{ мм}$, $s = 0,10 \text{ мм/об}$ и $v = 300 \text{ м/мин}$ относительный износ колеблется в пределах

Таблица 1

Пределы колебаний относительного и удельного износа резца при различной длине пути резания
(или времени работы резца) и возможная погрешность их определения
в случае сокращения продолжительности испытаний втрое

№ опы- та	Материал инстру- мента	Задний угол α°	Скорость реза- ния v м/мин	Глубина резания t мм	Подача s мм/об	Относительный износ в мк/к.м				Удельный износ в мк/мин				Абсолютная вели- чина погрешнос- ти определения	
						$h_{ср.л}$	$h_{ср.к}$	$h_{0.л \min}$	$h_{0.л \max}$	$\Delta_0 \text{ н}$	$\Delta_0 \text{ к}$	$\Delta_0 \text{ шп}$	$\Delta_0 \text{ пш}$	относи- тельно- го износа $\delta h_{ср.л}$ %	удельно- го износа $\delta \Delta_0$ %
1	ЦМ332	6	240	0,25	0,10	0,725	0,725	0,725	0,725	4,15	4,9	4,15	5,2	1,5	15,0
2	ЦМ332	12	235	0,25	0,10	1,39	1,13	1,13	1,40	6,65	2,50	2,50	6,65	23	166
3	ЦМ332	18	250	0,25	0,10	2,0	2,02	2,0	2,02	1,25	1,66	0,835	1,66	1	25
4	ЦМ332	10	275	1,0	0,10	0,875	0,845	0,845	0,845	0,83	2,33	0,83	2,78	3,5	254
5	ЦМ332	10	100	0,25	0,10	3,38	3,08	3,08	3,40	1,26	1,69	0,63	1,90	10	25
6	ЦМ332	10	400	0,25	0,10	0,77	0,82	0,61	0,82	2,08	2,43	2,08	4,6	6	15
7	ЦМ332	10	540	0,25	0,10	1,96	2,13	1,96	2,13	8,1	6,6	6,6	8,1	8	23
8	T60K6	18	250	0,25	0,10	0,69	0,695	0,69	0,695	4,3	1,72	1,44	4,3	0,7	150
9	T30K4	18	250	0,25	0,10	2,36	2,56	2,36	2,64	0,69	2,06	0,69	2,30	8	235
10	T15K6	18	250	0,25	0,10	9,25	6,8	6,7	9,25	3,45	6,9	3,45	6,90	36	50

Обозначения: $h_{ср.л}$ и $\Delta_{0л}$ — относительный и удельный износы резцов после первой остановки резания в пе-
риоде нормального износа резца;

$h_{0.л \text{ к}}$ и $\Delta_{0 \text{ к}}$ — относительный и удельный износы резцов, подсчитанные по конечным точкам
кривых износа;

$h_{0.л \text{ шп}}$ и $h_{0.л \text{ пш}}$ — минимальный и максимальный относительные износы резцов при различной
длине пути резания;

$\Delta_{0 \text{ шп}}$ и $\Delta_{0 \text{ пш}}$ — минимальный и максимальный удельные износы при различном времени
работы резца.

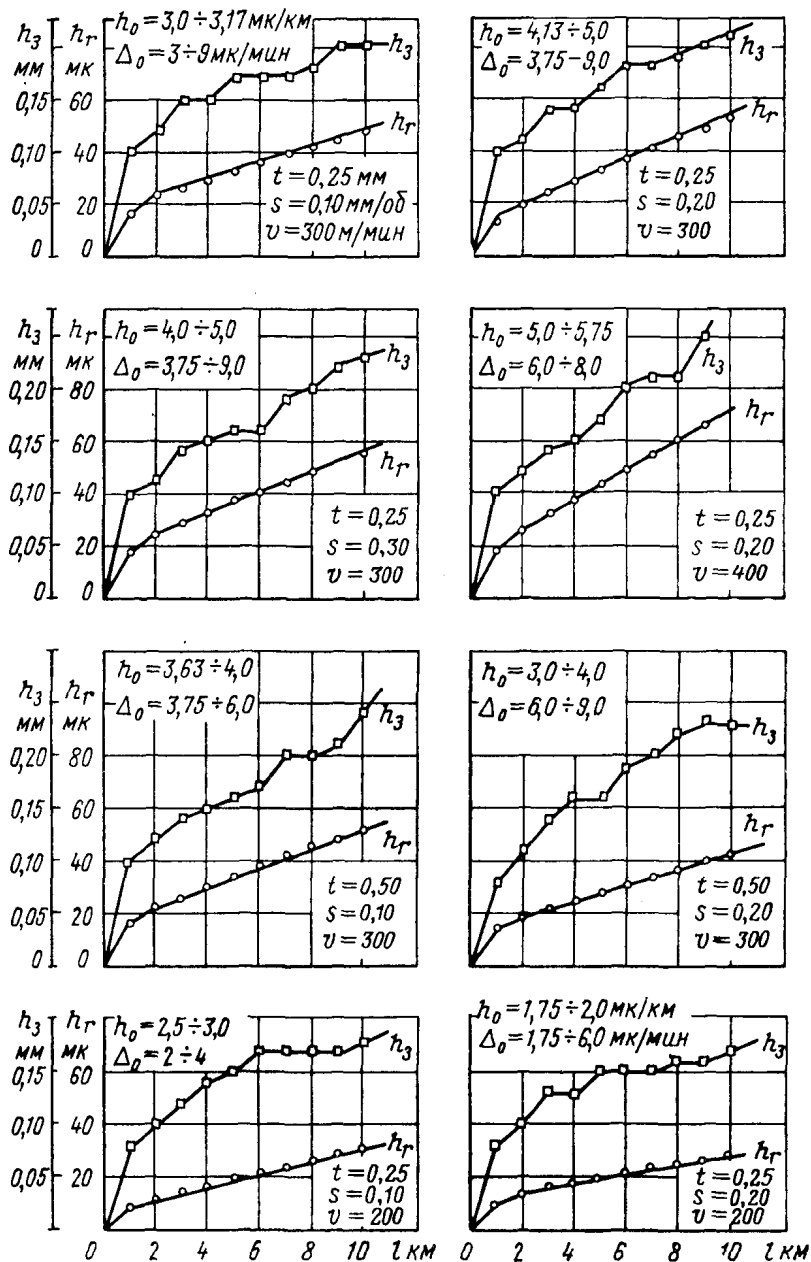


Рис. 2. Зависимость радиального износа и ширины фаски износа по задней поверхности от длины пути резания.

Осевая сталь, резец — ТЗ0К4

от 3,63 до 4,0 мк/км, а удельный износ — от 3,75 до 6,0 мк/мин. Приведенные данные показывают, что относительный износ, являющийся характеристикой интенсивности размерного износа, при различных длинах пути резания является величиной более стабильной, чем удельный износ, характеризующий интенсивность изменения ширины фаски износа по задней поверхности. Постоянство угла наклона кривой радиального износа $h_r = f(T)$ отмечается и другими исследователями [46], [85].

3. Погрешности определения радиального износа и ширины фаски износа по задней грани при различной длине пути резания

При расчетах точности изготовления деталей, технологу придется подсчитывать радиальный износ, соответствующий определенной длине пути резания. Формулу для определения радиального износа легко получить из формулы (1)

$$h_r = \frac{l - l_n}{1000} h_{o..l} + h_n. \quad (5)$$

Найдем погрешность определения радиального износа, если относительный износ $h_{o..l}$ найден лишь по начальному участку нормального износа (т. е. на основе более кратковременных испытаний).

В табл. 2 приводятся результаты большой серии испытаний с различными комбинациями t , s , v при постоянной $l = 10\,000$ м. Процесс резания прерывался через каждые 1000 м пути.

Расчетные (ожидаемые) величины радиального износа и ширины фаски износа по задней поверхности для длины пути резания $l = 10\,000$ м подсчитывались по формулам

$$h_{r_o} = \frac{l - l_n}{1000} h_{o..l} + h_n; \quad (6)$$

$$h_{з.o} = (T - T_n) \Delta_0 + h_{з.n}, \quad (7)$$

где величины $h_{o..l}$ и Δ_0 определялись по формулам (1) и (2), в которых значения h_r и $h_з$ принимались из соответствующих кривых износа при различной длине пути резания: $l = 3000$; 4000 ; 6000 и 8000 м (или соответствующем времени работы резца).

Погрешности определения h_r и $h_з$ при различной длине пути резания подсчитывались по формулам

$$\delta h_r = \frac{h_{r_o} - h_r}{h_r} 100\%; \quad (8)$$

$$\delta h_з = \frac{h_{з.o} - h_з}{h_з} 100\%, \quad (9)$$

где h_{r_o} — расчетная величина радиального износа для $l = 10\,000$ м;
 h_r — фактическая (опытная) величина радиального износа для $l = 10\,000$ м;

Таблица 2

Сводные величины износов резца при различной длине пути резания
 (Сталь осезая, резец Т30К4, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=10^\circ$, $\alpha=a_1=18^\circ$, $\gamma=0$, $\lambda=0$, $r=1,0$ мм)

Режимы резания		Длина пути резания в м										Конечная величина износа	Конечная ширина фаски износа по задней грани	Диапазон колебаний относительного и удельного износа в % к наименьшему значению										
		2000					6000								8000					10 000				
		Начальные износы					Относительный $h_{с.л}$ и удельный Δ_0 износы																	
t мм	s мм/об	v м/мин	Диаметр заготовок мм	$h_{г.н}$ мм	$h_{з.н}$ мм/мм	Δ_0 мм/мин	$h_{с.л}$ мм/10 ³ мм	Δ_0 мм/мин	$h_{с.л}$ мм/10 ³ мм	Δ_0 мм/мин	$h_{с.л}$ мм/10 ³ мм	Δ_0 мм/мин	$h_{г.н}$ мм	$h_{з.н}$ мм	Δ_0 мм/мин	$h_{с.л}$ мм	Δ_0 мм/10 ³ мм	$h_{г.н}$ мм/мин	$h_{з.н}$ мм	Δ_0 мм/мин				
0,25	0,10	300	124	20	0,13	3	3,25	2,25	3,0	2,0	3,0	2,6	44	0,20	2,6	3,0	3,0	44	0,20	2,6	3,0			
0,25	0,10	300	122	20	0,12	4	4,25	3,0	3,17	3,5	3,25	3,0	46	0,20	3,0	3,0	46	0,20	3,0	3,0				
0,25	0,10	300	119	23	0,12	3	3,0	3,75	3,17	3,0	3,0	3,0	47	0,20	3,0	3,0	47	0,20	3,0	3,0				
0,25	0,20	300	112	17	0,10	4	4	4,5	3,08	4,0	3,0	3,75	41	0,20	3,75	4,0	3,75	41	0,20	3,75	4,0			
0,25	0,20	300	107	19	0,11	5	4,5	5,25	4,33	4,0	4,13	3,75	52	0,21	4,0	4,13	3,75	52	0,21	4,0	4,13			
0,25	0,20	300	141	16,5	0,12	2,5	2,75	6,75	2,75	7,0	2,62	7,9	37,5	0,33	7,9	2,62	7,9	37,5	0,33	7,9	2,62			
0,25	0,30	300	91	24	0,11	3,5	4,5	3,75	4,15	4,5	4,0	4,5	56	0,23	4,5	4,0	4,5	56	0,23	4,5	4,0			
0,25	0,30	300	156	15	0,10	3,5	3	3,75	3	5	3	4,5	39	0,22	3	3	4,5	39	0,22	3	3			
0,25	0,30	300	141	15,5	0,12	3,5	3,75	6,0	3,08	5	2,75	4,1	37,5	0,23	4,1	2,75	4,1	37,5	0,23	4,1	2,75			
0,50	0,10	300	125	22	0,12	4	4	3,75	3,84	4,0	3,63	4,5	51	0,24	4,5	3,63	4,5	51	0,24	4,5	3,63			
0,50	0,20	300	120	18	0,11	4	3,5	6	3	5,5	3	4,5	42	0,23	4,5	3	4,5	42	0,23	4,5	3			
0,25	0,10	200	85	11	0,10	3	2,5	1,5	2,16	1	2	1,25	27	0,15	1,25	2	2,5	27	0,15	1,25	2			
0,25	0,10	200	77	11	0,10	3	2,75	3,5	2,5	2,33	2,5	2	31	0,18	2	2,5	2,33	31	0,18	2	2,5			
0,25	0,20	200	95	14	0,10	2	1,75	2,5	1,75	2,0	1,75	1,75	28	0,17	1,75	1,75	2,0	28	0,17	1,75	1,75			
0,25	0,20	200	140	26	0,12	5	5,75	8	5,65	6	5,55	7,4	65	0,25	5,55	5,55	6	65	0,25	5,55	5,55			
0,25	0,10	100	138	26	0,16	2	2	1	1,83	1	1,88	0,75	41	0,22	1	1,88	0,75	41	0,22	1	1,88			
0,25	0,10	125	130	21	0,15	2	2	0,62	1,94	1,04	1,88	1,1	36	0,20	1,1	1,88	1,1	36	0,20	1,1	1,88			
0,25	0,10	150	132	12	0,10	3	3,75	1,88	2,17	2,5	2,00	1,88	28	0,20	2,00	2,5	2,00	28	0,20	2,00	2,5			
0,25	0,10	300	100	16	0,08	2	2	1,5	2	2,0	2	2,25	31	0,14	2	2	2,25	31	0,14	2	2			
0,25	0,10	400	126	20	0,10	5	5	40	5,4	8,0	5,2	9,0	60	0,28	5	8,0	9,0	60	0,28	5	8,0			
0,25	0,10	75	123	14,5	0,10	5,5	5,4	1,87	5,4	2,0	5,2	1,63	56	0,25	5,2	5,2	1,63	56	0,25	5,2	5,2			
0,25	0,10	200	110	14	0,08	3	3	2,0	2,66	2,33	2,44	1,75	33,5	0,15	2,33	2,44	1,75	33,5	0,15	2,33	2,44			

$h_{з.о}$ — расчетная ширина фаски износа по задней грани для $l = 10\,000$ м;

$h_з$ — фактическая ширина фаски износа по задней грани для $l = 10\,000$ м.

При сокращении длины пути резания с 10 000 до 3000 м средняя погрешность определения радиального износа из 22 опытов составила всего 10,3%, а средняя погрешность определения ширины фаски износа по задней грани — 54,3%, т. е. в 5,3 раза больше.

Приведенные данные позволяют для расчетов точности обработки принять тот относительный износ резца, который найден лишь по начальному участку нормального износа, так как при увеличении продолжительности испытаний в 3—4 раза величина $h_{о.л}$ остается практически неизменной.

Таким образом, закономерности изменения радиального износа могут быть положены в основу ускоренного метода определения обрабатываемости металлов и установления для них стойкостных зависимостей.

4. Метод ускоренных стойкостных испытаний

Как было указано, если режимы резания устанавливать на основе закономерностей радиального износа, то продолжительность стойкостных испытаний можно сократить в несколько раз.

Продолжительность испытаний по новому методу складывается из двух периодов (рис. 3). Период 1, или период приработки, когда находится величина начального радиального износа h_n , и период 2, занимающий начальный участок процесса нормального износа, когда определяется величина относительного износа

$$h_{о.л} = \frac{(h_{r\,н} - h_n) 1000}{l_{r\,н} - l_n} \text{ мк/км.} \quad (10)$$

Если принять в качестве критерия затупления величину радиального износа $h_{r\,к}$, то соответствующий период стойкости T в мин может быть определен по формуле

$$T = \frac{l_k}{v} = \frac{l_n + \frac{h_{r\,к} - h_n}{h_{о.л}} 1000}{v} \text{ мин.} \quad (11)$$

Доказанная выше незначительность колебаний величины относительного износа при различной длине пути резания позволяет утверждать, что найденный по формуле (11) период стойкости резца не будет существенно отличаться от фактического периода стойкости, которую показал бы резец при затуплении до величины $h_{r\,к}$.

Для практического применения описанного метода необходимо иметь численную величину радиального износа $h_{r\,к}$, которую можно было бы принимать в качестве критерия затупления. Величина $h_{r\,к}$ зависит от величины заднего угла α и величины износа резца по задней грани $h_з$. Наиболее благоприятной величиной заднего

угла, удовлетворяющей требованиям как чистовой, так и черновой обработки, является $\alpha = 10^\circ$.

Зависимость между радиальным износом и износом по задней грани устанавливалась по данным стойкостных испытаний при точении жаропрочного сплава ЭИ617 и стали 40Х, приведенным в табл. 3 и на рис. 4.

Такая зависимость с достаточным для практических целей постоянством сохраняется в широком диапазоне изменения режимов резания и для большой номенклатуры инструментальных и обраба-

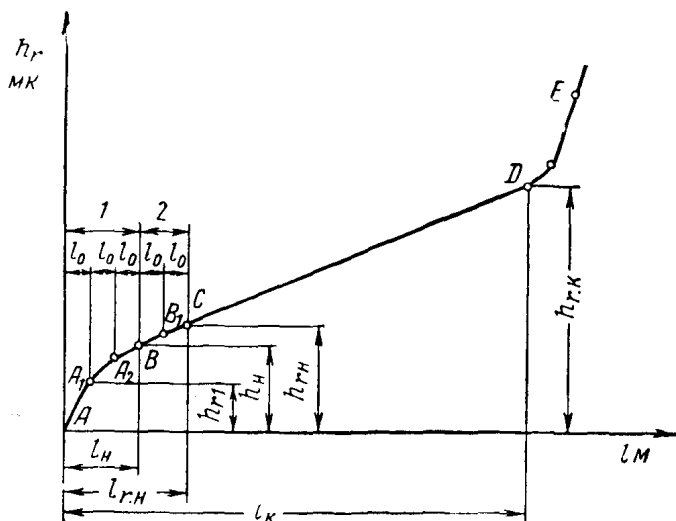


Рис. 3. К разъяснению метода ускоренных стойкостных испытаний

тываемых материалов. Так, износу по задней грани $h_3 = 0,80$ мм примерно соответствует радиальный износ $h_r = 100$ мк, который и может быть принят в качестве критерия затупления при обточке стали твердосплавными резцами.

Чтобы найти величины l_n , l_{rn} , h_n и h_{rn} , входящие в формулу (10), надо определить положение точки В, (см. рис. 3), соответствующей концу периода приработки и положение точки С, лежащей на кривой износа. Чем ближе точка С будет находиться к точке В, тем меньше будет величина l_{rn} по сравнению с величиной l_K и тем больше будет сокращена продолжительность стойкостных испытаний. Однако при слишком малом расстоянии между точками С и В погрешность определения относительного износа по формуле (10) будет недопустимо большой.

Положения точек A_1 , A_2 , В, B_1 и С определяются длиной отрезка пути резания l_0 между остановками процесса резания, эта длина должна быть такой, чтобы на участке ВС кривой износа обеспечи-

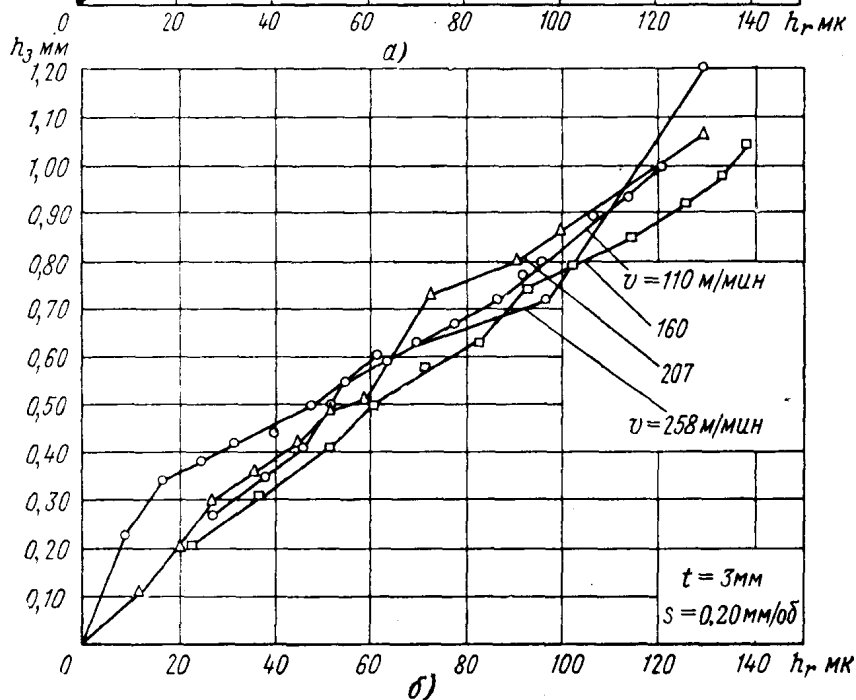
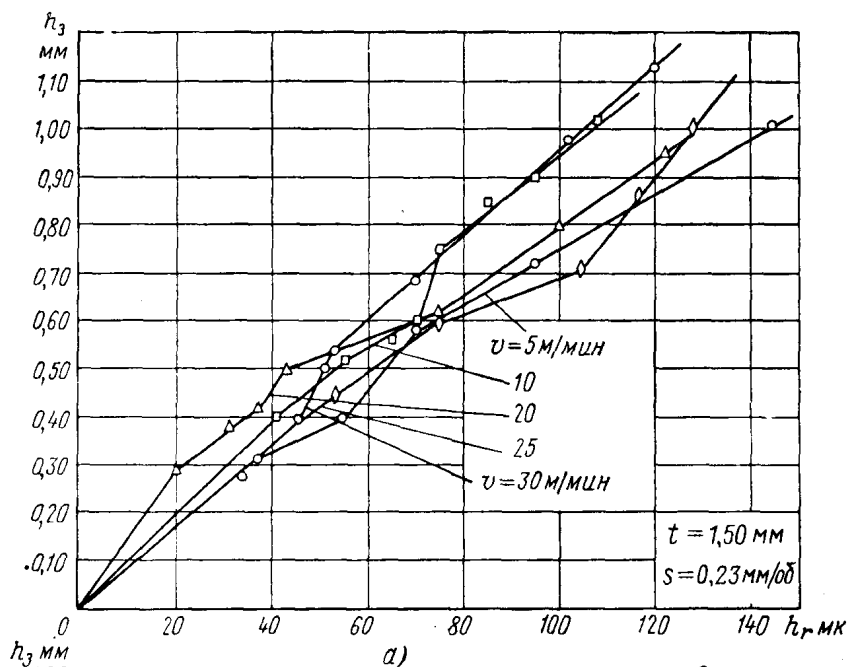


Рис. 4. Зависимость между радиальным износом и шириной фаски износа по задней грани:

а—жаропрочный сплав ЭИ617, резец ВК8; б—сталь 40Х, резец—Т15К6

валось надежное определение относительного износа и вместе с тем достигалось значительное сокращение продолжительности испытаний. Длина l_0 зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и материала режущего инструмента, от режимов резания и от ряда других факторов.

Таблица 3

Зависимость между радиальным износом
и износом по задней грани ($\alpha=\alpha_1=10^\circ$)

Протяженность фаски износа по задней грани h_3 в мм	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
Радиальный износ h_r в мк	37	50	62	75	87	100	112	125

Например, при чистовой обточке осевой стали резцами, оснащенными твердым сплавом Т30К4, длина l_0 может быть выбрана 500—1000 м. При обточке же жаропрочного сплава ЭИ617 резцами, оснащенными твердым сплавом ВК8, длина l_0 может составлять всего 10—25 м.

Для определения величины l_0 можно рекомендовать сделать первую остановку процесса резания после прохождения длины пути резания, выбранной из следующего ряда: 10; 25; 50; 100; 250; 500; 1000; 2500 м, так чтобы длина отрезка l_0 соответствовала 1,5—2,5 мин работы. Если после первой остановки процесса резания радиальный износ h_{r1} окажется в пределах 8—15 мк, то это будет означать, что длина l_0 выбрана правильно; при $h_{r1} < 8$ мк, за величину l_0 следует взять ближайшую большую из рекомендуемого ряда, а в случае, когда $h_{r1} > 15$ мк — за величину l_0 следует взять ближайшую меньшую. Испытания прекращают тогда, когда соседние 3 точки, подобные В, В₁ и С, лягут на одной прямой линии (с точностью до 2 мк).

5. Метод ускоренного определения режимов резания

Стойкостные зависимости на основе исследования размерного износа устанавливают в следующем порядке.

1. Определяют радиальный износ резца при принятом сечении среза ($t \times s$) на 4—6 скоростях резания, прерывая процесс резания через каждые l_0 пути резания. Когда будут получены 3 точки, примерно лежащие на прямой линии, испытания прекращают.

2. Определяют величину относительного износа по формуле (1).

3. Устанавливают критерий затупления резца, выраженный некоторой величиной радиального износа h_{rk} .

4. Подсчитывают длину пути резания, соответствующую принятому критерию затупления по формуле

$$l_k = l_n + \frac{h_{rk} - h_n}{h_{0,л}} 1000 \text{ м.} \quad (12)$$

5. Определяют для каждой скорости резания стойкость резца по формуле

$$T = \frac{l_k}{v}.$$

6. По найденным значениям стойкости обычным порядком строят графики $T-v$ в логарифмических координатах и определяют зависимость

$$v = \frac{Cv}{T^m}. \quad (13)$$

7. Развернутая зависимость $v=f(T, t, s)$ по частным $v=f(T)$, $v=f(t)$ и $v=f(s)$ определяется так же, как и при установлении стойкостных зависимостей общепринятым стандартным методом.

6. Экспериментальная проверка метода ускоренного определения режимов резания

Сталь 40Х. Возможность установления режимов резания на основе закономерностей радиального износа резца проверялась при обточке стали 40Х $\sigma_B=70,8$ кГ/мм², $\sigma_s=65$ кГ/мм² (708 и 650 Мн/м²). $\delta=17,3\%$; $\psi=32,3\%$ резцами, оснащенными пластинками твердого сплава Т15К6 со следующими параметрами: $\gamma=10^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $\varphi=60^\circ$; $\varphi_1=30^\circ$; $\lambda=0^\circ$; $r=1$ мм.

Во всех опытах резцы доводились до затупления по задней грани $h_3 \geq 1,0$ мм, что соответствовало максимальной долговечности инструмента. При каждой остановке процесса резания измерялись как радиальный износ, так и ширина фаски износа по задней грани. Таким образом были совмещены стандартный метод определения режимов резания и сокращенный.

На рис. 5—7 приведены зависимости радиального износа резца от длины пути резания и износа по задней грани от времени работы для трех сечений срезаемого слоя.

Результаты подсчетов периодов стойкости T_1 (обычным способом при критерии затупления $h_3=0,80$ мм) и T_2 (ускоренным методом) приведены в табл. 4. Периоды стойкости T_1 определены непосредственно из соответствующих кривых износа (см. рис. 5, 6, 7), а T_2 — по формуле (13).

По данным табл. 4 построены зависимости $v-T$ в логарифмических координатах (рис. 8). На основании графиков, подобных приведенным на рис. 8, и соответствующих расчетов определены для каждого сечения среза и сведены в табл. 5 частные формулы $v-T$. Расхождение скорости резания v_{60} , полученной ускоренным методом и на основе обычных стойкостных испытаний, весьма незначительное и находится в пределах от 0 до 7,2%.

Сталь 1Х18Н9Т. При установлении режимов резания жаропрочной стали 1Х18Н9Т резцами, оснащенными пластинками твердого сплава Т15К6, резцы не доводились до полного затупления. Частные формулы $v-T$ для различных сечений среза и общая формула

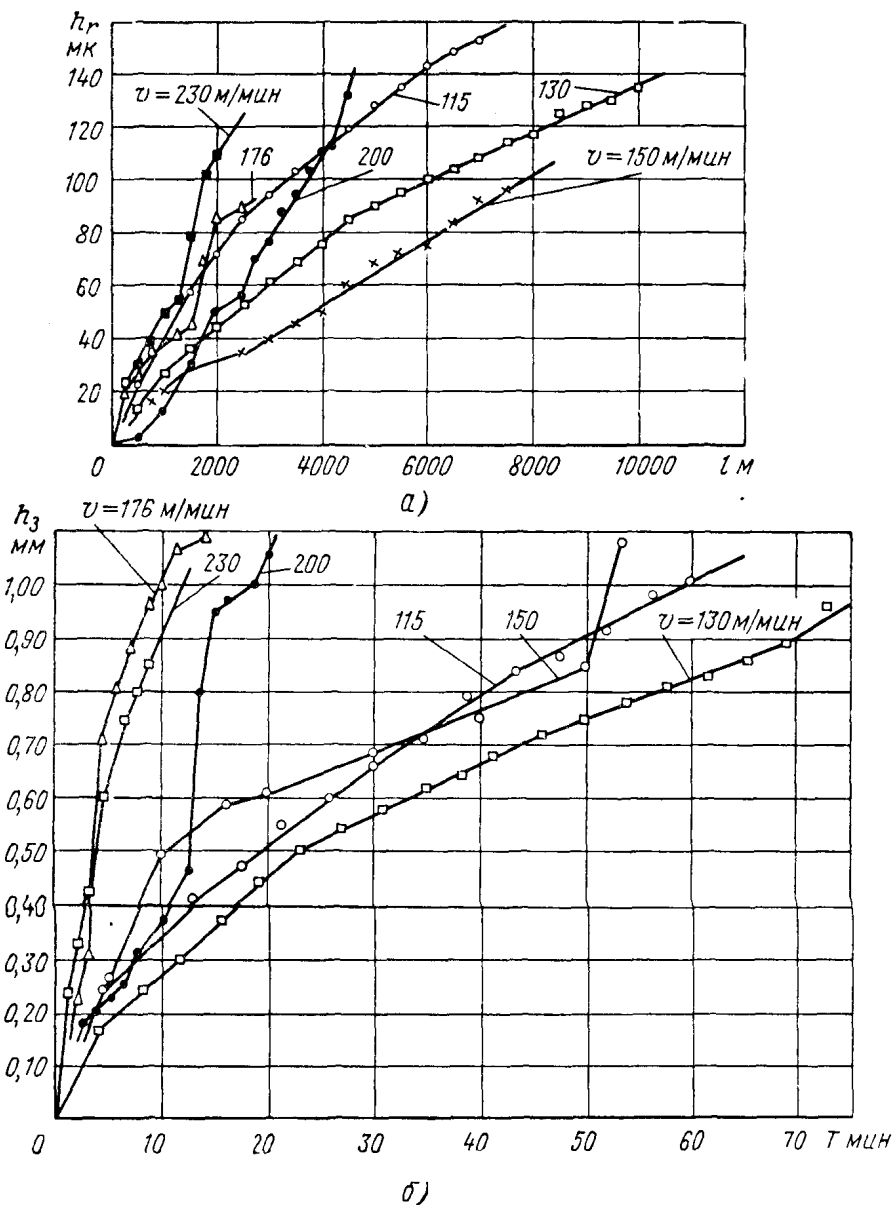


Рис. 5. Зависимости радиального износа от длины пути резания (а) и ширины фаски износа по задней грани от времени работы (б)

Сталь 40Х, резец Т15К6; $t=1,5$ мм, $s=0,40$ мм/об

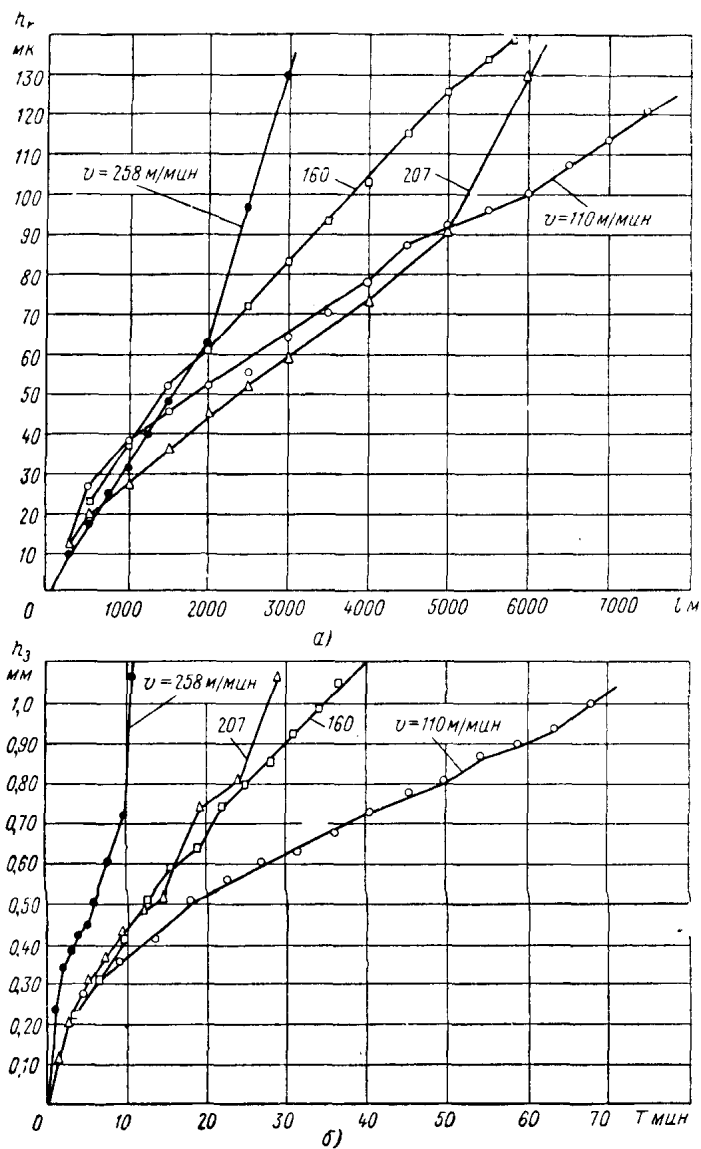


Рис. 6. Зависимости радиального износа от длины пути резания (а) и ширины фаски износа по задней грани от времени работы (б)

Сталь 40X, резец Т15К6; $t=3,0$ мм, $s=0,20$ мм/об

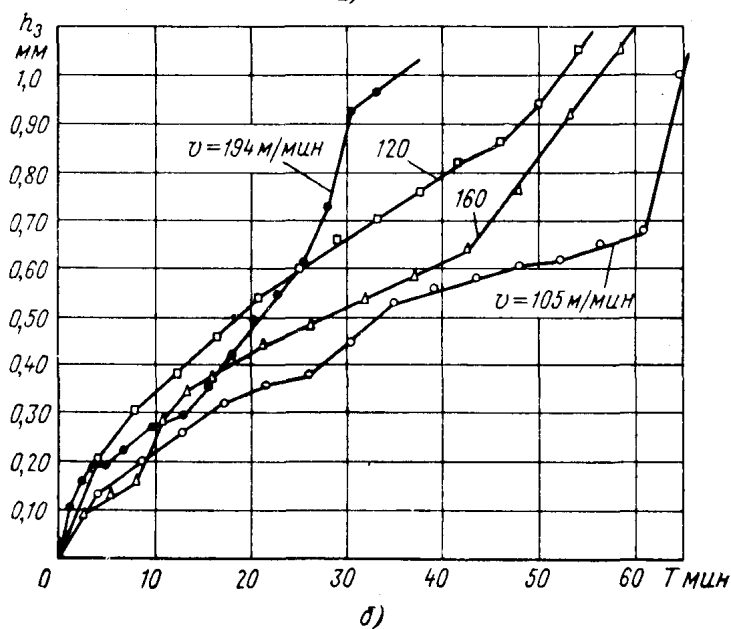
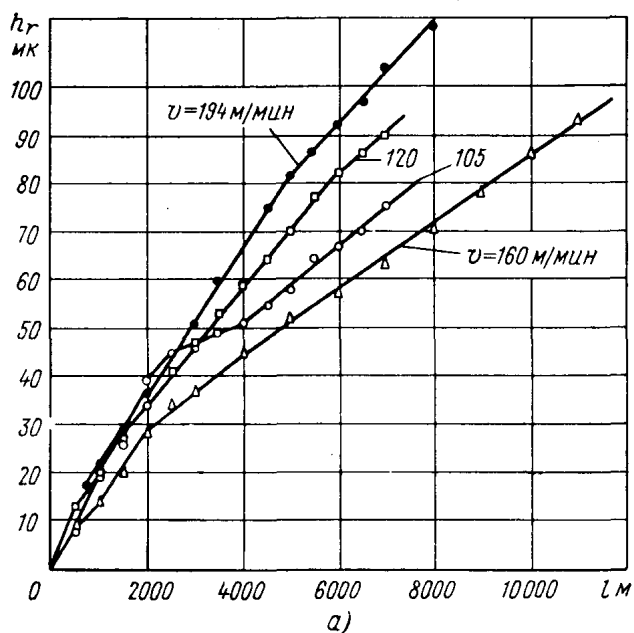


Рис. 7. Зависимости радиального износа от длины пути резания (а) и ширины фаски износа по задней грани от времени работы (б)

Сталь 40X, резец Т15К6; $t=5,0$ MM , $s=0,20$ MM/об

$v=f(T, t, s)$ были получены лишь на основе закономерностей радиального износа резца по ускоренному методу. Только после этого были проведены контрольные испытания на нескольких режимах резания до полного затупления резца.

Геометрические параметры режущей части разцов оставались теми же, что и при обработке стали 40X. Результаты опытов сведены в табл. 6.

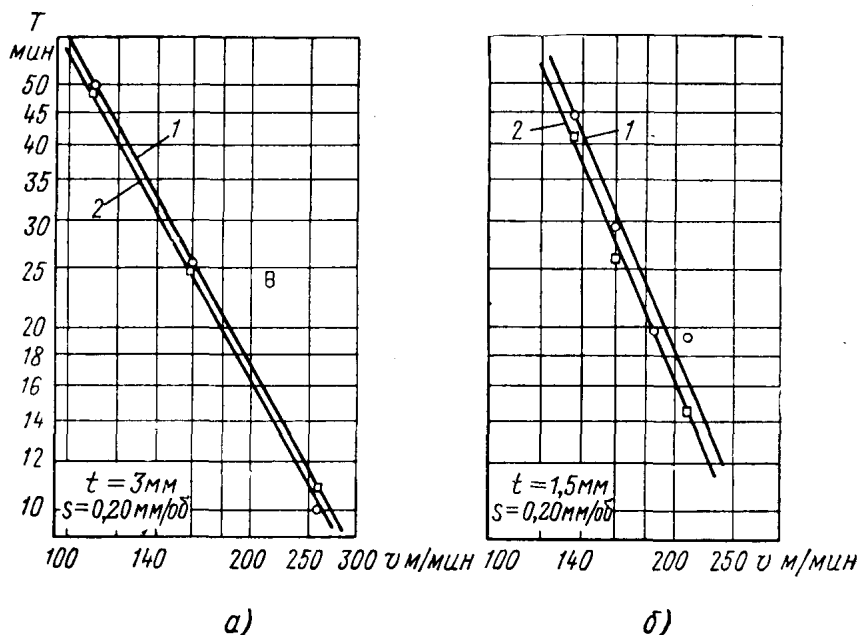


Рис. 8. Зависимость стойкости резца от скорости резания:
1— $h_3 = 0,80$ мм; 2—по ускоренному методу

По результатам испытаний построены графики $v-T$, один из которых приведен на рис. 9. На основании таких графиков и расчетов для каждого сечения среза определены и сведены в табл. 7 частные формулы $v-T$.

Для вывода общей формулы $v=f(T, s, t)$ были построены [62] зависимости $m=f(s)$, $v=f(s)$ и $v=f(t)$ и на их основе получены следующие формулы:

$$m = \frac{0,17}{s^{0,60}}; \quad v = \frac{C_1}{s}; \quad v = \frac{C_2}{t^{0,26}},$$

по которым получена развернутая формула

$$v = \frac{156}{T^{0,17/s^{0,60}} t^{0,26_s}}. \quad (14)$$

Таблица 4

Периоды стойкости резцов, полученные на основе
ускоренных и полных стойкостных испытаний

t мм	s мм/об	v м/мин	T_1 мин	l_n м	h_n мм	$l_{гн}$ м	$h_{гн}$ мм	$h_{о.л}$ мм/к.м	l_k м	T_2 мин
0,50	0,20	115	51,2	500	7	1500	21	14	7140	62,1
		135	24	500	21	1500	44	23	3940	29,2
		160	17,5	500	19	1500	49	30	3200	20
		185	16,6	500	26	1500	59	33	2745	14,9
		210	14,8	500	28	1500	68	40	2300	10,95
		260	12,7	500	23	1500	60	37	2580	9,9
		300	7	500	23	1500	64	41	2380	7,9
1,50	0,20	335	3,5	500	45	1000	75	60	1417	4,2
		135	45	500	9	1500	27	18	5550	41,2
		160	29,5	1000	35	2000	53	18	4110	25,7
		185	20,5	500	18	1500	43	25	3780	20,4
3,0	0,20	210	19,1	500	21	1500	53	32	2975	14,4
		110	50	1000	38	2000	52	14	5425	49,3
		160	25,5	1500	52	2500	72	20	3900	24,4
		207	24	1000	27	2000	45	18	5060	24,5
5,0	0,20	258	10	250	9	750	25	32	3090	11,95
		105	62,5	1000	19	2000	39	20	5050	48,2
		120	40	1000	20	2000	34	14	6720	56
		160	48,5	1000	14	2000	29	15	6830	42,8
1,5	0,40	194	29	1000	22	2000	37	15	6200	32
		115	40,5	500	24	1500	58	34	2735	23,8
		130	56,5	1000	27	2000	45	18	5060	39
		150	44	500	12	1500	29	17	5680	38
		176	5,5	250	20	750	35	30	2920	17
		200	13,5	1000	12	2000	50	38	3320	16,6
1,5	0,60	230	7,5	500	31	1000	50	38	2315	10,1
		135	54	1000	20	2000	36	16	6000	44,5
		160	19,5	1000	13	2000	33	20	5350	33,4
		180	16	500	8	1000	22	28	3790	21
		195	13,5	750	10	1750	39	29	3850	19,8
1,5	0,95	222	4	250	11	750	36	50	2030	9,2
		132	23,5	400	24	800	31	17,5	4740	36
		160	36,7	300	11	800	25	28	3480	21,8
		185	5	300	16	500	27	55	1830	9,9
		210	0,8	100	23	300	56	165	567	2,7

Сводные данные ускоренных и стандартных стойкостных испытаний

Режимы резания			Ускоренные испытания		Обычные стойкостные испытания		Расхождение скоростей v_{60} %	Сокращение продолжительности исследования (во сколько раз)
t мм	s мм/об	v м/мин	$v = \frac{C_v}{T^m}$	v_{60}	$v = \frac{C_v}{T^m}$	v_{60}		
0,50	0,20	115—335	$\frac{646}{T^{0,44}}$	106,8	$\frac{626}{T^{0,43}}$	107,8	0,9	2,6
1,5	0,20	135—210	$\frac{624}{T^{0,41}}$	116,5	$\frac{655}{T^{0,41}}$	120	6,3	3,04
3,0	0,20	110—258	$\frac{1086}{T^{0,57}}$	105	$\frac{1031}{T^{0,56}}$	104	0,9	2,70
5,0	0,20	105—194	$\frac{3387}{T^{0,84}}$	109	$\frac{3128}{T^{0,82}}$	109	0	3,30
1,5	0,40	115—230	$\frac{541}{T^{0,39}}$	110	$\frac{512}{T^{0,38}}$	108	1,8	3,00
1,5	0,60	135—225	$\frac{432}{T^{0,29}}$	131,5	$\frac{360}{T^{0,26}}$	124,5	5,6	2,50
1,5	0,95	132—210	$\frac{265}{T^{0,18}}$	126,5	$\frac{247}{T^{0,18}}$	118	7,2	5,0

Таблица 6

**Сводные величины режимов резания, радиального износа,
длин пути резания и периодов стойкости
при обточке жаропрочной стали 1X18H9T**

t мм	s мм/об	v м/мин	l_H м	l_{rH} м	h_H мк	h_{rH} мк	$h_{0,л}$ мк/км	l_K м	T мин
0,50	0,20	176	300	800	23	36	26	4220	24
		192	250	1250	26	45	19	5450	28,4
		210	700	1100	10	15	12,5	9900	47
		219	400	1200	21	38	21,2	5300	24,2
		240	300	700	21	42	52,5	2300	9,6
		301	200	500	22	37	50	2260	7,5
1,5	0,20	120	200	1400	21	42	18	6150	51
		130	200	1200	20	35	15	7200	55
		140	400	1400	21	37	16	6900	49
		150	300	800	15	31	32	3740	25
		190	400	1000	16	30	23,3	5070	26,6
5,0	0,20	71,5	500	1100	20	33	21,6	5350	75
		83	500	1000	31	42	22	4750	57
		107	500	1000	17	40	46	2850	26,6
		122	400	700	23	46	77	1720	14,1
1,5	0,40	107	600	1600	15	29	14	8350	78
		116	500	1000	14	30	32	4000	34,5
		135	400	900	12	36	48	2800	20,7
		156	400	1100	17	33	23	5100	32,7
		176	400	1000	11	34	38,4	3360	19,0
1,5	0,95	75	300	800	12	28	32	3800	50,5
		85	150	400	10	25	60	2050	24,2
		97,5	100	350	15	34	116	1050	10,8
		106	50	150	11	30	190	650	6,1

Подсчитанные по формуле (14) и частным формулам (см. табл. 7) скорости резания v_{60} , v_{45} и v_{30} для различных сечений среза приведены в табл. 8.

Таблица 7

Сводные данные испытаний
по ускоренному методу

t мм	s мм/об	$v = \frac{C_v}{T^m}$ м/мин	Сокращение продолжительности исследования (во сколько раз)
0,50	0,20	$\frac{574}{T^{0,32}}$	5,32
1,50	0,20	$\frac{750}{T^{0,45}}$	5,02
5,0	0,20	$\frac{305}{T^{0,33}}$	4,1
1,5	0,40	$\frac{430}{T^{0,33}}$	4,3
1,5	0,95	$\frac{145,5}{T^{0,17}}$	3,6

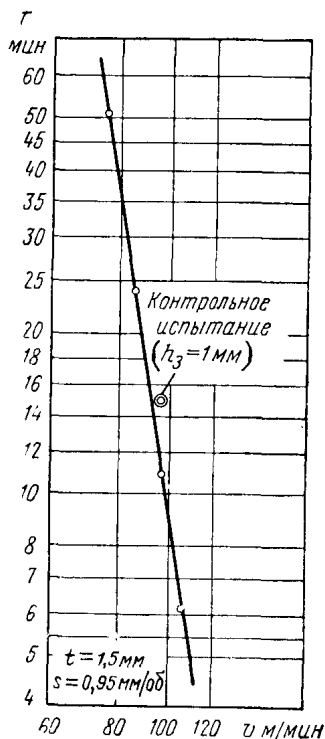


Рис. 9. Зависимость стойкости резца от скорости резания.

Сталь X18H9T, резец T15K6

Таблица 8

Режимы резания при точении жаропрочной стали 1X18H9T
резцами, оснащенными пластинками твердого сплава T15K6

t мм	s мм/об	Скорость резания v по частным формулам (см. табл. 7) в м/мин			Скорость резания v по развернутой формуле (14) в м/мин		
		v_{60}	v_{45}	v_{30}	v_{60}	v_{45}	v_{30}
0,50	0,20	155	170	193	148	168,5	202
1,50	0,20	119	135,5	162	111	127	152
5,0	0,2	79	87	100	81	92,5	111
1,5	0,4	111	122,5	140	102,5	112	126
1,5	0,95	72,7	76	81,5	74	77,5	83

Как следует из табл. 8, скорости резания для периодов стойкости $T=30\div 60$ мин, подсчитанные по развернутой формуле (14), довольно хорошо совпадают со скоростями резания, полученными по частным формулам (см. табл. 7). Это показывает, что формула (14) выведена правильно, и в указанных диапазонах t , s , v она может быть использована для расчетов режимов резания.

7. Экспериментальная проверка формул для расчета режимов резания

Все испытания, на основании которых получены частные формулы, приведенные в табл. 7 и развернутая формула (14), были кратковременными. Продолжительность стойкостных испытаний находилась в пределах от 1,4 мин до 15,4 мин или в среднем 7,2 мин.

Для проверки правильности формул ускоренного метода были проведены контрольные испытания (табл. 9) до полного затупления резца ($h_3=1,0$ мм).

Таблица 9

Сравнительные данные о фактических скоростях резания при контрольных стойкостных испытаниях и подсчитанных для фактических периодов стойкости по формулам ускоренного метода

Режим резания			Фактическая стойкость T (при $h_3=1,0$ мм) мин	Скорость резания в м/мин	
t мм	s мм/об	v м/мин		по частным формулам	по формуле (14)
0,5	0,2	212	30	193	202
1,5	0,40	138	30	140	126
1,5	0,40	170	18	166	148
1,5	0,95	97,5	15	91,6	93,5

Как видно из табл. 9, расхождения между фактическими скоростями резания и расчетными незначительны и вполне укладываются в обычное поле рассеивания экспериментальных точек.

Следовательно, ускоренный метод установления режимов резания позволяет в 4—5 раз сократить время, затрачиваемое на исследование, и расход обрабатываемого материала при вполне удовлетворительной точности результатов.

8. Другие способы получения стойкостной зависимости

При разработке режимов резания по ускоренному методу можно получать также зависимости радиального износа от времени работы, скорости резания и других параметров. Одна из таких зависимостей приведена на рис. 10 и может быть выражена формулой

$$h_r = 107 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0,87} \cdot v^{2,12} \text{ мк.} \quad (15)$$

Подобные формулы позволяют увязывать режимы резания с точностью обработки, что облегчает проектирование и отладку автоматических станочных линий. Знание закономерностей радиального износа резца дает возможность технологам при разработке технологического процесса рассчитывать точность обработки, в то время как обычные стойкостные формулы таких возможностей не дают.

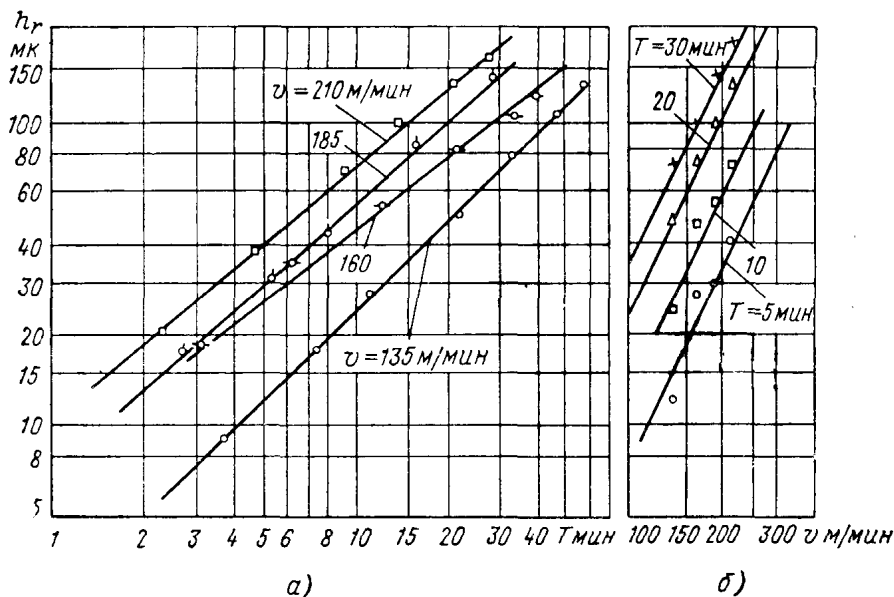


Рис. 10. Зависимости радиального износа резца:

а—от времени его работы; б—от скорости резания.
Сталь 40Х, резец Т15К6

Из уравнения (15) легко могут быть выведены обычные стойкостные формулы, а именно решив уравнение (15) относительно v , получим

$$v = \frac{h_r^{1/2,12} \left(\frac{106}{107} \right)^{1/2,12}}{T^{0,87/2,12}}. \quad (16)$$

Приняв в качестве критерия затупления радиальный износ $h_{rk} = 100 \text{ мк}$ и подставив его в формулу (16), получим обычную стойкостную зависимость

$$v = \frac{646}{T^{0,41}}. \quad (17)$$

Уравнение (15) по сравнению с выражением (17) более универсальное и может быть использовано как конструктором, так и технологом.

Аналогичную формулу $v = f(T)$ можно получить также из зависимости износа резца по задней грани от продолжительности резания

и скорости [21]. На основании тех же самых испытаний (сталь 40X, резец Т15К6; $t=1,50$ мм; $s=0,20$ мм/об) для износа резца по задней грани (рис. 11) имеем

$$h_3 = 2,45 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,66} \cdot v^{1,60} \text{ мм.} \quad (18)$$

Отсюда

$$v = \frac{h^{1/1,60} \left(\frac{10^5}{2,45} \right)^{1/1,60}}{T^{0,66/1,60}} \text{ м/мин.} \quad (19)$$

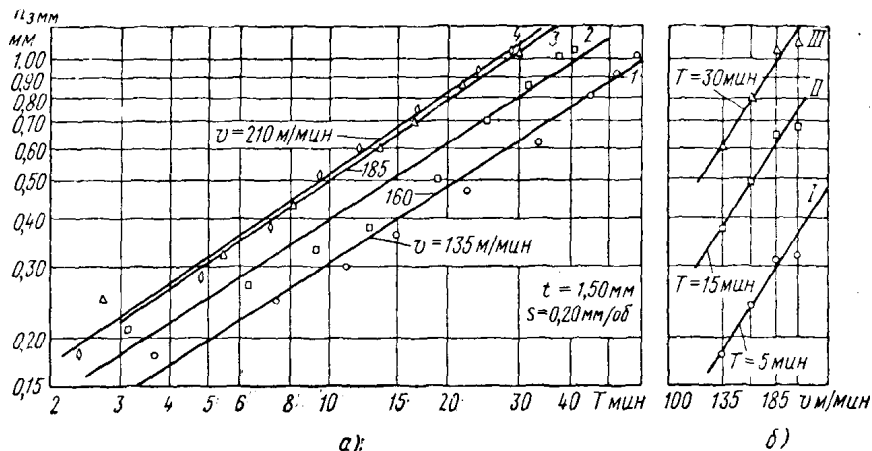


Рис. 11. Зависимости износа резца по задней грани:
а—от времени его работы; б—от скорости резания.

Сталь 40X, резец Т15К6

Если в формулу (19) вместо h_3 подставить принятую за критерий затупления величину $h_{3,к}=0,80$ мм, получим

$$v = \frac{660}{T^{0,41}} \text{ м/мин.} \quad (20)$$

Зависимость $v-T$ можно также получить, если стойкость резца определять по точкам кривых радиального износа, соответствующим принятому критерию затупления $h_{r,к}$. Так, в одной и той же серии испытаний получена зависимость

$$v = \frac{642}{T^{0,41}} \text{ м/мин.} \quad (21)$$

Наряду с обычным, так называемым классическим, и ускоренным методами (см. табл. 5) формулы $v-T$ могут быть получены еще тремя способами. При этом обращает на себя внимание полное совпадение показателей относительной стойкости и довольно близкое совпадение постоянных коэффициентов. Оценка возможных способов получения зависимости $v-T$ приведена в табл. 10.

Способы получения стойкостной зависимости и их характеристика

Способ получения стойкостной зависимости $v = \frac{C}{T^m}$	Определение периода стойкости реза	Степень использования кривой износа	Как получается формула	$\frac{v}{C} = \frac{1}{T^m}$ Формула	Скорости резания в м/мин		
					v_{60}	v_{45}	v_{30}
По кривым износа задней грани $h_z = f(T)$	По графику $h_z = f(T)$ при приня- том критерии затуп- ления	Используется только одна точка кривой из- носа $h_z = f(T)$, соответ- ствующая принятому критерию затупления	Непосредственно из графика $v-T$ в логарифмических ко- ординатах	$\frac{655}{T^{0.41}}$	122	137,5	162
По кривым ради- ального износа $h_r = f(T)$	По графику $h_r = f(T)$ при приня- том критерии затуп- ления	Используется только одна точка кривой из- носа $h_r = f(T)$, соответ- ствующая принятому критерию затупления	То же	$\frac{642}{T^{0.41}}$	120	135	159
На базе законо- мерностей износа реза по задней гра- ни $h_z = C_1 T^{x_1} v^{y_1}$	Не определяется	Используется вся кривая износа по зад- ней грани	Путем решения уравнения $h_z = C_1 T^{x_1} v^{y_1}$, относи- тельно v и подстанав- ки вместо h_z крите- рия затупления $h_{z,k}$	$\frac{660}{T^{0.41}}$	123	138,7	163,5
На базе законо- мерностей радиаль- ного износа $h_r = C_2 T^{x_2} v^{y_2}$	Не определяется	Используется вся кривая радиального из- носа реза	Путем решения уравнения $h_r = C_2 T^{x_2} v^{y_2}$, относи- тельно v и подста- новки вместо h_r кри- терия затупления $h_{r,k}$	$\frac{646}{T^{0.41}}$	121	136	160
Сокращенный спо- соб	По начальному ра- диальному износу h_n и относительно износу $h_{o,n}$ найденному лишь на начальном участке периода нормального износа	Используется лишь небольшой участок кривой радиального из- носа	Непосредственно из графика $v-T$ в логарифмических ко- ординатах	$\frac{624}{T^{0.41}}$	116,5	131	155

9. Возможности дальнейшего сокращения стойкостных испытаний

Каждое испытание при ускоренном установлении стойкостных зависимостей включает в себя период приработки, примерно равный по продолжительности второму периоду, необходимому для определения относительного износа (см. рис. 3). Весьма заманчиво

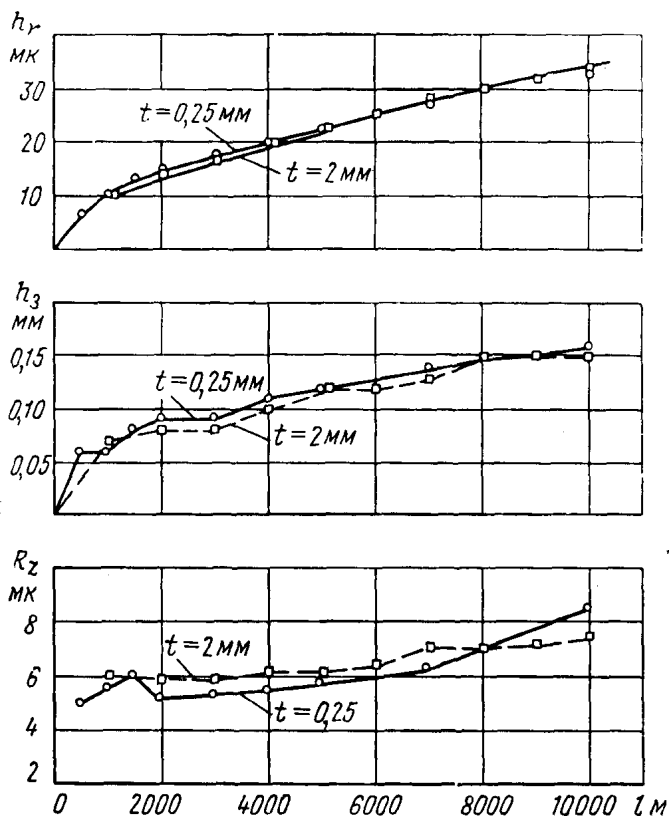


Рис. 12. Влияние длины пути резания на радиальный износ реза, ширину фаски износа по задней грани и высоту неровностей обработанной поверхности.

Сталь осевая, резец Т30К4

с точки зрения сокращения продолжительности стойкостных опытов и экономии обрабатываемого материала проверить возможность получения за период работы инструмента до полного его затупления данных о величине относительного износа для 5—7 скоростей резания или подач.

Такая проверка проведена при точении осевой стали. Так как предварительными опытами установлено весьма слабое влияние глубины резания на радиальный износ, а также на ширину фаски

износа по задней грани и шероховатость обработанной поверхности (рис. 12), то в целях экономии стали стойкостные испытания проводились с постоянной глубиной резания, равной 0,25 мм.

Была проведена серия опытов с последовательно изменяемой в периоде нормального износа резца скоростью резания (рис. 13) и две серии опытов с последовательно изменяемой подачей (рис. 14).

Длина пути резания между остановками процесса резания в этих опытах составляла 500 м. Изменение скорости резания, или

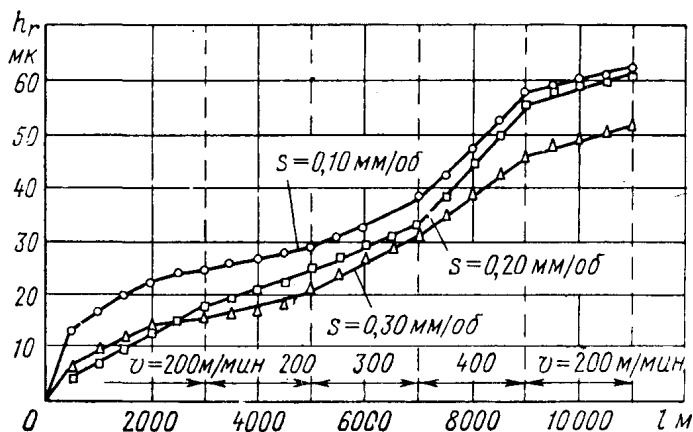


Рис. 13. Влияние длины пути резания и скорости резания на радиальный износ резца.

Сталь осевая, резец ТЗ0К4; $t=0,25$ мм

подачи, проводилось через каждые 2000 м пути резания. Период приработки составлял 3000 м. Испытания заканчивались при прохождении длины пути резания, равной 11 000 м. За период нормального износа скорости резания и подачи изменялись 4 раза. Однако за счет сокращения отрезка пути резания с постоянной скоростью, или постоянной подачей, и некоторого увеличения общей длины пути резания имеется полная возможность изменять v или s пять-семь раз за одно затупление резца.

Указанные опыты проводились параллельно с обычными стойкостными испытаниями (см. рис. 2), длина пути резания в которых была принята 10 000 м. Все испытания проводились одним и тем же резцом, оснащенным пластинкой твердого сплава.

Опыты показали (табл. 11), что расхождения между величинами относительных износов, полученными при длительных стойкостных испытаниях и в опытах с последовательно изменяемой скоростью резания или подачей, весьма незначительны и укладываются в обычное при подобных испытаниях поле рассеивания экспериментальных точек.

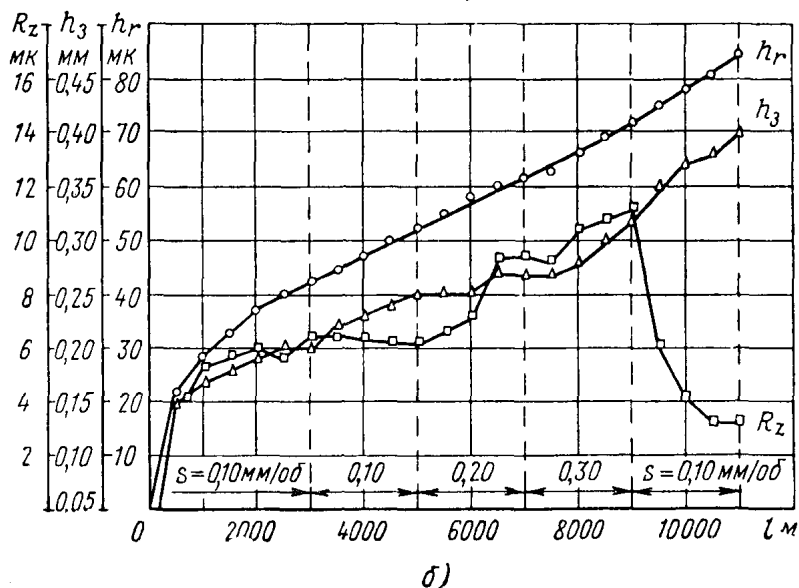
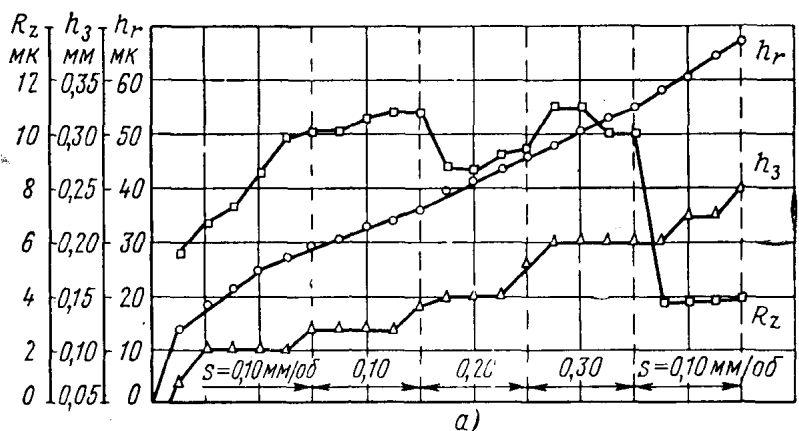
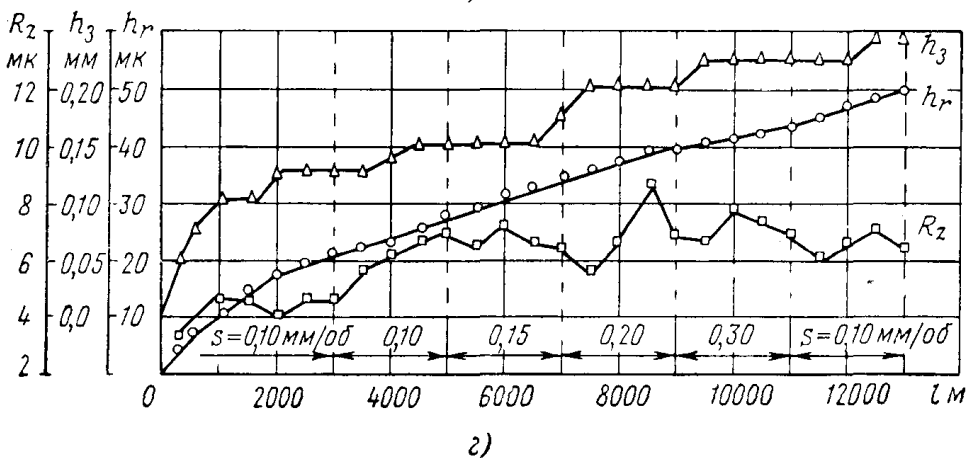
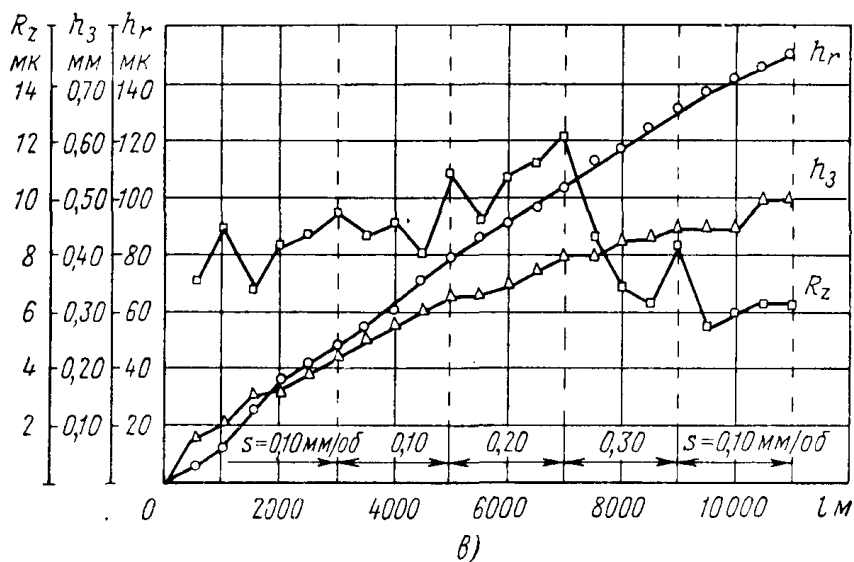


Рис. 14. Зависимость радиального износа, износа по задней дачи при точении

а—резец Т30К4, $v=300$ м/мин; б—резец Т30К4, $v=400$ м/мин; в—резец



границы и высоты неровностей от пути резания и изменения по-
осевой стали:

Т15К6, $v=150$ м/мин; z —резец ЦМ332, $v=400$ м/мин.

Наблюдения за износом резца при последовательном изменении скоростей резания или подач показывают, что в первом случае могут быть получены более точные результаты.

Таблица 11

Сравнительные величины длины пути резания и относительного износа при длительных и кратковременных испытаниях
(сталь осевая, резец Т30К4, $t=0,25$ мм)

s мм/об	v м/мин	Длительные испытания		Кратковременные испытания	
		l м	$h_{с.л}$ мк/км	l м	$h_{с.л}$ мк/км
0,10	200	10000	2,5	2000	2,4
0,20	200	10000	1,75	2000	2
0,10	300	10000	3,0	2000	3,5
0,20	300	10000	4,25	2000	4,0
0,30	300	10000	4	2000	5,0
0,20	400	9000	5,7	1000	6,0

Это связано с тем, что поверхность износа резца со стороны задней грани имеет волнистый характер с шагом волн, равным величине подачи. При каждом изменении подачи происходит своего рода частичная приработка и образование новых волн с шагом, соответствующим новой подаче. Интенсивность радиального износа в начальный момент после изменения подачи может несколько возрасти за счет более быстрого износа выступающих гребешков (волн). Необходимо отметить, что при работе с переменными подачами шероховатость обработанной поверхности при повышении подачи в ряде случаев не только не возрастает, а даже имеет тенденцию к некоторому снижению.

Особенно это проявляется после первой остановки процесса резания при работе на новой подаче (рис. 14, в и г).

10. Основные выводы

1. При тонком, чистовом и получистовом точении стали резцами, оснащенными твердосплавными или минералокерамическими пластинками, наиболее закономерно протекает во времени размерный износ резца.

2. В отличие от всех других элементов износа резца размерный износ непосредственно связан с точностью обработки.

3. Размерный износ может быть измерен с большей точностью, чем ширина фаски износа по задней грани или глубина лунки на передней грани.

4. Размерный износ может измеряться без снятия резца со станка, что повышает точность измерения. Для указанных целей следует пользоваться специальным прибором, конструкция которого описана выше.

5. Стойкостные зависимости при чистовом и тонком точении, полученные из закономерностей размерного износа, более точны, чем получаемые в настоящее время из закономерностей износа резца по задней грани.

6. Интенсивность размерного износа резца, определяемая величиной относительного износа, на протяжении всего периода так называемого нормального износа резца практически не зависит от длины пути резания и абсолютной величины размерного износа. Поэтому достаточно определять величину относительного износа лишь по начальному участку нормального износа. Указанное положение лежит в основе ускоренного метода определения обрабатываемости и установления стойкостных зависимостей и дает возможность за одно затупление резца получить величину относительного износа для 5—7 различных скоростей резания или подач.

7. Работа со скоростями резания, последовательно изменяемыми за время работы резца до затупления, дает более точные значения относительного износа, чем работа на переменных подачах.

8. При определении относительного износа методом работы на изменяемых скоростях резания отпадает необходимость в отборе резцов по стойкости, так как весь комплекс испытаний, как показал опыт, может быть выполнен одним резцом.

9. Закономерности размерного износа инструмента, помимо ускоренного установления обычных стойкостных зависимостей, могут использоваться для расчетов точности обработки и для создания новых нормативов по режимам резания, позволяющих увязывать выбор скоростей резания и подач с требуемой точностью обработки.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ НА РАЗМЕРНУЮ СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

1. Характеристики размерной стойкости инструмента

Размерная стойкость инструмента весьма важна для анализа вопросов, связанных с работоспособностью инструмента в условиях автоматизированного производства [9], [88], [98]. Обычные характеристики ее — время работы без подналадки или замены инструмента, количество обработанных деталей без подналадки инструмента, длина пути резания, площадь обработанной поверхности и линейный относительный износ являются частными и в общем случае не пригодны для решения задач оптимального ведения автоматических процессов обработки металлов резанием.

Более объемлющими являются новые характеристики размерной стойкости: скорость размерного износа, поверхностный относительный износ и удельная размерная стойкость [62], [69].

Под скоростью размерного износа понимается скорость укорочения инструмента в радиальном направлении в периоде нормального износа, т. е.

$$v_h = \frac{dh_r}{dT} = \frac{h_r - h_n}{T - T_n} = \frac{vh_{o.п}}{1000} = \frac{vsh_{o.п}}{100} \text{ мк/мин.} \quad (22)$$

Поверхностным относительным износом называется радиальный износ инструмента, отнесенный к 1000 см² обработанной поверхности, т. е.

$$h_{o.п} = \frac{dh_r}{d\Pi} = \frac{(h_r - h_n) 100}{(l - l_n) s} \text{ мк}/(10^3 \times \text{см}^2). \quad (23)$$

Удельной размерной стойкостью называется площадь поверхности, которую способен обработать инструмент на 1 мк нормального радиального износа

$$T_{y.p} = \frac{d\Pi}{dh_r} = \frac{1}{h_{o.п}} = \frac{(l - l_n) s}{(h_r - h_n) 100} (10^3 \times \text{см}^2)/\text{мк.} \quad (24)$$

Поверхностный относительный износ и удельная размерная стойкость являются универсальными характеристиками, так как они позволяют объективно сопоставлять режущие свойства различных инструментальных материалов при любых сочетаниях подач и скоростей резания и разных критериях затупления. Оценка различных характеристик размерной стойкости дана в табл. 12, где знак + означает, что при сравнении режущих инструментов или вариантов режима резания по данной характеристике должно соблюдаться равенство ограничивающих факторов. Так, например, нельзя по величине площади обработанной поверхности делать заключение о преимуществах того или иного резца, если они были доведены до разной степени затупления.

Таблица 12

**Характеристики размерной стойкости инструмента
и обрабатываемости металлов резанием**

Наименование характеристики	Формула или обозначение	Факторы, ограничивающие возможность использования характеристик				Возмож- ность ис- пользо- вания для рас- чета точности обработ- ки
		ско- рость реза- ния v	пода- ча s	размеры обраба- тывае- мых де- талей (или по- верхно- стей)	величина износа инстру- мента (h_s или h_r), принятая в качест- ве кри- терия за- тупления	
Время работы без подналадки или замены инст- румента в мин	T	+	+	—	+	нет
Количество об- работанных дета- лей без подналад- ки инструмента в шт.	N	—	—	+	+	нет
Длина пути ре- зания в м	$l = vT$	—	+	—	+	нет
Площадь обра- ботанной поверх- ности в см ²	P	—	—	—	+	нет
Линейный отно- сительный износ в мк/см	$h_{o.l} = \frac{(h_r - h_n) 1000}{l - l_n}$	—	+	—	—	да

Наименование характеристики	Формула или обозначение	Факторы, ограничивающие возможность использования характеристик				Возмож- ность ис- пользо- вания для рас- чета точности обработ- ки
		ско- рость реза- ния v	пода- ча s	размеры обраба- тывае- мых деталей (или по- верхно- стей)	Величина износа инстру- мента (h_z или h_r), принятая в качест- ве кри- терия за- тупления	
Скорость раз- мерного износа в мк/мин	$v_h = \frac{v \cdot h_{0,л}}{1000}$	+	+	—	—	да
Поверхностный относительный из- нос в $\text{мк}/(10^3 \times \text{см}^2)$	$h_{с.п} = \frac{(h_r - h_n) 100}{(l - l_n) s}$	—	—	—	—	да
Удельная раз- мерная стойкость в $(10^3 \times \text{см}^2)/\text{мк}$	$T_{у.р} = \frac{(l - l_n) s}{(h_r - h_n) 100}$	—	—	—	—	да

2. Влияние скорости резания и подачи на характеристики размерной стойкости инструмента

Стойкостные формулы степенного вида, рассмотренные в гл. I, справедливы лишь для узкого диапазона скоростей резания. Анализ отечественных и иностранных экспериментальных данных показывает, что при изменении скорости резания в широком диапазоне для различных процессов обработки резанием (точение и растачивание, отрезка, цилиндрическое и торцовое фрезерование, зенкерование и развертывание, скоростное нарезание резьбы и зубофрезерование) при обработке различных материалов (углеродистые и легированные стали, закаленные стали, жаропрочные стали и сплавы, молибденовые и титановые сплавы, чугун) инструментами из углеродистых инструментальных и быстрорежущих сталей, а также инструментами, оснащенными твердым сплавом, минералокерамикой и алмазом, зависимость длины пути резания от скорости $[l = vT = f(v)]$ носит экстремальный характер. [1], [4], [6].

Положение точек максимума на кривых $l = f(v)$ зависит от физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и условий резания (рис. 15, а, б, в).

При повышении режущих свойств инструментальных материалов повышаются оптимальные скорости резания, при которых на-

блюдается максимум пройденного инструментом пути резания или минимум интенсивности износа инструмента.

Оптимальная скорость резания при обработке различных по своим свойствам материалов колеблется в широких пределах от 10—30 м/мин при обработке закаленных сталей и жаропрочных сплавов твердосплавным инструментом до 300—350 м/мин при обработке углеродистых сталей минералокерамическим инструментом.

Подавляющее большинство исследований, в которых были выявлены оптимальные скорости резания, проводилось при каком-то одном постоянном сечении срезаемого слоя. Анализ немногочисленных исследований, которые проводились при различных сечениях срезаемого слоя, показывает, что снижение сечения среза приводит к повышению оптимальных скоростей резания.

Для установления взаимосвязей между величиной оптимальной скорости резания и подачей требуется постановка специальных исследований.

При экстремальности зависимостей размерной стойкости от скорости резания [$l=f(v)$] зависимость периода стойкости от скорости резания [$T=f(v)$] во многих случаях может быть монотонно убывающей. Максимум размерной стойкости инструмента и максимум общей стойкости наблюдаются при различных скоростях, а следовательно, и температурах в зоне резания (рис. 16, а, б, в).

Оптимальные скорости резания могут быть выявлены на основе обычных стойкостных испытаний по кривым $T=f(v)$, при исследовании интенсивности размерного износа по кривым $h_{0,л}=f(v)$, а также при исследовании интенсивности износа с помощью радиоактивных изотопов [34], [76].

Недостатком метода радиоактивных изотопов по сравнению с микрометрическим методом исследования интенсивности размерного износа является то, что он не дает абсолютных величин относительного износа, знание которых требуется при проектировании и наладке оборудования и при расчете точности технологических процессов.

Чем ниже обрабатываемость металла резанием или чем ниже режущие свойства инструментального материала, тем уже диапазон оптимальных скоростей резания и тем важнее становится их определение.

Оптимальная скорость резания может быть определена также по кривым $T=f(s)$ и $l=f(s)$, если указанные кривые имеют точки максимума или точки перелома (рис. 17, а, б и 18, а, б). При экстремальности функции $T=f(s)$ максимумы общей и размерной стойкости наблюдаются при различных значениях подач — максимум размерной стойкости соответствует большей подаче, чем максимум общей стойкости. На графиках $T-v$ и $T-s$ линии постоянной общей стойкости располагаются горизонтально, а линии постоянной размерной стойкости под углом 45° к осям ординат.

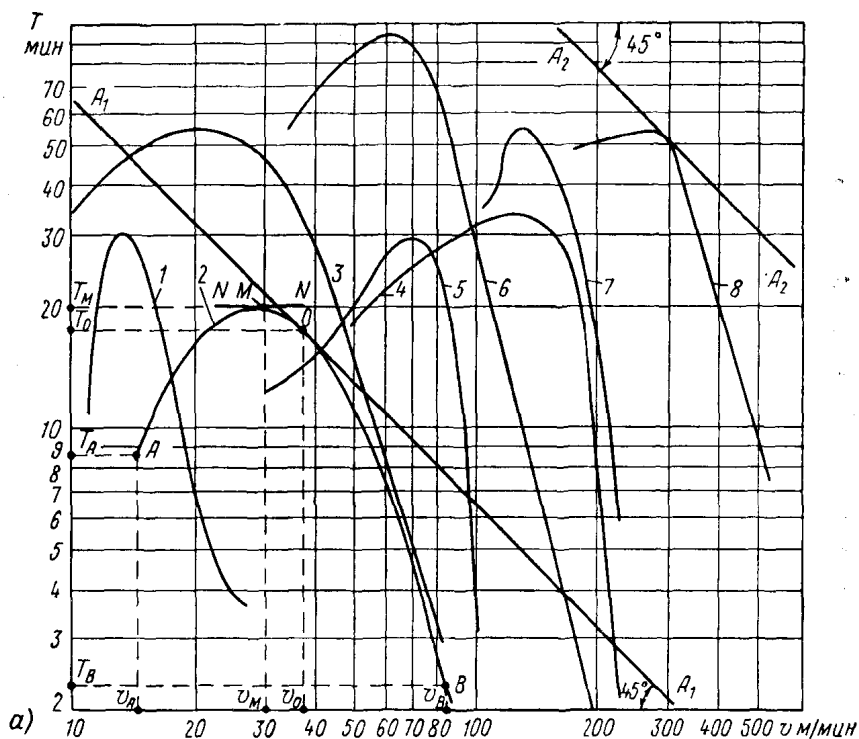
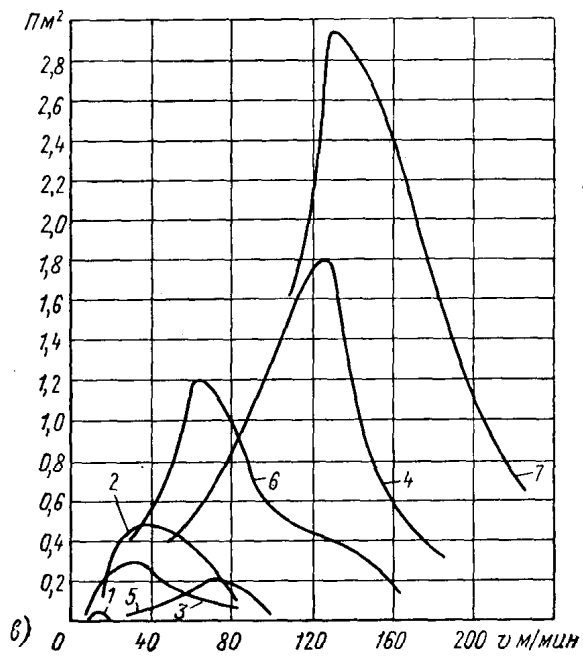
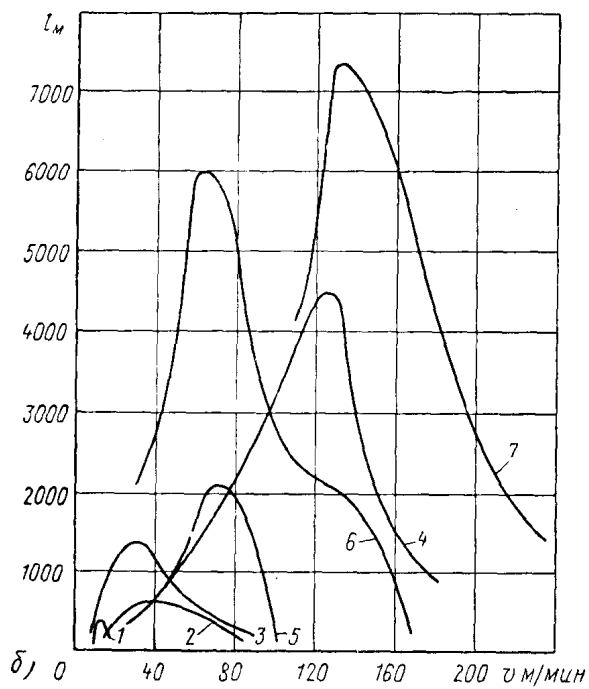
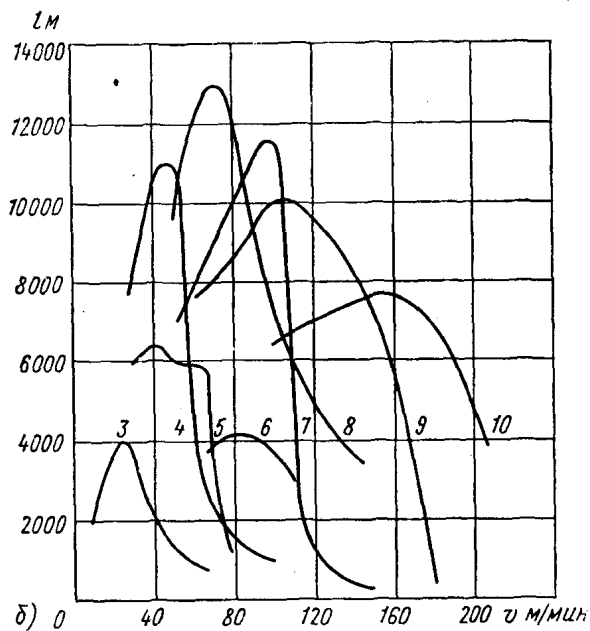
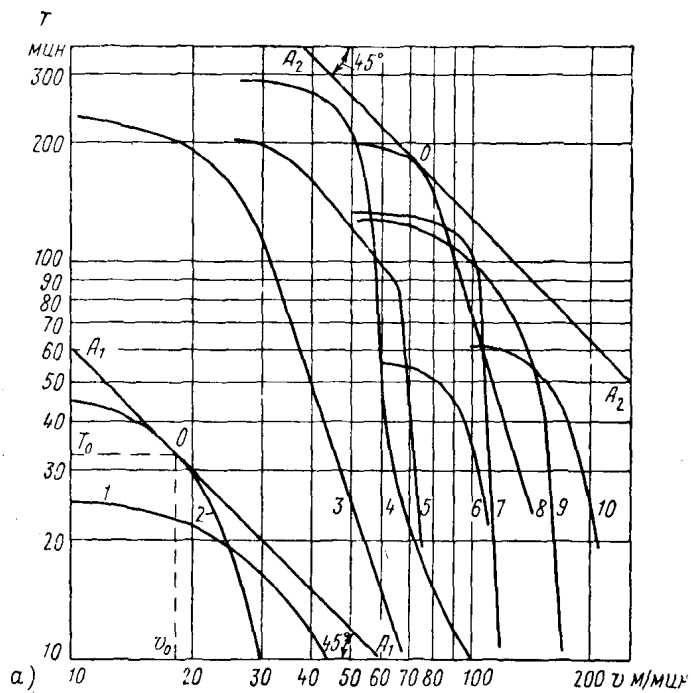


Рис. 15. Зависимость между скоростью резания и характеристиками размерной стойкости инструмента по данным различных исследователей:

1—Макаров сталь ЭХ12М (HRC 60—61), резец Т15К6; $t=0,50$ мм, $s=0,12$ мм/об;
 2—Смирнов сталь 60, резец ВК8В, $t=1,5$; $s=0,78$; 3—Малкин сталь ОХНЧМ (HRC 51—53), резец ВК8, $t=0,50$, $s=0,22$; 4—Макаров сталь 1Х18Н9Т, резец Т14К8, $t=0,50$, $s=0,40$; 5—Смирнов сталь 60, резец ВК8В, $t=1,5$, $s=0,40$; 6—Макаров сталь 1Х18Н9Т, резец ВК6, $t=0,5$, $s=0,20$; 7—Макаров сталь 40Х, резец Т15К6, $t=1,5$, $s=0,40$ мм/об; 8—Вульф сталь 45, резец ЦМ332, $t=1,0$ мм; $s=0,10$ мм/об





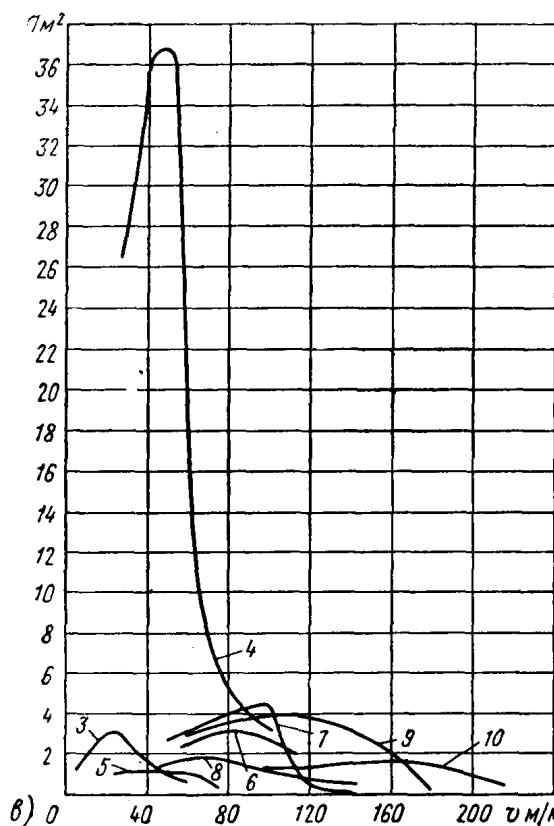


Рис. 16. Зависимость между скоростью резания и характеристиками размерной стойкости инструмента по данным различных исследователей:

- 1—Курочкин сталь ЭИ617, резец ВК4; $t=0,25$ мм, $s=0,12$ мм/об;
- 2—Макаров сплав ЭИ437А, резец ВК8, $t=0,25$, $s=0,20$;
- 3—Смирнов сталь 60, резец ТТ7К12, $t=1,5$; $s=0,78$;
- 4—Резников сталь 45, резец Т15К6, $t=2,4$, $s=3,35$;
- 5—Можаяев сталь ОХНЗМФА (НВ 440), резец Т15К6Т, $t=2$; $s=0,20$;
- 6—Даниелян сталь 45, резец Т5К10, $t=3$, $s=0,75$;
- 7—Резников сталь 1Х18Н9Т, резец ВК8, $t=2$, $s=0,40$;
- 8—Макаров сталь 1Х18Н9Т, резец ВК4, $t=0,50$, $s=0,15$;
- 9—Резников сталь 2Х13, резец ВК8, $t=2$, $s=0,40$;
- 10—Макаров сталь 40Х, резец Т15К6, $t=5$ мм, $s=0,20$ мм/об

Наличие точек перелома или точек максимума на кривых $T-s$ не является особенностью лишь жаропрочных сталей и сплавов, как считали отдельные исследователи, а свойственно также углеродистым и легированным сталям и чугунам, при применении быстрорежущего, твердосплавного и минералокерамического инструмента, если подача изменяется в достаточно широких пределах [32], [33], [37].

Чем выше скорость резания, при которой ведется обработка, тем при меньшей подаче наступает перелом кривой $T-s$ и тем ниже период стойкости, соответствующий точке перелома (оптимальной подаче) [37].

Наивысшую размерную стойкость при выбранной подаче обеспечивает работа на скорости резания, соответствующей точке касания кривой $T-v$ и прямой, проходящей под углом 45° к осям T и v [63].

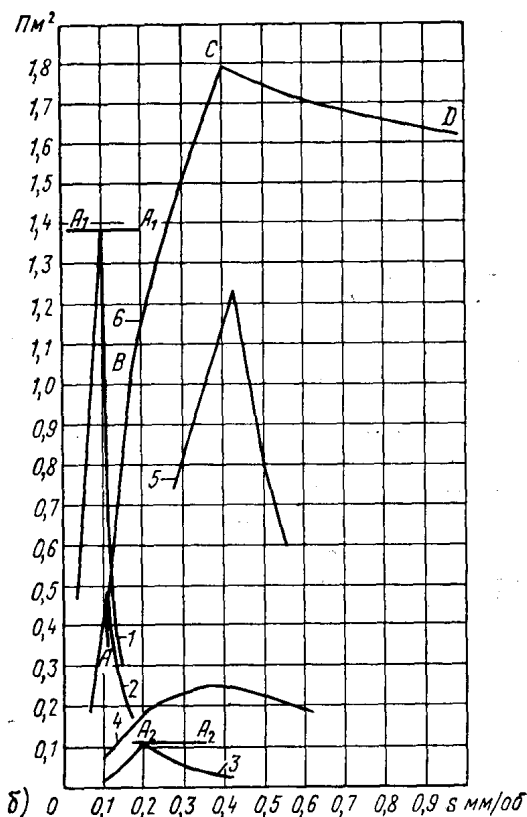
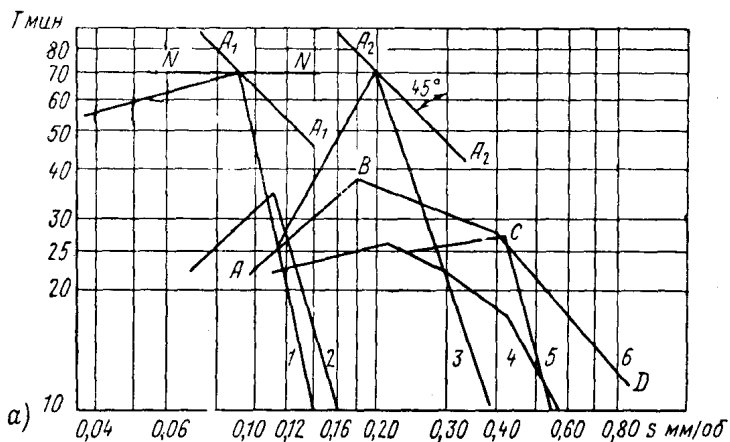


Рис. 17. Зависимость между величиной подачи и характеристиками размерной стойкости инструмента по данным различных исследователей:

- 1—Каширин сталь ЭЯЗС, резец Т15К6, $t=2.5 \text{ мм}$, $v=220 \text{ м/мин}$;
- 2—Чубаров и Сохор сплав ВТЗ-1, резец ВК2, $t=0.5$, $v=125$;
- 3—Вершинская и Андреев стеллит, резец ВК8, $t=2.5$, $v=8$;
- 4—Вульф и Ильин сталь ЭИ787, резец ВК6М, $t=1.5$, $v=35$;
- 5—Вульф, Шифрин и Шанман сталь 45ХНМФА, резец Т15К6, $t=3$, $v=110$;
- 6—Навроцкий стальное литье 45Л, резец Т14К8, $t=1 \text{ мм}$, $v=165 \text{ м/мин}$.

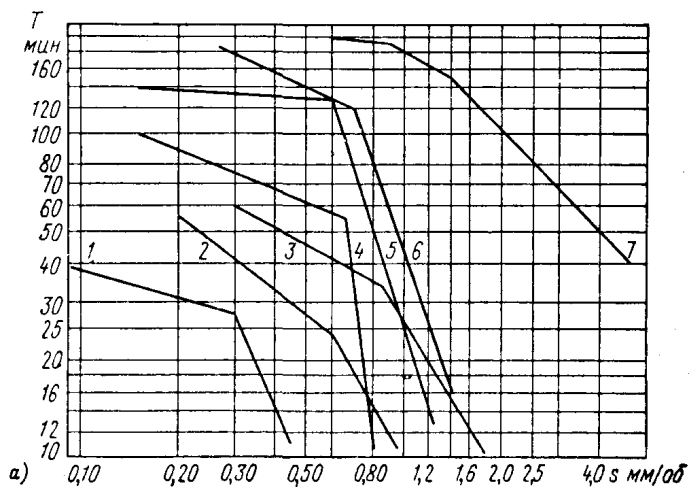
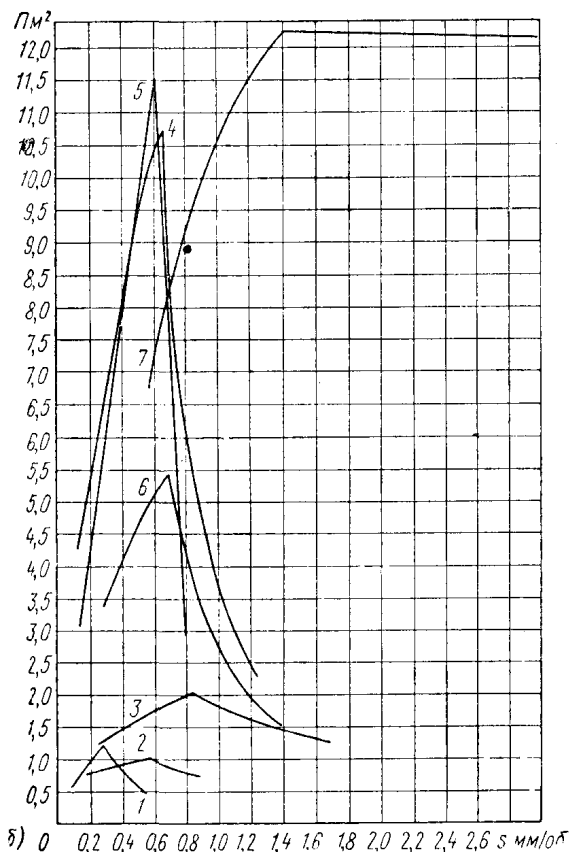


Рис. 18. Зависимость между величиной подачи и характеристиками размерной стойкости инструмента по данным различных исследователей:

- 1—Ткачевский, сталь легированная (НВ 330), резец ЦМ332, $t=2$ мм, $v=150$ м/мин;
- 2—Артамонов, чугун (НВ 241), резец ВК6; $t=1$, $v=70$;
- 3—Артамонов, чугун НВ 229, резец ВК6; $t=2$, $v=70$;
- 4—Исаев, Зорев, Кучма, чугун СЧ18-36, резец ЦМ332; $t=1$, $v=300$;
- 5—Исаев, Зорев, Кучма, сталь 5ХНМ, резец керамический Л1-2; $t=1$, $v=140$;
- 6—Добронович, чугун (НВ 210), резец ВК2, $t=3$, $v=65$;
- 7—Резников, сталь 45, резец Т15К6; $t=2,4$ мм, $v=60$ м/мин



Точно так же подача, соответствующая точке касания кривой $T-s$ и прямой, проходящей под углом 45° к осям T и s , обеспечивает наивысшую размерную стойкость при работе на выбранной (или заданной) скорости резания.

Главным фактором, обуславливающим экстремальный характер зависимости $T=f(v)$, является рост температуры в зоне резания и связанное с этим изменение характера износа. При повышении скорости резания, как и при повышении температуры предварительного подогрева повышается температура резания и при некотором ее значении выявляется максимум стойкости [53].

Установление оптимальной величины произведения $s \cdot v$, обеспечивающей наивысшую размерную стойкость инструмента, является важным резервом повышения точности обработки, снижения расхода инструмента и повышения экономической эффективности автоматизации процессов обработки резанием.

Используемые для этого обычные стойкостные испытания являются весьма трудоемкими и требуют значительного расхода обрабатываемого материала, поэтому разработка ускоренных методов определения оптимальных сочетаний s и v , обеспечивающих максимум размерной стойкости инструмента, является исключительно актуальной задачей.

Глава III

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ПОДАЧ И СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ

1. Характер зависимости стойкости инструмента от скорости резания при различных подачах

Автоматизация машиностроительного производства и применение многоинструментных станков вызывают необходимость расширения диапазона практически используемых скоростей резания и подач. Поэтому выяснение характера зависимостей $T=f(v)$ при изменении скоростей резания в широких пределах имеет большое практическое значение.

Наши исследования показали, что если скорость резания изменять в широких пределах, то при применении резцов, оснащенных различными марками твердых сплавов, зависимости $T=f(v)$ представляют собой или прямые участки с точками перелома, или плавные кривые, имеющие точки максимума. Для примера на рис. 19, а представлены экспериментальные данные о влиянии скорости резания на период стойкости резца Т30К4 при точении стали 1Х18Н9Т с различными подачами, откуда видно, что зависимость $T=f(v)$ более или менее близка к прямой лишь в узком диапазоне сравнительно высоких скоростей резания. Характерно, что чем выше подача, тем при меньшей скорости резания начинается перегиб линий $T=f(v)$. Так, при работе с подачей 0,10 мм/об точка перелома соответствует скорости резания 151 м/мин, а для подачи 0,40 мм/об — скорости резания 100 м/мин.

Участки кривых $T=f(v)$, расположенные левее точек перелома, имеют совершенно иной характер. Здесь снижение скоростей резания не сопровождается сколько-нибудь существенным повышением периода стойкости, а в ряде случаев наблюдается даже некоторое снижение периода стойкости.

Аналогичный характер зависимостей $T=f(v)$ получен при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК6 (рис. 19, б). Лишь правые ветви кривых $T=f(v)$ выражаются в виде участков прямой линии, а ле-

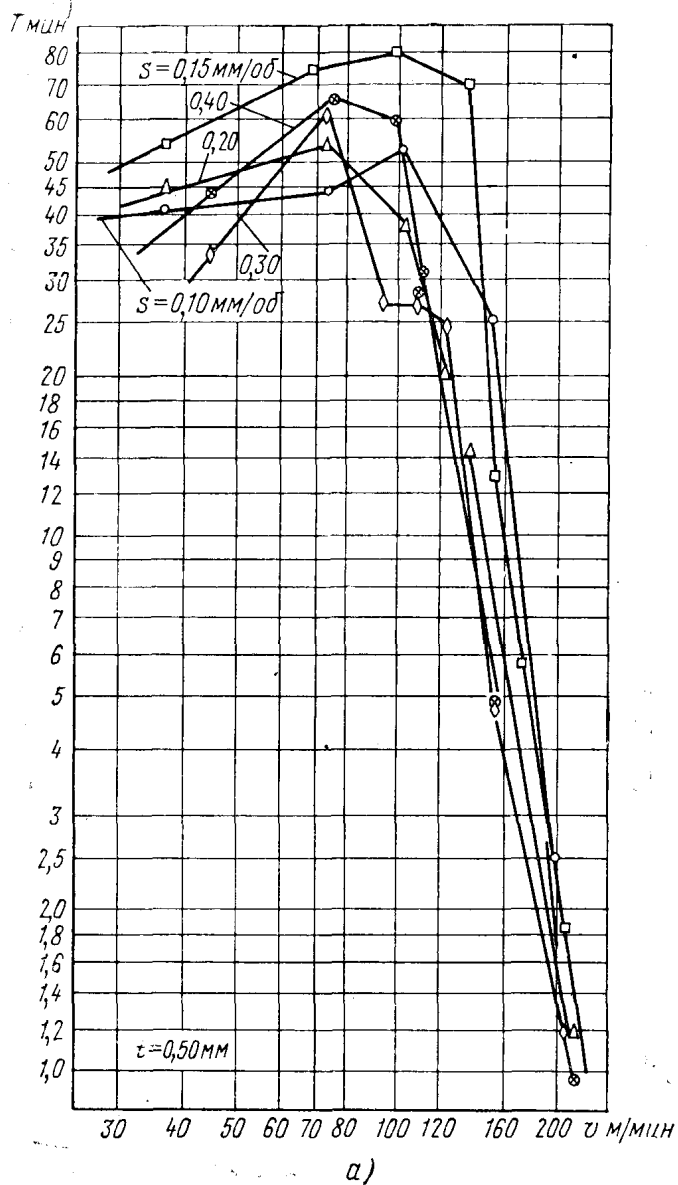
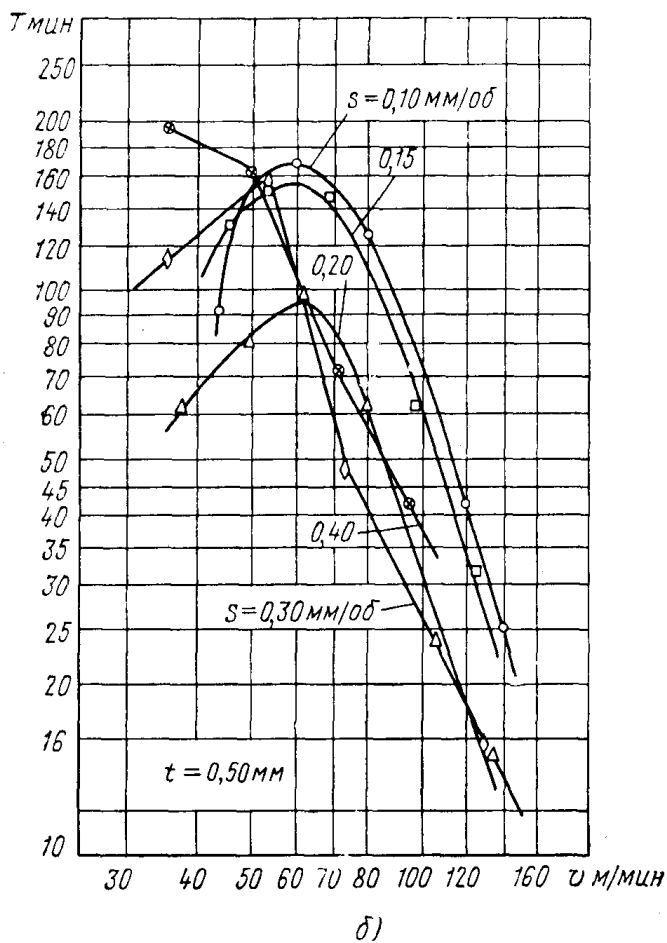


Рис. 19. Влияние скорости резания на период стой-
а—резец Т30К4; б—резец ВК6



кости резца при точении стали 1X18H9T:

вые ветви резко меняют наклон и не подчиняются закону прямой линии.

Сравнение рис. 19, а и 19, б показывает, что кривые $T=f(v)$ для резцов, оснащенных вольфрамотитанокобальтовыми и вольфрам-кобальтовыми твердыми сплавами, имеют принципиально одинаковый характер.

При некоторых сочетаниях подач и скоростей резания наблюдается наибольшая размерная стойкость режущего инструмента. Скорости резания v_0 , соответствующие максимальной размерной стойкости, выше скоростей резания v_m , соответствующих максимуму периода общей стойкости (табл. 13).

Таблица 13

Сочетания подач и скоростей резания при точении стали 1Х18Н9Т, обеспечивающие максимум размерной стойкости (I вариант) и максимум периода общей стойкости (II вариант)
($t=0,50$ мм; $h_3=0,40$ мм)

Марка твердого сплава	Подача $мм/об$	I вариант (оптималь- ный)			II вариант			$\frac{T_m}{T_0}$	$\frac{l_m}{l}$
		v_0 $м/мин$	T_0 $мин$	l $м$	v_m $м/мин$	T_m $мин$	l_m $м$	%	%
Т30К4	0,10	151	26,4	4 000	75	44	3300	167	82,5
	0,15	136	73,5	10 000	100	80	8000	109	80
	0,40	100	60	6 000	76	66	5000	110	83
Т14К8	0,20	150	36,7	5 500	84	42	3500	114	64
ВК3	0,11	85	82,5	7 000	60,4	92	6000	111,5	86
ВК6	0,15	69	145	10 000	53,4	150	8000	103	80
	0,40	49,3	162	8 000	35,8	195	7000	120	87,5

При работе на втором варианте режимов резания наблюдается повышение периода стойкости по сравнению с первым вариантом, хотя длина пути резания, а следовательно, и количество деталей, которое может быть обработано инструментом за период его стойкости, во втором варианте ниже. Снижение скорости резания ниже оптимальной всегда приводит к снижению размерной стойкости инструмента и точности обработки, хотя период стойкости при этом может несколько повышаться.

Если скорость резания изменять в более или менее широких пределах, то оптимальные скорости резания выявляются при точении

всех исследованных обрабатываемых материалов (углеродистые и легированные стали, жаропрочные стали и сплавы, закаленные стали) твердосплавным и минералокерамическим инструментом.

2. Оптимальная температура резания, рациональная температура контакта и температура резания, соответствующая минимальной себестоимости обработки

Рациональной температурой контакта θ_p , как известно [52], называют температуру контакта, соответствующую максимуму стойкости или, что то же самое, минимуму скорости размерного износа.

Оптимальной же температурой резания θ_o мы [54] называем температуру, соответствующую минимуму относительного износа (линейного и поверхностного). Нетрудно доказать, что минимумы на кривых $v_h = f(v)$ и $h_{o.l} = f(v)$ при экстремальности функции $T = f(v)$ в общем случае наблюдаются при различных скоростях резания, а следовательно, и при различных температурах в зоне резания.

Для определения скорости резания v_m , соответствующей максимуму периода стойкости или минимуму скорости размерного износа, надо первую производную $(v_h)'_v$ по скорости резания приравнять нулю. Так как

$$v_h = \frac{h_{o.l} \cdot v}{1000},$$

то

$$(v_h)'_v = \frac{1}{1000} [v (h_{o.l})'_v + h_{o.l}] = 0.$$

Следовательно, для скорости резания v_m должно выполняться условие

$$v_m (h_{o.l})'_v + h_{o.l} = 0$$

или

$$v_m = - \frac{h_{o.l}}{(h_{o.l})'_v}. \quad (25)$$

Ввиду того, что v_m и $h_{o.l}$ всегда являются положительными величинами, то условие (25) может быть выполнено лишь в том случае, когда $(h_{o.l})'_v$ является отрицательной величиной, что возможно только для левой ниспадающей ветви кривой $h_{o.l} = f(v)$. Следовательно, скорость резания v_m лежит на левой ветви кривой $h_{o.l} = f(v)$, а потому всегда справедливо неравенство $v_m < v_o$. Такое соотношение между скоростями резания v_m и v_o подтверждается и экспериментальными (рис. 20).

На рис. 20, а графически представлены экспериментальные данные о влиянии скорости резания на линейный относительный износ $h_{o.l}$, на скорость размерного износа v_h , на период стойкости T и на себестоимость обработки A при точении стали 1X18H9T ($t=0,5$ мм; $s=0,2$ мм/об) резцами ВК8.

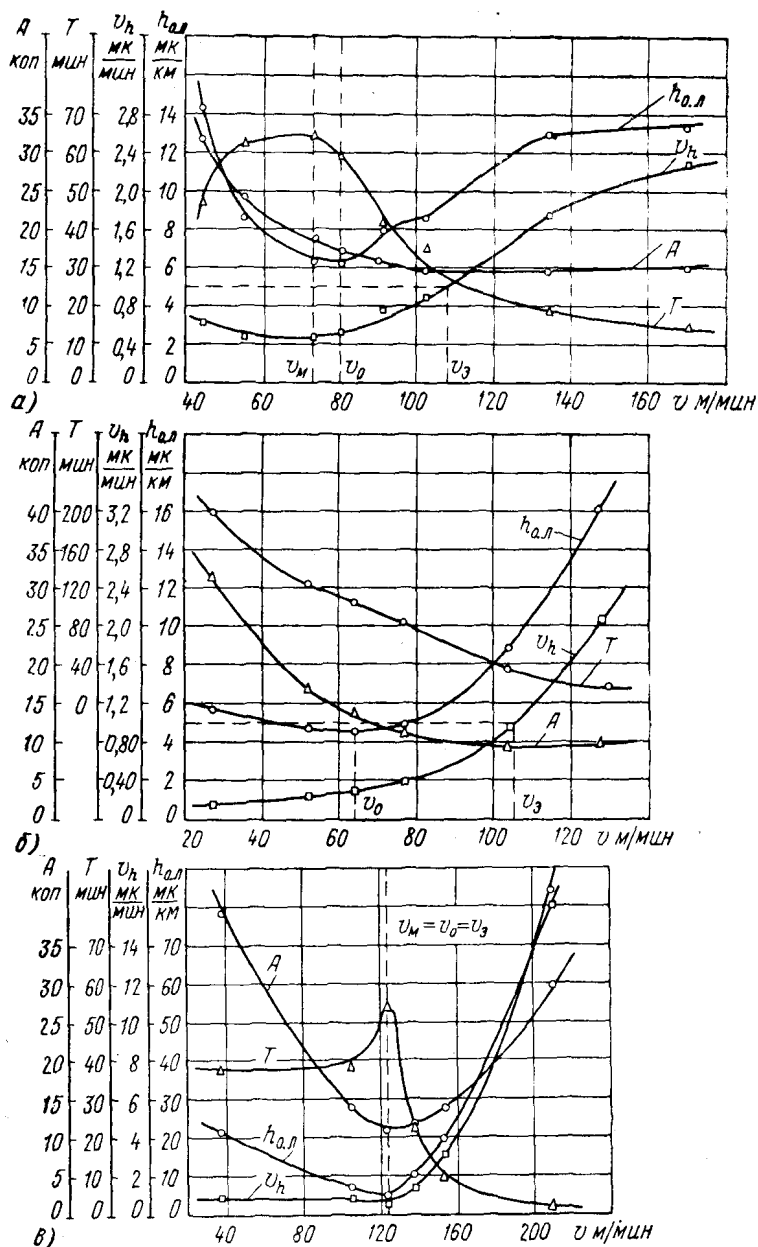


Рис. 20. Влияние скорости резания на линейный относительный износ, скорость размерного износа, период стойкости и себестоимость обработки при точении стали 1X18H9T ($t=0,50$ мм):

а—резец BK8, $s=0,20$ мм/об; б—резец BK3, $s=0,30$ мм/об; в—резец T30K4, $s=0,20$ мм/об

Себестоимость обработки определялась по следующей формуле:

$$A = t_m(a_{\text{раб}} + a_{\text{ст}}) + \frac{t_{\text{см}}}{Q}(a_{\text{раб}} + a_{\text{ст}}) + \frac{S_1}{Q}, \quad (26)$$

где A — сумма переменных элементов себестоимости операции, зависящих от скорости резания, в коп;

t_m — штучное машинное время обработки в мин;

$a_{\text{раб}}$ — минутная заработная плата рабочего с начислениями в коп;

$a_{\text{ст}}$ — затраты, связанные с эксплуатацией станка в течение 1 мин его работы, в коп;

$t_{\text{см}}$ — время на смену затупившегося резца и его подналадку за период его стойкости в мин;

S_1 — стоимость эксплуатации инструмента за период его стойкости в коп;

Q — количество обработанных деталей за период стойкости в шт.

Для расчетов было условно принято*: $a_{\text{раб}} = 1,28$ коп; $a_{\text{ст}} = 1,15$ коп; $t_{\text{см}} = 2$ мин; $S_1 = 13$ коп; площадь обрабатываемой поверхности детали 1000 см^2 .

Рис. 20, а показывает, что зависимости $T = f(v)$ и $v_h = f(v)$ имеют экстремальный характер. При скорости резания v_m , соответствующей рациональной температуре контакта θ_p , наблюдается минимум скорости размерного износа и максимум периода стойкости.

Максимум размерной стойкости и минимум линейного относительного износа наблюдаются при оптимальной скорости резания v_o , которой соответствует оптимальная температура резания θ_o .

Зависимость себестоимости обработки от скорости резания также носит экстремальный характер [73], [115].

Для экономической скорости резания v_a , соответствующей минимуму себестоимости обработки, оптимальной скорости v_o и скорости резания v_m , соответствующей максимуму периода стойкости, в общем случае справедливо следующее неравенство:

$$v_a > v_o > v_m.$$

Аналогичное неравенство можно записать и для температур в зоне резания

$$\theta_a > \theta_o > \theta_p,$$

где θ_a — температура резания, соответствующая экономическому периоду стойкости.

В рассматриваемом примере (см. рис. 20, а) зависимости $v_h = f(v)$ и $h_{0,л} = f(v)$ имеют экстремальный характер.

* Справочник нормировщика машиностроения, том 2, Машгиз, 1961, стр. 29.

Но часто при экстремальности зависимости $h_{0.л}=f(v)$ зависимость $v_h=f(v)$ имеет монотонный характер.

Так из рис. 20, б видно, что при точении стали 1X18H9T резцами ВКЗ ($t=0,5$ мм; $s=0,30$ мм/об) зависимости $T=f(v)$ и $v_h=f(v)$ в диапазоне скоростей резания 30—130 м/мин имеют монотонный характер, т. е. чем ниже скорость резания, тем ниже скорость размерного износа и тем выше период стойкости.

Таким образом, в указанном диапазоне скоростей резания не находятся ни рациональная температура контакта, ни скорость резания v_m , соответствующая этой температуре. Но здесь имеется оптимальная скорость и оптимальная температура резания, так как зависимость $h_{0.л}=f(v)$ имеет точку минимума.

Приведенные данные показывают, что в основу установления оптимальных сочетаний подач и скоростей резания должно быть положено изучение зависимостей $h_{0.л}=f(v)$ и $h_{0.п}=f(v)$, а не зависимостей $T=f(v)$, хотя последние и получили наиболее широкое распространение в литературе по резанию металлов.

Необходимо отметить, что при точении стали 1X18H9T резцами ВК8 и Т14К8 минимум себестоимости обработки наблюдается при более высокой скорости резания по сравнению с оптимальной v_0 . Это объясняется тем, что правые ветви кривых $h_{0.л}=f(v)$ и $v_h=f(v)$ являются пологими и повышение затрат на инструмент, связанное с повышенной интенсивностью износа при работе на скоростях резания $v > v_0$, с избытком перекрывается снижением затрат на заработную плату.

При точении же стали 1X18H9T резцами Т30К4 ($t=0,50$ мм; $s=0,20$ мм/об) максимум размерной стойкости и минимум себестоимости обработки наблюдаются практически при одной и той же скорости резания $v_0=v_g$ (рис. 20, в). Это объясняется тем, что правые ветви кривых $h_{0.л}=f(v)$ и $v_h=f(v)$ являются чрезвычайно крутыми и снижение затрат на заработную плату при работе на скоростях $v > v_0$ не может перекрыть того повышения затрат на инструмент, которое вызывается столь резким повышением интенсивности его износа при повышении скорости резания.

Расчеты показывают, что экономическая скорость размерного износа $v_{hэ}$ резцов, оснащенных различными твердыми сплавами, при обработке различных материалов, является практически постоянной величиной, равной 1 мк/мин (см. рис. 20). Постоянство величины $v_{hэ}$ дает возможность быстро определить экономическую скорость резания по графикам $v_h=f(v)$, $h_{0.л}=f(v)$ и $h_{0.п}=f(v)$ без трудоемких расчетов и построений.

Для экономической скорости резания должно выполняться условие

$$v_g = \frac{1000v_{hэ}}{h_{с.л}} = \frac{1000v_{hэ}}{h_{0.п}s} \text{ м/мин.} \quad (27)$$

3. Положение о постоянстве оптимальной температуры резания при различных подачах

Несмотря на то, что выявление оптимальных сочетаний подач и скоростей резания и ведение процессов обработки на указанных сочетаниях играет весьма значительную роль в современном машиностроении, изучением указанных вопросов занимались лишь немногие исследователи.

Большое число стойкостных опытов, проведенных различными исследователями, позволило выявить для многих конкретных случаев оптимальные скорости резания (при $s = \text{const}$) и оптимальные подачи (при $v = \text{const}$), но не дают возможности установить взаимосвязь между этими величинами, так как все опыты (за малым исключением) проводились с одной постоянной подачей и переменными скоростями резания или с постоянной скоростью резания и переменными подачами [101]. Как было показано, кривые $h_{0.п} = f(v)$, во всех случаях имеют точку минимума, которой соответствуют оптимальные значения скорости и температуры резания.

Наблюдения за процессом износа инструмента при работе на различных скоростях резания позволяют заключить, что левые ветви кривых $h_{0.п} = f(v)$ являются результатом главным образом адгезионного износа, а правые ветви — диффузионного.

Суммарный износ, выражаемый кривой $h_{0.п} = f(v)$ [а также кривой $h_{0.п} = f(\theta^\circ)$], формально можно рассматривать как сумму адгезионного и диффузионного износа.

В своей работе [52] Т. Н. Лоладзе изменение характера износа (переход от адгезионного износа к диффузионному) связывает с точкой максимума кривой $T = f(v)$, считая, что «рациональная температура контакта, т. е. температура, соответствующая точкам максимума кривых $T = f(\theta^\circ)$, существенно не зависит от режима резания и обусловлена состоянием (физико-механическими свойствами) контактных слоев инструмента и обрабатываемого материала в условиях резания. Поэтому для заданного инструментального и обрабатываемого материала она постоянна». В противоположность утверждению Т. Н. Лоладзе мы считаем, что постоянство температуры резания (или температуры контакта) следует связывать не с точками перегиба кривых $T = f(v)$ и $v_h = f(v)$, а с минимальными точками кривых $h_{0.п} = f(v)$ и $h_{0.л} = f(v)$.

При точении жаропрочного сплава ЭИ437А резцами ВК8 и ВК15М [64], [54], закаленной стали ЭХ12М твердостью HRC 60—61 и 58—59 резцами Т15К6 [66] и нержавеющей хромоникелевой стали 1Х18Н9Т резцами Т30К4 [65] нами установлено, что для каждого данного сочетания материалов обрабатываемого изделия и инструмента при работе на любой подаче оптимальным скоростям резания соответствует постоянная, так называемая оптимальная, температура в зоне резания (или постоянная величина термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре резец — изделие).

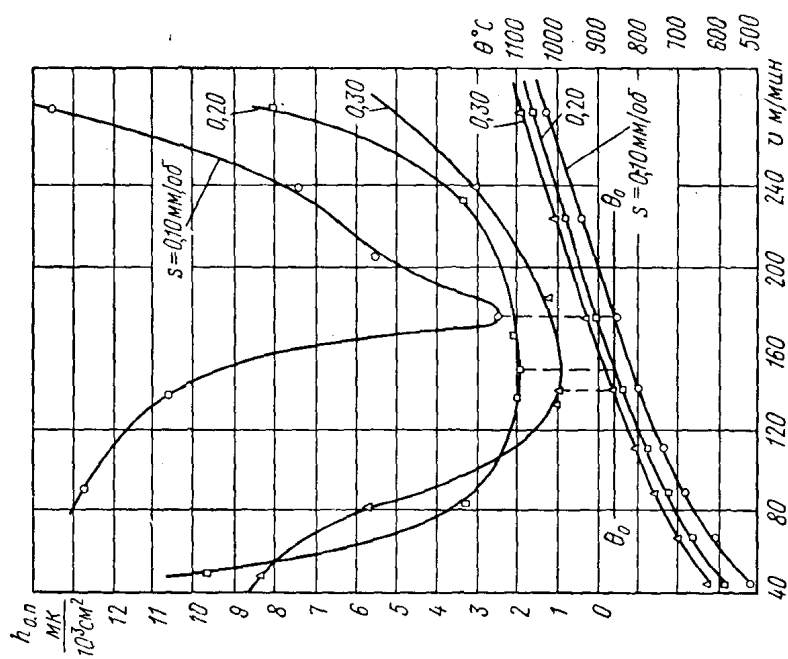


Рис. 22. Влияние скорости резания на среднюю температуру контакта и поверхностный относительный износ при точении.

Сталь IX18H9T, резец Ti4K8; $t = 0.50$ мм

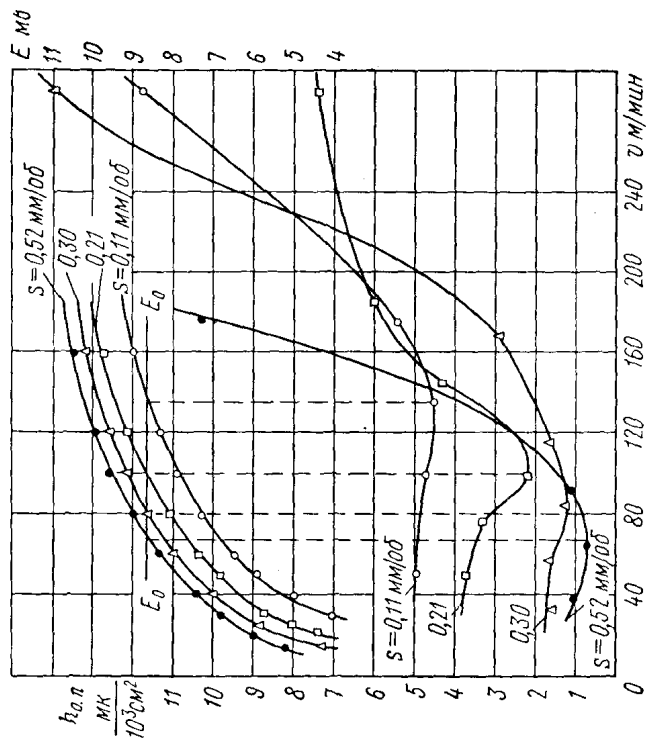


Рис. 21. Влияние скорости резания на величину t , θ , d , s и поверхностный относительный износ при точении

Сталь 30ХГСА, резец Ti15K6; $t = 1.5$ мм

Справедливость указанного положения подтверждается также графиками, приведенными на рис. 21—24, где представлено влияние скорости резания на величину термоэлектродвижущей силы и поверхностный относительный износ резцов при точении некоторых материалов на разных подачах. Из них видно, что кривые $h_{o.п} = f(v)$

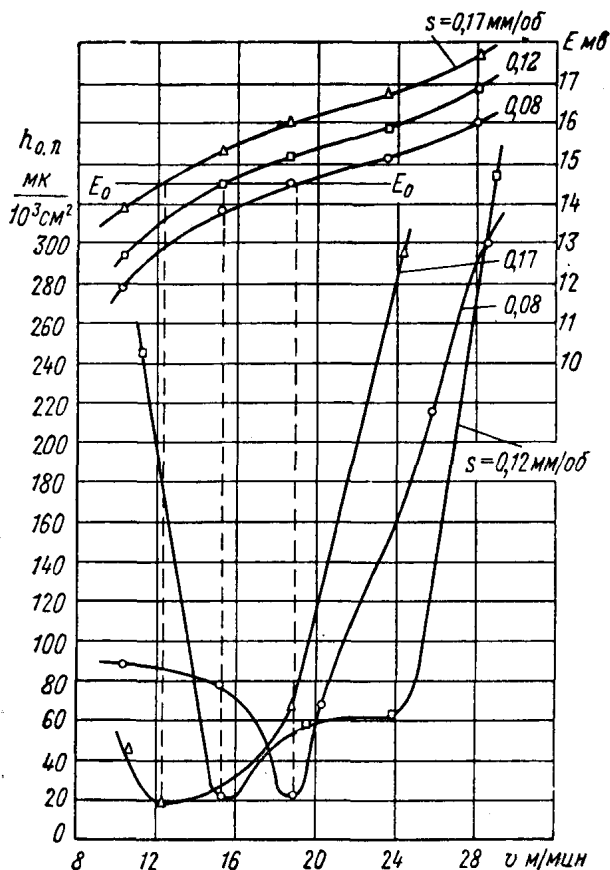


Рис. 23. Влияние скорости резания на величину т. э. д. с. и поверхностный относительный износ при точении.

Закаленная сталь 3X12M (HRC 60—61), резец T14K8;
 $f = 0,25$ мм

для всех подач имеют точки минимума, наблюдающиеся при различных скоростях резания. Чем больше подача, тем при меньшей скорости резания величина $h_{o.п}$ имеет минимальное значение. Но во всех случаях точкам минимума кривых $h_{o.п} = f(v)$ соответствует одна и та же оптимальная температура резания для данного сочетания обрабатываемого материала и инструмента.

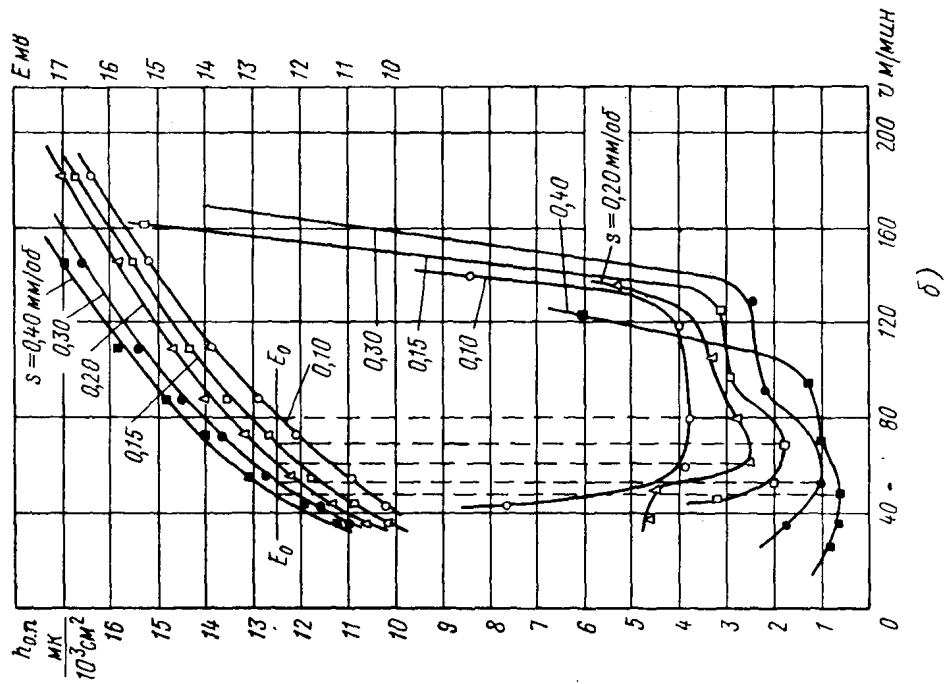
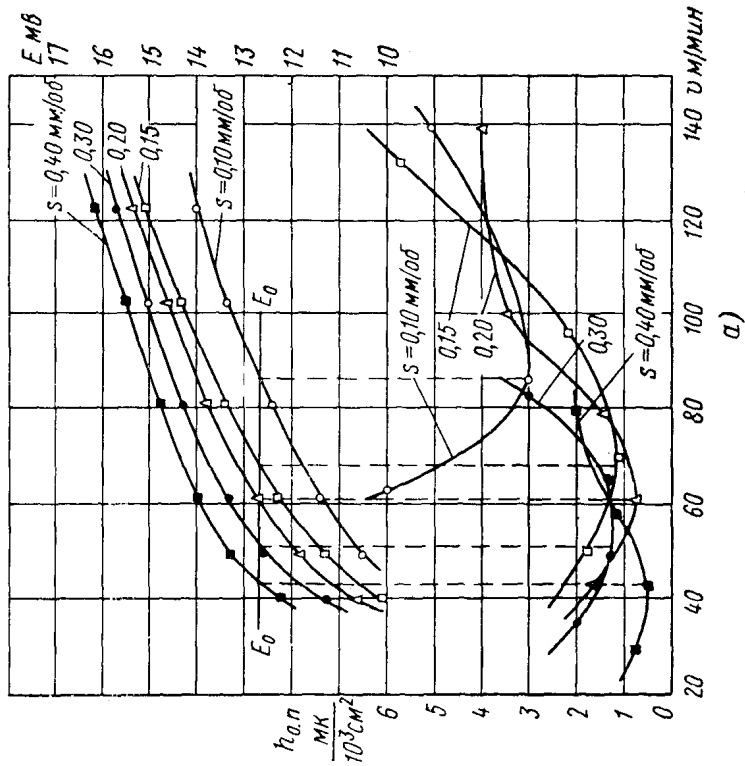


Рис. 24. Влияние скорости резания на величину т. э. д. с. и относительный износ при точении стали 1Х18Н9Т ($t = 0,50$ мм).

а—резец ВК4; б—резец ВК6

Дальнейшие исследования полностью подтвердили указанное положение при точении различных обрабатываемых материалов (легированные стали, нержавеющей жаропрочные стали, закаленные стали, жаропрочные и титановые сплавы) резцами, оснащенными различными марками твердых сплавов.

Таким образом, положение о постоянстве оптимальной температуры резания носит характер всеобщности и может быть положено в основу ускоренного метода определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, соответствующих максимальной размерной стойкости инструмента.

4. Зависимость линейного относительного износа и скорости размерного износа от температуры резания

На рис. 20, *а* было показано, что точки минимума на кривых $h_{0,л}=f(v)$ и $v_h=f(v)$ наблюдаются при различных скоростях, а следовательно, и при различных температурах в зоне резания. Интересно выяснить, будут ли точки минимума на кривых $v_h=f(v)$ для различных подач наблюдаться при постоянных значениях термоэлектродвижущей силы или постоянных значениях рациональной температуры контакта.

Проверка указанного положения необходима хотя бы потому, что некоторые исследователи [52] предлагают использовать «температурный метод» для сокращения трудоемких стойкостных исследований путем определения так называемой рациональной температуры контакта.

В качестве примера на рис. 25—26 приводятся графики, выражающие зависимость $h_{0,л}$ и v_h от температуры резания при точении стали 40ХНМА и 1Х18Н9Т.

Рис. 25, *а* показывает, что точки минимума кривых $v_h=f(\vartheta)$ при точении стали 40ХНМА резцами Т14К8 наблюдаются при различных значениях температуры резания. При работе на подаче $s=0,43$ мм/об минимум величины v_h наблюдается при $\vartheta=690^\circ\text{C}$, а для $s=0,11$ мм/об — при $\vartheta=820^\circ\text{C}$. Заметим, что изменение температуры резания от 690° до 820°C эквивалентно изменению скорости резания (для $s=0,21$ мм/об) на 63% (от 106 до 168 м/мин). Следовательно, при точении стали 40ХНМА соблюдается постоянство оптимальной температуры резания при работе на различных подачах, но для каждой подачи имеется своя рациональная температура контакта. При точении жаропрочного сплава ЭИ437А (рис. 25, *б*) рациональная температура контакта выявляется лишь при $s=0,12$ мм/об. При $s=0,08$ и $s=0,245$ мм/об зависимость $v_h=f(\vartheta)$ имеет монотонный характер, хотя для всех трех подач кривые $h_{0,л}=f(\vartheta)$ имеют точки минимума, наблюдаемые при одной и той же оптимальной температуре. При точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК6 (рис. 26, *а*) минимальное значение скорости размерного износа для разных подач наблюдается также при различных значениях термоэлектродвижущей силы и только для $s=0,40$ мм/об

в исследованном диапазоне скоростей резания от 26 до 124,5 м/мин скорость размерного износа монотонно возрастает.

Следовательно, если рациональную температуру контакта найти на основании стойкостных испытаний при подаче 0,10 мм/об и по-

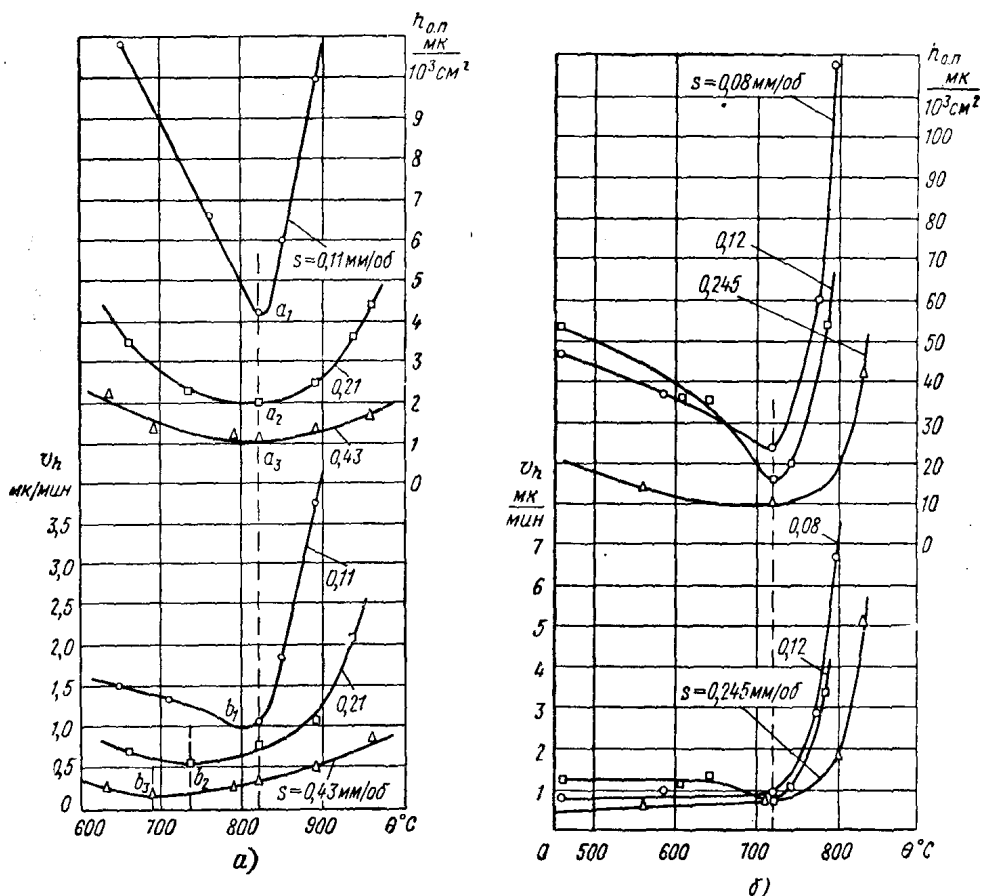


Рис. 25. Зависимость поверхностного относительного износа и скорости размерного износа от средней температуры контакта при точении:

а—сталь 40XНМА, резец Т14К8, $t=1 \text{ мм}$; б—сплав ЭИ437А, резец ВК8; $t=0.5 \text{ мм}$

пытаться ее распространить на другие подачи, то будет допущена ошибка в величине т. э. д. с. на 1,2 мв, что эквивалентно изменению скорости резания (для $s=0.20 \text{ мм/об}$) на 42% (от 43 до 61 м/мин).

При точении той же стали резцами ВКЗ (рис. 26, б) о рациональной температуре контакта можно говорить лишь в случае работы на подаче 0,11 мм/об. Для всех других подач от 0,21 до 0,43 мм/об в исследованном диапазоне скоростей резания зависимость скорости размерного износа от скорости (и температуры) резания носит монотонный характер.

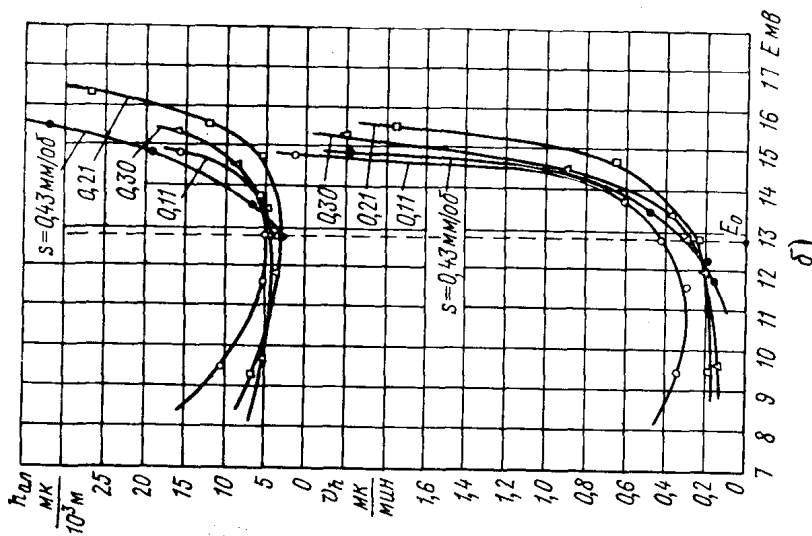
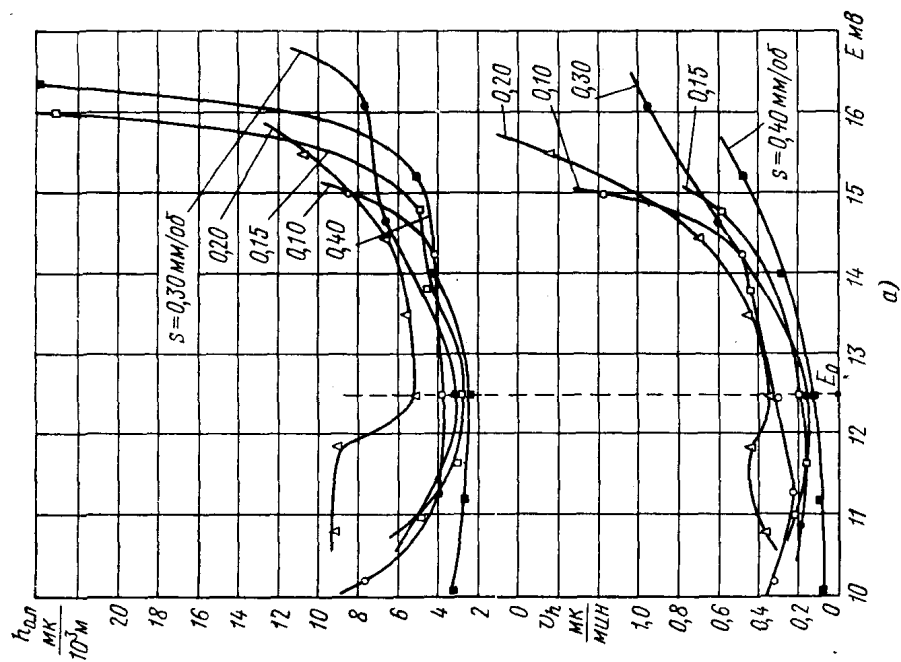


Рис. 26. Зависимость линейного относительного износа и скорости размерного износа от температуры резания (т. э. д. с.) при точении стали IX18H9T ($t = 0,5$ мм):

а — резец ВК6; б — резец ВК3

Вместе с тем, при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК6 и ВК3 (см. рис. 26, а, б) кривые $h_{o.л} = f(v)$ имеют свои точки минимума для всех подач при одном и том же постоянном значении φ° и термоэлектродвижущей силы.

Таким образом, рассмотренные опытные данные полностью подтверждают положение о постоянстве оптимальной температуры резания и показывают, что положение о постоянстве рациональной температуры контакта может соблюдаться лишь в частных случаях и не носит всеобщего характера. Оптимальная температура резания является своего рода физической константой для заданной пары «резец—изделие», так как указанная температура является постоянной для всех подач и при ней наблюдается наименьшая (но различная для разных подач) интенсивность износа и максимальная размерная стойкость инструмента.

Понятие же рациональной температуры контакта лишено определенного физического содержания, так как при экстремальности функций $h_{o.л} = f(v)$ и $h_{o.п} = f(v)$ функции $v_h = f(v)$ и $T = f(v)$ для различных подач имеют точки перегиба при различных температурах резания, а в ряде случаев кривые $v_h = f(v)$ и $T = f(v)$ при широком изменении скоростей резания являются монотонными.

5. Метод определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания

Ускоренный метод определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания основан на положении о постоянстве оптимальной температуры резания независимо от величины подачи для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{o.л} = f(v)$ и на закономерностях размерного износа инструмента.

Метод состоит в следующем:

1. На одной из подач s_1 исследуют интенсивность размерного износа на 5—7 скоростях резания, измеряя радиальный износ с помощью специального прибора [55], [57]. Скорости резания подбираются с расчетом возможности выявления минимума поверхностного относительного износа $h_{o.л}$. Для ускорения $h_{o.л}$ определяют по размерному износу лишь на начальных участках периода нормального износа [62].

2. Подсчитывают по формуле (23) поверхностный относительный износ резца при работе на различных скоростях резания и ту скорость, при которой $h_{o.л}$ минимален, принимают за оптимальную v_o .

3. Измеряют величину оптимальной термоэлектродвижущей силы (т. э. д. с.), т. е. такой, какая возникает в паре резец—изделие при работе на выбранной подаче и оптимальной скорости резания.

4. Проводят опыты по определению т. э. д. с. при работе на других подачах. При работе на каждой из этих подач путем бесступенчатого изменения скоростей резания добиваются получения оптимальной т. э. д. с.

Полученные для указанных подач скорости резания и будут оптимальными, а интенсивность радиального износа резца будет минимальной.

Если станок, на котором ведется исследование, не имеет бесступенчатого регулирования числа оборотов, то вместо пп. 3—4 поступают следующим образом:

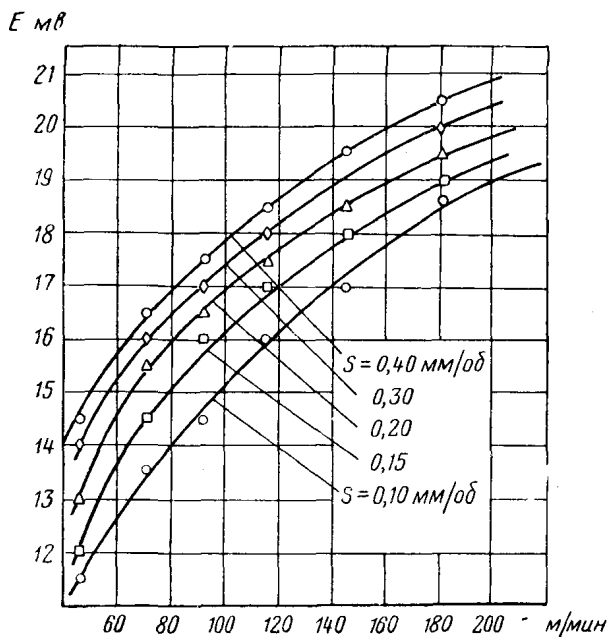


Рис. 27. Влияние скорости резания на величину т. э. д. с. при точении.

Сталь 1Х18Н9Т, резец Т30К4; $t=0,50$ мм

5. Определяют влияние скорости резания и подачи на величину термоэлектродвижущей силы, возникающей в паре резец—изделие (рис. 27).

6. Для значений т. э. д. с. строят в двойной логарифмической сетке график (рис. 28) зависимости скорости резания от подачи и находят зависимость между скоростью резания и подачей при постоянстве температур (т. э. д. с.) в зоне резания

$$v = \frac{C_1}{s^{x_1}}, \quad (28)$$

где x_1 — тангенс угла наклона прямых на графике;

C_1 — постоянный коэффициент.

Численное значение коэффициента C_1 определится по формуле

$$C_1 = v_0 s_1^{x_1}, \quad (29)$$

где v_0 — оптимальная скорость резания при работе на подаче s_1 .

7. Подсчитывают по формуле (28) оптимальные скорости для всех других подач.

Сочетания подач и скоростей резания, удовлетворяющие уравнению (28), обеспечивают инструменту наименьшую интенсивность размерного износа, но абсолютные величины оптимальных поверхностных относительных износов еще остаются неизвестными.

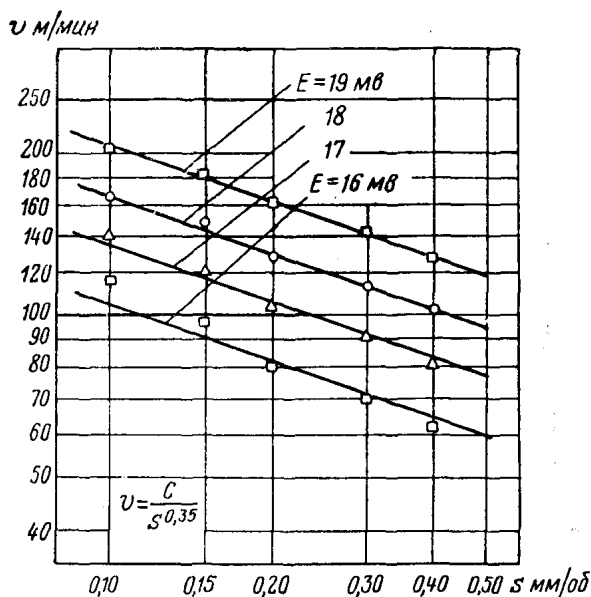


Рис. 28. Влияние подачи на скорость резания при постоянной температуре (т. э. д. с.) в зоне резания при точении.

Сталь 1Х18Н9Т, резец Т30К4; $t=0,50$ мм

8. Для определения их на указанных в п. 7 сочетаниях подач и скоростей резания проводятся опыты по определению интенсивности размерного износа, аналогично опытам, описанным в п. 1.

9. Для того чтобы связать выбор режимов резания с чистотой обработки, на сочетаниях подач и скоростей резания, определяемых уравнением (28), измеряют высоту неровностей обработанной поверхности.

Указанный метод проверен при обработке ряда материалов (30ХГСА, 1Х18Н9Т, ЭХ12М, ЭИ654, ЭИ437А и др.) большинством марок отечественных твердых сплавов и оказался исключительно надежным и плодотворным. Он позволяет в 8—10 раз экономить время и обрабатываемый материал по сравнению с существующими методами исследования.

Метод может быть легко применен в любой лаборатории, занимающейся исследованием обрабатываемости металлов резанием и разработкой режимов резания.

6. Дальнейшее совершенствование ускоренного метода определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания

Исследования показывают, что интенсивность размерного износа в периоде так называемого нормального износа почти не зависит от длины пути резания.

Указанное явление можно объяснить тем, что в зоне нормального износа резца средние нормальные и касательные удельные нагрузки на задней поверхности остаются примерно постоянными, не зависящими от ширины фаски износа по задней поверхности [25], [85].

На основании этого оказалось возможным определять за одно затупление резца величины поверхностного относительного износа для 5—7 скоростей резания или подач.

Интересно было проверить возможность применения метода работы с переменными (за время работы резца до затупления) скоростями резания или подачами для определения оптимальных сочетаний s и v .

Такие исследования проводились при точении стали ЭИ736 цельным твердосплавным резцом Т14К8 с глубиной резания 1,0 мм.

Сначала исследовалось влияние длины пути резания на радиальный износ резца при работе с подачей 0,20 мм/об. Скорости резания изменялись от 44 до 210 м/мин. Наименьшая интенсивность радиального износа получилась при скорости резания 85 м/мин, которая и была принята за оптимальную (рис. 29).

Затем проводились опыты по определению влияния скорости резания на величину термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре: сталь ЭИ736 — твердый сплав Т14К8. Последующие опыты по определению интенсивности размерного износа резца Т14К8 при работе на подачах 0,10 и 0,40 мм/об полностью подтвердили правильность положения о постоянстве оптимальной температуры резания для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{0,п} = f(v)$, полученных для различных подач (рис. 29—30).

После этого на всех трех подачах были проведены опыты с переменными ступенчато изменяющимися скоростями резания (рис. 31). Скорости резания изменялись через каждые 500 м пути, а при работе на высоких скоростях — через 250 м. Как видно из рис. 32, кривые $h_{0,п} = f(v)$, полученные для всех трех подач на основе длительных и кратковременных испытаний, практически совпадают. При работе на оптимальных скоростях резания (полученных на основе длительных стойкостных испытаний) со ступенчато изменяющимися скоростями резания во всех случаях наблюдается наименьшая величина поверхностного относительного износа. Сравнение данных, полученных на основе длительных и кратковременных испытаний, обнаруживает полное совпадение уровней оптимальных скоростей резания (что является особенно важным) и вполне удовлетворительное совпадение величин поверхностного относительного износа.

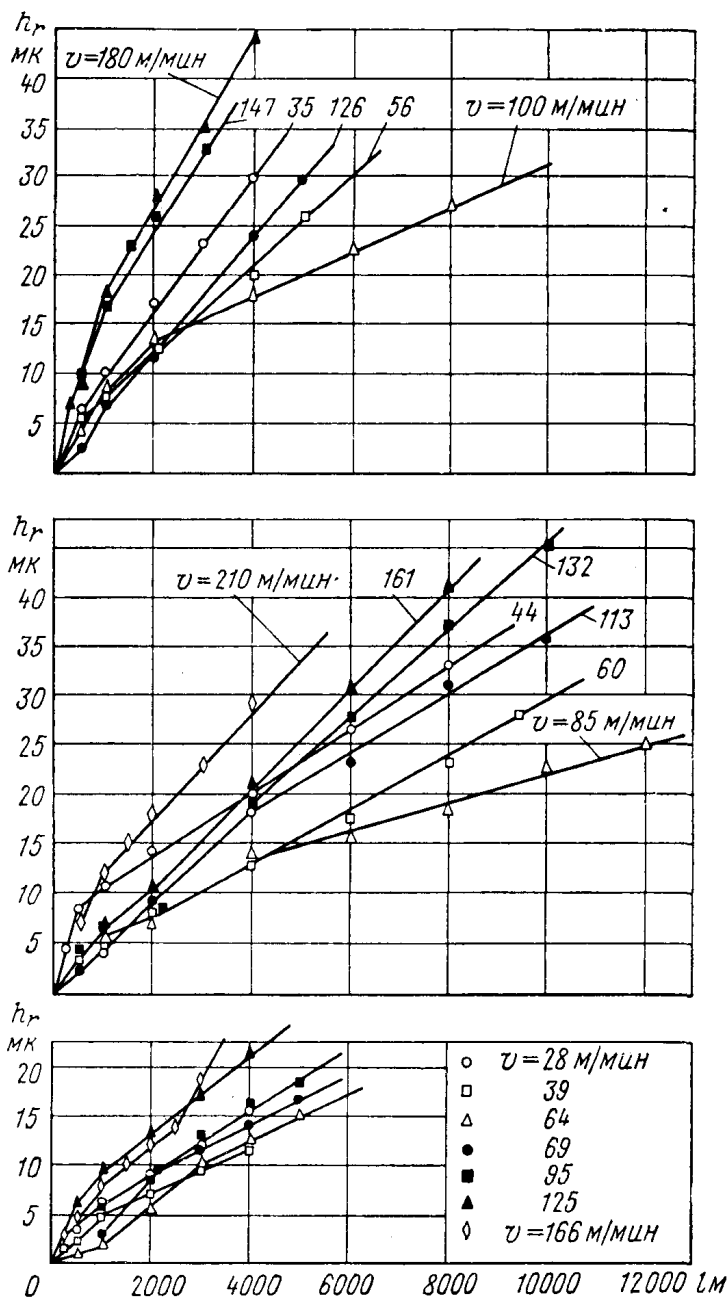


Рис. 29. Влияние длины пути резания на радиальный износ при точении.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8, $t=1$ мм

Следовательно, для любой из трех исследованных подач оптимальная скорость резания и оптимальный поверхностный относительный износ с достаточной для практических целей точностью могут быть получены лишь за одно затупление резца при работе с переменными скоростями резания.

Оптимальные скорости резания для других подач легко получаются на основе кратковременных температурных испытаний.

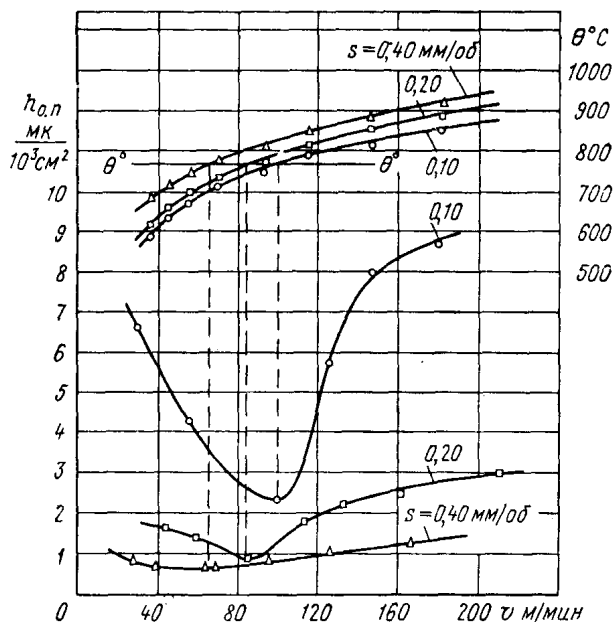


Рис. 30. Влияние скорости резания на среднюю температуру контакта и поверхностный относительный износ при точении.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8, $t=1$ мм

Проводя следующие опыты до затупления резца с последовательно изменяющимися подачами на оптимальной для каждой подачи скорости резания, можно получить данные о величинах $h_{o.p.}$ для всех подач интересующего ряда.

Полный комплекс таких испытаний проведен при точении стали ЭИ654, отличающейся повышенной истирающей способностью. Испытания проводились цельным твердосплавным резцом Т14К8 при $t=1,0$ мм и $s=0,10; 0,20; 0,30$ и $0,40$ мм/об.

В отличие от предыдущей серии опытов по точению стали ЭИ736 здесь был принят следующий порядок проведения экспериментов.

Сначала при $s=0,20$ мм/об на переменных, ступенчато изменяющихся (за период стойкости) скоростях резания устанавливались v_0 и θ_0^0 .

После этого определялось влияние скорости резания на величину термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре сталь ЭИ654 — резец Т14К8. Затем из точки минимума на кривой $h_{o.п.}$

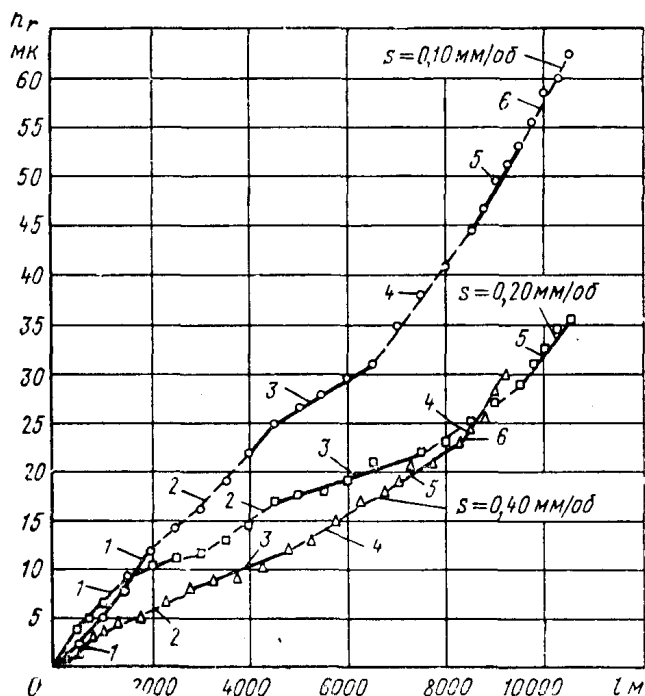


Рис. 31. Влияние длины пути резания на радиальный износ при точении с переменными скоростями резания.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8, $t=1,0$ мм

Участок	Скорости резания в м/мин при различных подачах		
	○ $s=0,10$ мм/об	□ $s=0,20$ мм/об	△ $s=0,40$ мм/об
1	35	60	28
2	64	44	39
3	100	85	64
4	126	132	95
5	147	164	125
6	180	—	169

$=f(v)$ для $s=0,20$ мм/об опускался перпендикуляр до пересечения с соответствующей кривой $E=f(v)$ [или $\theta^\circ=f(v)$] и определялась величина оптимальной т. э. д. с. Семейство кривых $E=f(v)$ рассеклось горизонтальной прямой E_o-E_o , соответствующей оптимальной температуре резания (т. э. д. с.) для $s=0,20$ мм/об. Скорости

резания, соответствующие абсциссам точек пересечения прямой $E_0—E_0$ (или $\theta_0—\theta_0$) с кривыми $E=f(v)$ [или $\theta^\circ=f(v)$] принимались в качестве оптимальных.

Затем такие же опыты проводились на подачах 0,10; 0,30 и 0,40 мм/об. Опыты показали, что при проведении таких ускоренных испытаний оптимальные скорости резания, найденные графическим путем, обеспечивали резцам наименьшую интенсивность радиального износа. Работа же на других скоростях резания, как выше, так и ниже оптимальных скоростей резания, найденных графиче-

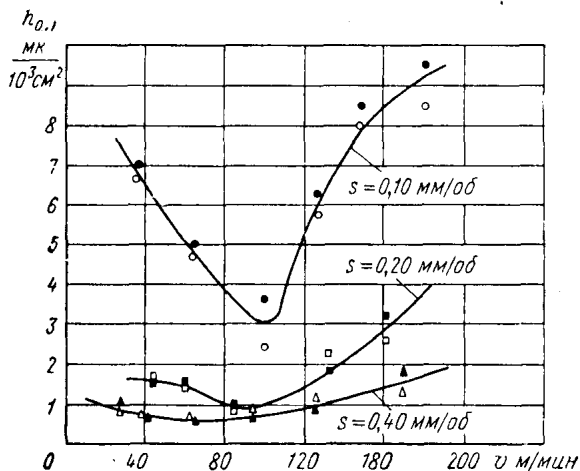


Рис. 32. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при точении.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8, $t=1,0$ мм
 ○ □ △ — длительные испытания;
 ● ■ ▲ — кратковременные испытания

ским путем, во всех случаях приводила к существенному повышению интенсивности радиального износа (рис. 33).

Далее были проведены обычные опыты по определению интенсивности размерного износа на различных подачах и скоростях резания.

Сравнение данных, полученных на основе длительных и кратковременных испытаний, выявляет точное совпадение уровней v_0 и хорошее совпадение величин $h_{0,п}$. Для каждой из четырех исследованных подач v_0 была получена лишь за одно затупление резца.

Исследования по определению $h_{0,п,0}$ при работе с переменными подачами и сохранении постоянства оптимальной т. э. д. с. E_0 показали, что они мало отличаются от соответствующих величин $h_{0,п,0}$, полученных на основе длительных испытаний и на основе кратковременных испытаний с переменными скоростями резания (рис. 34).

Необходимо отметить, что кратковременные опыты с переменными скоростями резания на всех подачах были проведены лишь

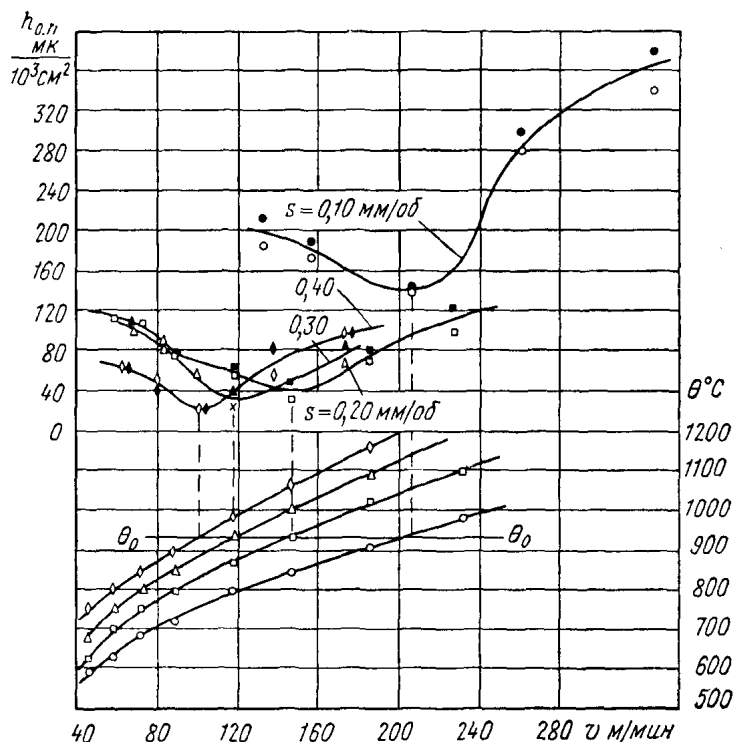


Рис. 33. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и среднюю температуру контакта при точении

Сталь ЭИ654, резец Т14К8; $t=1,0$ мм.

- □ ◇ — длительные испытания;
● ■ ▲ — кратковременные испытания с переменными скоростями резания.

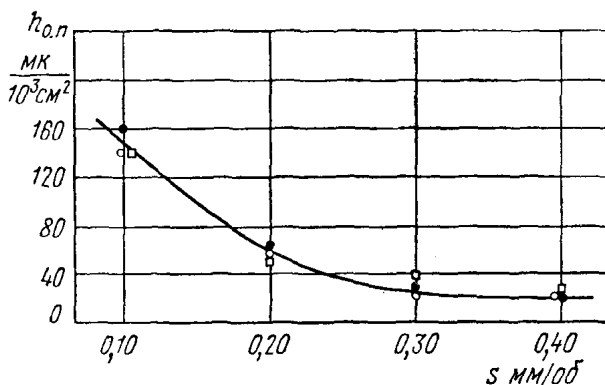


Рис. 34. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении с оптимальной температурой резания

Сталь ЭИ654, резец Т14К8; $t=1,0$ мм.

- — длительные испытания;
● — кратковременные испытания на оптимальных сочетаниях s и v ;
□ — кратковременные испытания с переменными скоростями резания

с целью проверки возможностей ускоренного метода. При практическом же его использовании такие опыты достаточно провести лишь на одной из подач, а на всех других подачах величину $h_{0,п.о}$ можно определить за время одного затупления резца на оптималь-

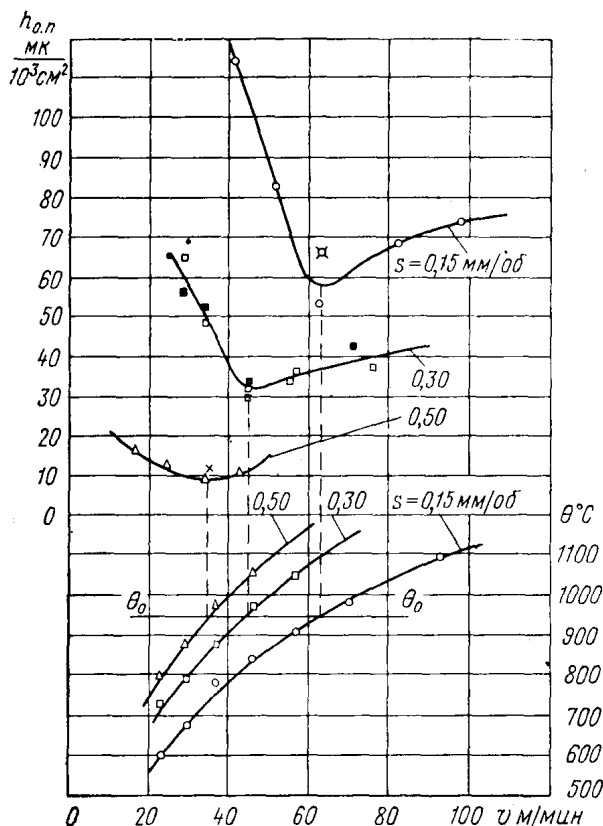


Рис. 35. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и среднюю температуру контакта при точении с оптимальной температурой резания.

Сталь ЭИ654, резец ВК6; $t=2$ мм.
 ○□△ — длительные испытания;
 ●■▲ — кратковременные испытания с переменными скоростями резания;
 ■× — кратковременные испытания на оптимальных сочетаниях s и v

ных скоростях резания, соответствующих абсциссам точек пересечения прямой $E_0—E_0$ с семейством кривых $E=f(v)$ для различных подач.

Такие опыты были проведены при точении стали ЭИ654 резцами ВК6 (рис. 35, 36) и при точении стали 40ХНМА резцами Т14К8 (рис. 37, 38).

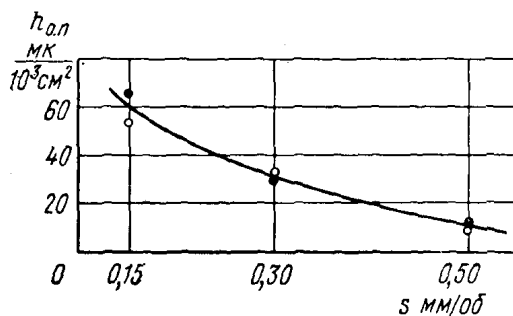


Рис. 36. Влияние подачи на поверхностный относительный износ резца ВК6 при точении с оптимальной температурой резания

Сталь ЭИ654, резец ВК6.

- — длительные испытания;
● — кратковременные испытания на оптимальных сочетаниях s и v

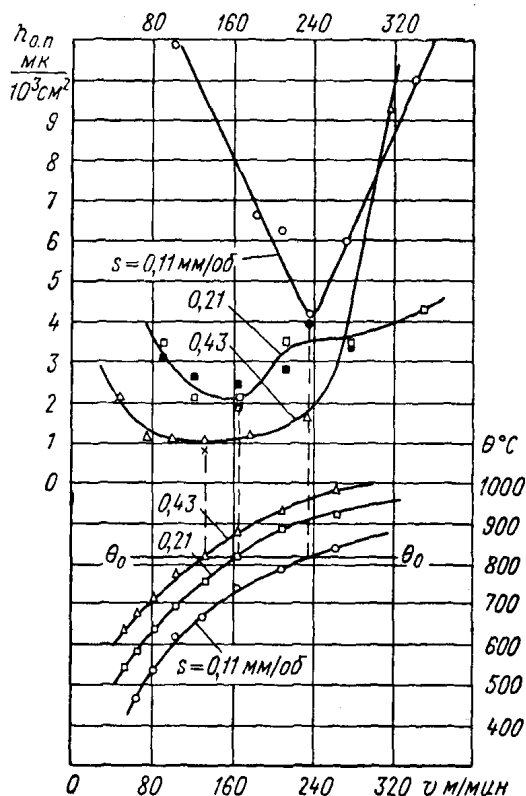


Рис. 37. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и среднюю температуру контакта при точении.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм.

- □ △ — длительные испытания;
● ■ ▲ — кратковременные испытания с переменными скоростями резания;
⊕ ⊞ × — кратковременные испытания на оптимальных сочетаниях s и v

Рис. 35—38 показывают, что оптимальные сочетания подач и скоростей резания и величин оптимальных поверхностных относительных износов при работе на различных подачах при сохранении постоянства оптимальной температуры резания можно определить всего лишь на основании двух стойкостных опытов и одного опыта по определению т. э. д. с.

При применении предлагаемого метода достигается 15—20 кратная экономия времени исследования, обрабатываемого и инструментального материалов по сравнению с существующим методом установления оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, основанном на проведении обычных стойкостных опытов.

Преимуществом ускоренного метода определения оптимальных сочетаний s и v также является и то, что здесь все опыты проводятся одним резцом с переточкой после каждого затупления, а малые серии опытов при постоянной подаче — при одной и той же заточке резца. Это сокращает разброс опытных точек и повышает точность получаемых результатов.

Исследования закономерностей поверхностного относительного износа инструмента и тепловых явлений позволили не только вскрыть природу недостатков существующих нормативов по режимам резания и методов их разработки, но и создать новые ускоренные методы исследования, которые открывают громадные резервы повышения размерной стойкости инструмента, производительности, точности и снижения ее себестоимости обработки.

7. Аналитический метод определения экономических скоростей резания

В общем случае работа должна вестись на экономических скоростях резания. Если зависимость поверхностного относительного износа от скорости резания $h_{o,п} = f(v)$ задана в виде уравнения, то экономическая скорость резания может быть определена аналитическим методом.

Переменная доля себестоимости операции, зависящая от скорости резания, определяется формулой (26)

$$A = t_m(a_{\text{раб}} + a_{\text{ст}}) + \frac{t_{\text{см}}}{Q}(a_{\text{раб}} + a_{\text{ст}}) + \frac{S_1}{Q}.$$

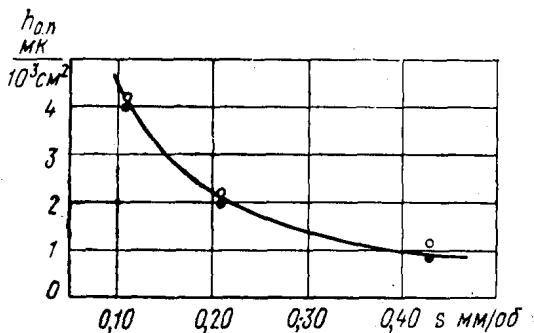


Рис. 38. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении с оптимальной температурой резания.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t = 1$ мм.

○ — длительные испытания;
● — кратковременные испытания на оптимальных сочетаниях s и v

Машинное время обработки одной детали длиной L мм и диаметром D мм при работе в один проход определяется по формуле

$$t_m = \frac{\pi DL}{1000v \cdot s} \quad (30)$$

Количество обработанных деталей до затупления или замены инструмента зависит от подачи и величины $h_{o,п}$ и может быть выражено следующим образом.

Длина пути резания в мм до затупления инструмента определяется из уравнения

$$l = \frac{(h_r - h_n) 100}{s \cdot h_{o,п}} + l_n.$$

Суммарная площадь обработанной поверхности в $см^2$ до затупления и замены инструмента может быть выражена формулой

$$P_{сум} = 100l \cdot 0,1 \cdot s = 10ls. \quad (31)$$

Число деталей Q может быть найдено как частное от деления суммарной площади обработанной поверхности на площадь обработанной поверхности одной детали

$$q = \frac{\pi DL}{100} \text{ см}^2,$$

т. е.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{P_{сум}}{q} = \frac{10l \cdot s}{\frac{\pi DL}{100}} = \frac{\left[\frac{(h_r - h_n) 100}{s \cdot h_{o,п}} + l_n \right] 10s}{\frac{\pi DL}{100}} = \\ &= \frac{[(h_r - h_n) 100 + h_{o,п} s l_n] 1000 \cdot s}{\pi D L s h_{o,п}}. \end{aligned}$$

Подставим значения t_m и Q в формулу для переменной доли себестоимости операции

$$\begin{aligned} A &= t_m (a_{раб} + a_{сг}) + \frac{t_{см}}{Q} (a_{раб} + a_{сг}) + \frac{S_1}{Q} = \\ &= (a_{раб} + a_{сг}) \frac{\pi DL}{1000 \cdot s} \frac{1}{v} + \frac{t_{см} (a_{раб} + a_{сг}) + S_1}{\frac{[(h_r - h_n) 100 + h_{o,п} s l_n] 1000 \cdot s}{\pi D L s h_{o,п}}} = \\ &= \frac{\pi DL}{1000} \left\{ (a_{раб} + a_{сг}) \frac{1}{s \cdot v} + \frac{[t_{см} (a_{раб} + a_{сг}) + S_1] \cdot h_{o,п}}{[100 (h_r - h_n) + h_{o,п} s l_n]} \right\}. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned} \frac{\pi DL}{1000 \cdot s} (a_{раб} + a_{сг}) &= B_1; \\ \frac{\pi DL}{1000} [t_{см} (a_{раб} + a_{сг}) + S_1] &= B_2; \\ s \cdot l_n &= B_3; \\ 100 (h_r - h_n) &= B_4; \\ h_{o,п} &= f(v). \end{aligned}$$

Тогда

$$A = \frac{B_1}{v} + \frac{B_2 h_{0.н}}{B_3 h_{c.н} + B_4} = \frac{B_1}{v} + \frac{B_2 f(v)}{B_3 f(v) + B_4}.$$

Таким образом, переменная доля себестоимости является функцией скорости резания. Для определения экономической скорости резания необходимо взять dA/dv и приравнять ее нулю, т. е.

$$(A)'_v = -\frac{B_1}{v^2} + \frac{[B_3 f(v) + B_4] B_2 f'(v) - B_2 f(v) B_3 f'(v)}{[B_3 f(v) + B_4]^2} = 0.$$

Заменив постоянные B_1 , B_2 , B_3 и B_4 их значениями, получим

$$\begin{aligned} & \frac{B_2 B_4 f'(v)}{[B_3 f(v) + B_4]^2} - \frac{B_1}{v^2} = \\ & = \frac{\frac{\pi DL}{1000} [t_{cm}(a_{раб} + a_{ст}) + S_1] 100(h_r - h_n) f'(v)}{[sl_n f(v) + 100(h_r - h_n)]^2} - (a_{раб} + a_{ст}) \frac{\pi DL}{10^3 s v^2} = 0, \end{aligned}$$

или

$$\frac{[t_{cm}(a_{раб} + a_{ст}) + S_1] 100(h_r - h_n) f'(v)}{[sl_n f(v) + 100(h_r - h_n)]^2} - \frac{a_{раб} + a_{ст}}{s \cdot v^2} = 0.$$

Так как во многих случаях величины h_n и l_n весьма малы, то их можно принять равными нулю, и тогда

$$\frac{t_{cm}(a_{раб} + a_{ст}) + S_1}{100 \cdot h_r} f'(v) - \frac{a_{раб} + a_{ст}}{s v^2} = 0. \quad (32)$$

Скорость резания, найденная из уравнения (32), является экономической скоростью резания $v_э$. Очевидно, что между оптимальной и экономической скоростью резания соблюдается неравенство

$$v_0 \leq v_э,$$

поэтому для определения экономической скорости резания по формуле (32) можно ограничиться лишь уравнением правой ветви кривой $h_{0.н} = f(v)$, следующего вида:

$$h_{0.н} = C \cdot v^u. \quad (33)$$

Тогда

$$h'_{0.н} = f'(v) = u C v^{u-1}.$$

Подставив значение $f'(v)$ в уравнение (32) и решив последнее относительно v , получим уравнение для определения экономической скорости резания

$$\begin{aligned} & \frac{t_{cm}(a_{раб} + a_{ст}) + S_1}{100 h_r} u C v_э^{u-1} - \frac{a_{раб} + a_{ст}}{s \cdot v_э^2} = 0. \\ & v_э = \sqrt[u+1]{\frac{(a_{раб} + a_{ст}) 100 h_r}{[t_{cm}(a_{раб} + a_{ст}) + S_1] u C s}}. \end{aligned} \quad (34)$$

В настоящее время для определения экономического периода стойкости $T_э$ применяется выражение

$$T_э = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \left(t_{см} + \frac{S_1}{a_{раб} + a_{ст}} \right). \quad (35)$$

Формула (34) для определения экономической скорости резания $v_э$ имеет следующие преимущества перед формулой (35):

1. Формула (34) исключает вероятность выбора нерациональных режимов резания, соответствующих левой ветви кривой $h_{о.п.} = f(v)$, тогда как формула (35) для труднообрабатываемых материалов дает часто совершенно нерациональные режимы резания.

2. Формула (34) учитывает при выборе режима резания принятый критерий затупления h_r , связанный с точностью обработки, тогда как в формуле (35), принятый при испытаниях критерий износа инструмента с точностью обработки явной связи не имеет.

3. В формулу (34) входит подача и, следовательно, выбранная скорость резания связывается с требуемой чистотой обработанной поверхности.

4. Так как величина $h_{о.п.}$ не зависит от критерия затупления инструмента, то при определении $v_э$ исключается необходимость проведения стойкостных испытаний до полного затупления инструмента, в то время как для выбора экономической скорости резания по вычисленному экономическому периоду стойкости $T_э$ такие испытания должны быть проведены полностью.

8. Параметрические уравнения максимальной размерной стойкости резцов при точении различных материалов

Анализ графиков (см. рис. 21—24), выражающих зависимость $h_{о.п.} = f(v)$, показывает, что чем выше подача, тем ниже величина $h_{о.п.о.}$

Взаимосвязи между $v_о$ и s , а также между $h_{о.п.о.}$ и s , могут быть выражены параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости [54]

$$\left. \begin{aligned} v_о &= \frac{C_1}{s^{x_1}}; \\ h_{о.п.о.} &= \frac{C_2}{s^{x_2}}. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

При подборе параметров эмпирической формулы (36) был использован способ наименьших квадратов, который основан на том, что из данного множества формул вида $v_о = f(s)$ наилучшим образом изображающей наблюдаемые значения считается та, для которой сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений от вычисленных является наименьшей.

Приведем формулу (36) к линейному виду

$$\lg v_о = \lg C_1 - x_1 \lg s$$

и введем обозначения

$$\lg v_0 = y; \lg C_1 = b; \lg s = x; -x_1 = a.$$

После подстановки новых обозначений получаем

$$y = ax + b.$$

Коэффициенты линейной функции $y = ax + b$ необходимо подбирать так, чтобы сумма квадратов отклонений вычисленных значений $ax_i + b$ от наблюдаемых y_i принимала наименьшее значение

$$M = (ax_1 + b - y_1)^2 + (ax_2 + b - y_2)^2 + \dots + (ax_n + b - y_n)^2$$

или

$$M = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2.$$

Сумма M является функцией двух переменных a и b . Минимальное значение сумма M принимает при тех значениях a и b , при которых обращаются в нуль частные производные этой функции по каждой переменной, т. е. когда

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial M}{\partial b} = 0.$$

Находим частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)x_i = 2 \left[a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \right]; \\ \frac{\partial M}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i) = 2 \left[a \sum_{i=1}^n x_i + bn - \sum_{i=1}^n y_i \right]. \end{aligned}$$

Приравнявая каждую частную производную нулю, получаем систему двух линейных уравнений относительно a и b

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i;$$

$$a \sum x_i + bn = \sum y_i.$$

Решение этой системы с помощью определителей второго порядка приводит к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum y_i & n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & n \end{vmatrix}} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}; \\ b &= \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum x_i & \sum y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & n \end{vmatrix}} = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \end{aligned}$$

Формулы для определения постоянных C_1 и x_1 после перехода к прежним обозначениям запишутся так:

$$x_1 = - \frac{n \sum_{i=1}^n \lg s_i \lg v_{oi} - \sum_{i=1}^n \lg s_i \sum_{i=1}^n \lg v_{oi}}{n \sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg s_i \right)^2}; \quad (37)$$

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 \sum_{i=1}^n \lg v_{oi} - \sum_{i=1}^n \lg s_i \sum_{i=1}^n \lg s_i \lg v_{oi}}{n \sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg s_i \right)^2}. \quad (38)$$

Постоянные C_2 и x_2 в уравнении

$$h_{o.n.o} = \frac{C_2}{s^{x_2}}$$

были найдены по следующим уравнениям:

$$x_2 = - \frac{\left| \begin{array}{cc} \sum \lg s_i \lg h_{o.n.o i} & \sum \lg s_i \\ \sum \lg h_{o.n.o i} & n \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{cc} (\sum \lg s_i)^2 & \sum \lg s_i \\ \sum \lg s_i & n \end{array} \right|} =$$

$$= - \frac{n \sum_{i=1}^n \lg s_i \lg h_{o.n.o i} - \sum_{i=1}^n \lg s_i \sum_{i=1}^n \lg h_{o.n.o i}}{n \sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg s_i \right)^2}; \quad (39)$$

$$C_2 = \frac{\left| \begin{array}{cc} \sum (\lg s_i)^2 \sum \lg s_i \lg h_{o.n.o i} \\ \sum \lg s_i \sum \lg h_{o.n.o i} \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{cc} (\sum \lg s_i)^2 \sum \lg s_i \\ \sum \lg s_i & n \end{array} \right|} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 \sum_{i=1}^n \lg h_{o.n.o i} - \sum_{i=1}^n \lg s_i \sum_{i=1}^n \lg s_i \lg h_{o.n.o i}}{n \sum_{i=1}^n (\lg s_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg s_i \right)^2}. \quad (40)$$

Для точения стали 30ХГСА резцами Т15К6 при $t=1,5$ мм получены следующие параметрические уравнения максимальной размерной стойкости:

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \frac{51,5}{s^{0,42}} \text{ м/мин}; \\ h_{0.п.о} &= \frac{0,286}{s^{1,25}} \text{ мк/}10^3 \text{ см}^2. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

а для точения стали ЭИ654 резцами ВК6 при $t=2$ мм

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \frac{24,6}{s^{0,50}} \text{ м/мин}; \\ h_{0.п.о} &= \frac{4,36}{s^{1,4}} \text{ мк/}10^3 \text{ см}^2. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Данные о постоянных коэффициентах и показателях степени в параметрических уравнениях максимальной размерной стойкости при обработке некоторых материалов приведены в табл. 14.

Известно, что при заданной глубине резания выбор режима резания начинается с назначения максимальной технологически допустимой подачи.

Для каждой выбранной подачи по уравнениям (36) может быть найдена оптимальная скорость резания и величина оптимального поверхностного относительного износа. При различных сочетаниях подач и скоростей резания, удовлетворяющих указанным уравнениям, обеспечивается постоянство оптимальной температуры резания, наименьшая (для выбранной подачи) величина поверхностного относительного износа, максимальная размерная стойкость инструмента и точность обработки.

Важно отметить, что как снижение, так и повышение скоростей резания по сравнению с оптимальными, приводит к значительному повышению интенсивности износа и снижению размерной стойкости инструмента.

Например, полуторакратное повышение скоростей резания по сравнению с оптимальными при точении стали 1Х18Н9Т резцами Т30К4 на подачах 0,10—0,15 мм/об приводит более чем к двадцатикратному снижению размерной стойкости, а уменьшение скоростей резания в два раза по сравнению с оптимальными в ряде случаев вызывает снижение размерной стойкости в 6—36 раза. Эти данные убедительно показывают, насколько важно для получения максимальной размерной стойкости инструмента выбрать оптимальные скорости резания, для определения которых и служит разработанный нами метод.

9. Номограммы для определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания

Для облегчения задачи быстрого определения наивыгоднейших сочетаний подач и скоростей резания, обеспечивающих наименьшую

Постоянные коэффициенты и показатели степени в параметрических уравнениях максимальной размерной стойкости при точении некоторых материалов

Материал детали	Материал резца	t мм	Диапазон подач S мм/об	x_1	x_2	x_3	x_4	C_1	C_2	C_3
40X	T15K6	1	0,10—0,40	0,53	1,65	1,18	3,1	89	0,114	9,85
40XHMА	T14K8	1	0,11—0,43	0,41	0,90	0,31	2,2	92,5	0,541	2,0
30XГСА	T15K6	1,5	0,11—0,52	0,42	1,25	0,67	2,88	51,5	0,286	6,8
30XГСА	T15K6	0,5	0,11—0,52	0,50	1,30	0,80	2,6	46	0,25	8,7
ЭИ736	T14K8	1	0,10—0,40	0,30	0,94	0,24	3,13	50,4	0,24	8,25
1X18H9T	T30K4	0,5	0,10—0,40	0,35	0,88	0,23	2,5	70,5	0,40	3,54
1X18H9T	T15K6	0,5	0,10—0,40	0,35	1,75	1,1	5	58,6	0,25	6,8
1X18H9T	T14K8	0,5	0,10—0,40	0,25	0,90	0,15	3,6	97	0,377	2,73
1X18H9T	T5K10	0,5	0,10—0,40	0,50	0,60	0,10	1,2	60,6	0,56	2,94
1X18H9T	BK2	0,5	0,11—0,43	0,28	0,86	0,14	3,06	50	0,45	4,44
1X18H9T	BK3	0,5	0,11—0,43	0,28	0,86	0,14	3,06	45,6	0,50	4,39
1X18H9T	BK4	0,5	0,10—0,40	0,50	1,4	0,9	2,8	27,1	0,12	30,8
1X18H9T	BK6	0,5	0,10—0,40	0,37	1,3	0,67	3,5	34,2	0,20	14,6
1X18H9T	BK8	0,5	0,10—0,40	0,55	1,6	1,15	2,9	33	0,344	9,7
ЭИ654	T5K10	1	0,12—0,49	0,55	0,80	0,35	1,45	16	45	0,139
ЭИ654	T14K8	1	0,20—0,40	0,50	0,50	0	1	65,1	13,85	0,111
ЭИ654	T15K6	1	0,12—0,34	0,38	0,76	0,14	2	58	14,2	0,121
ЭИ654	BK8	1	0,12—0,49	0,28	1,15	0,43	4,1	35	4,55	0,63
ЭИ654	BK6	2	0,15—0,50	0,50	1,4	0,9	2,8	24,6	4,36	0,93
ЭИ437А	BK15M	0,5	0,08—0,30	0,33	0,50	—0,17	1,51	6,2	16,7	0,97
ЭИ437А	BK8	0,5	0,08—0,245	0,40	0,76	0,16	1,90	17,55	3,41	1,67
ЭХ12М HRC (60—61)	T15K6	0,5	0,08—0,20	0,45	0,65	0,10	1,44	6,4	10,7	1,46
ЭХ12М HRC (58—59)	T15K6	0,25	0,08—0,30	0,57	0,88	0,45	1,54	5,4	4,5	4,11
ЭХ12М HRC (60—61)	T14K8	0,25	0,08—0,17	0,55	0,32	—0,14	0,56	4,83	10,23	2,02

интенсивность размерного износа инструмента или наименьшую себестоимость обработки, а также для определения соответствующих величин поверхностного относительного износа $h_{o.п.o}$ и $h_{o.п.з}$, разработаны номограммы, представленные на рис. 39—43.

В основе номограмм [67] лежат параметрические уравнения максимальной размерной стойкости, результаты исследования высоты неровностей обработанной поверхности при оптимальных сочетаниях s и v и экономические расчеты.

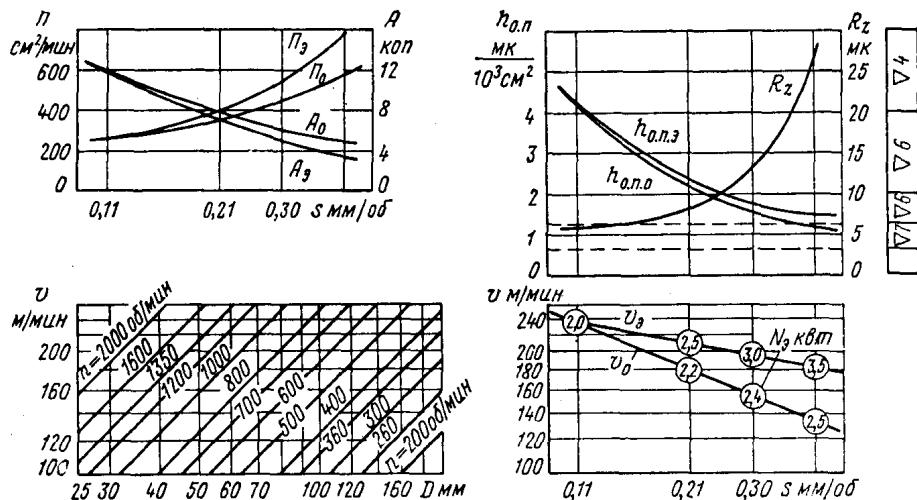


Рис. 39. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении стали 40XНМА резцами T14K8 ($t=1$ мм)

Номограммы позволяют по заданной высоте неровностей обработанной поверхности и принятой величине радиуса сопряжения задних поверхностей резца определить максимально допустимую величину подачи s_k . Работа на подачах $s > s_k$ не обеспечит требуемой чистоты обработки, а на подачах $s < s_k$ нерациональна, так как снижает производительность труда, повышает себестоимость обработки и поверхностный относительный износ (т. е. снижает точность обработки), а также увеличивает расход инструмента.

Для определения требуемых скоростей резания по найденной или принятой подаче на номограммах нанесены линии v_o и v_z . Линия v_o соответствует таким сочетаниям подач и скоростей резания, при которых в зоне резания создается оптимальная температура и обеспечивается минимальный поверхностный относительный износ, определяемый линией $h_{o.п.o}$.

Линия v_z соответствует сочетаниям подач и скоростей резания, при которых обеспечивается максимальная производительность общественного труда и минимальная себестоимость обра-

ботки. Поверхностный относительный износ при этом получается более интенсивным и определяется линией $h_{0,п.э.}$.

Повышение скорости резания от v_0 до v_3 приводит к повышению технологической производительности от P_0 до P_3 и снижению себестоимости обработки от A_0 до A_3 .

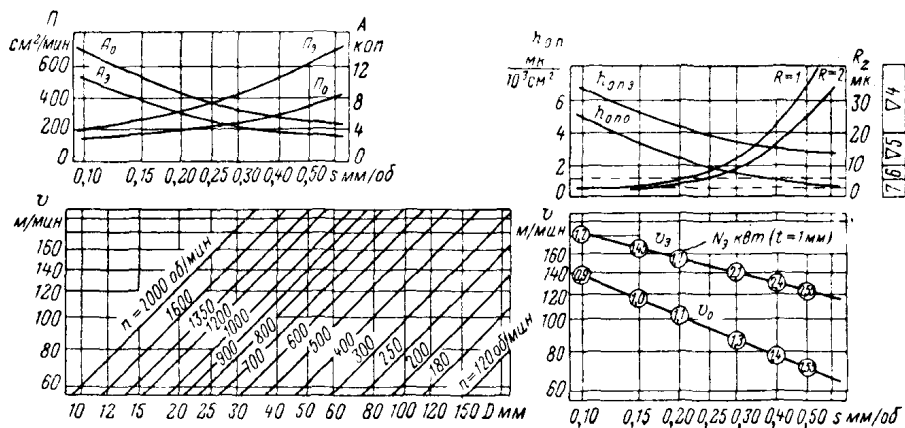


Рис. 40. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении стали 30ХГСА резцами Т15К6 ($t=1,5$ мм)

Поверхностный относительный износ при этом повышается от $h_{0,п.о.}$ до $h_{0,п.э.}$, следовательно, размерная стойкость инструмента и точность обработки снижаются.

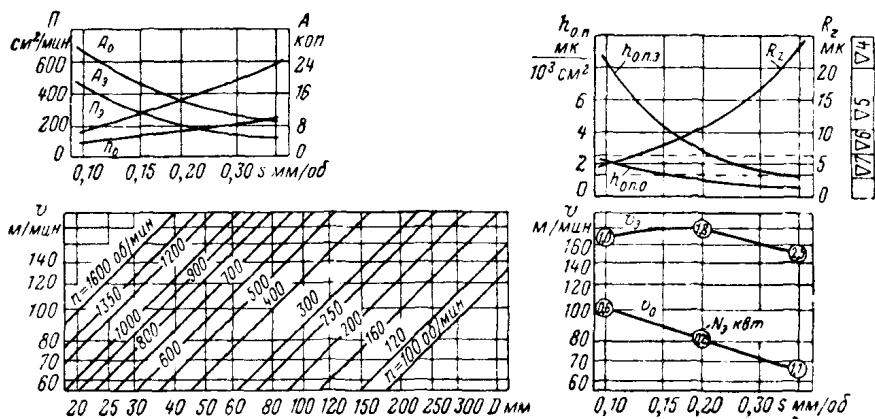


Рис. 41. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении стали ЭИ736 резцами Т14К8 ($t=1$ мм)

Работа на скоростях резания $v < v_0$ приводит к снижению производительности обработки и повышению ее себестоимости. Точность обработки и размерная стойкость инструмента при этом

также снижаются, а расход инструмента, отнесенный к одной детали, повышается.

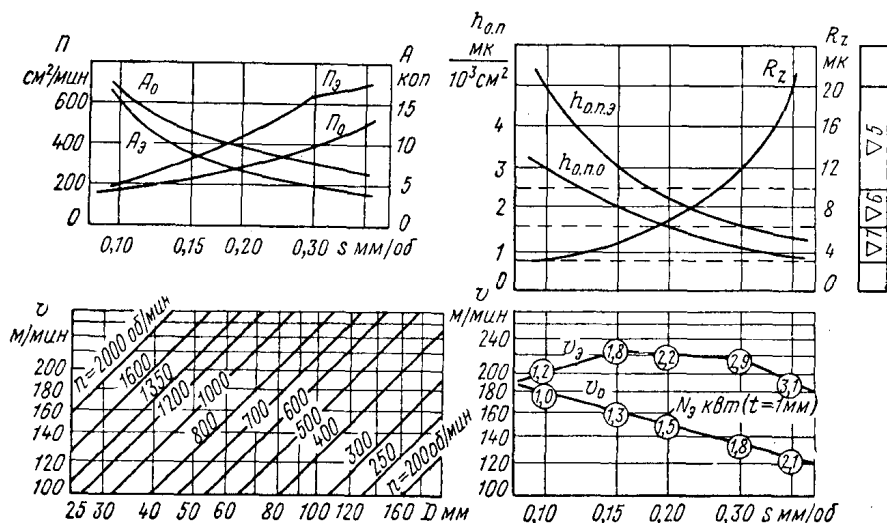


Рис. 42. Номограмма для определения подачи и скоростей резания при точении стали 1X18H9T резцами T14K8

Работа на скоростях резания $v > v_0$ приводит к повышению поверхностного относительного износа, повышению себестоимости обработки и снижению производительности общественного труда

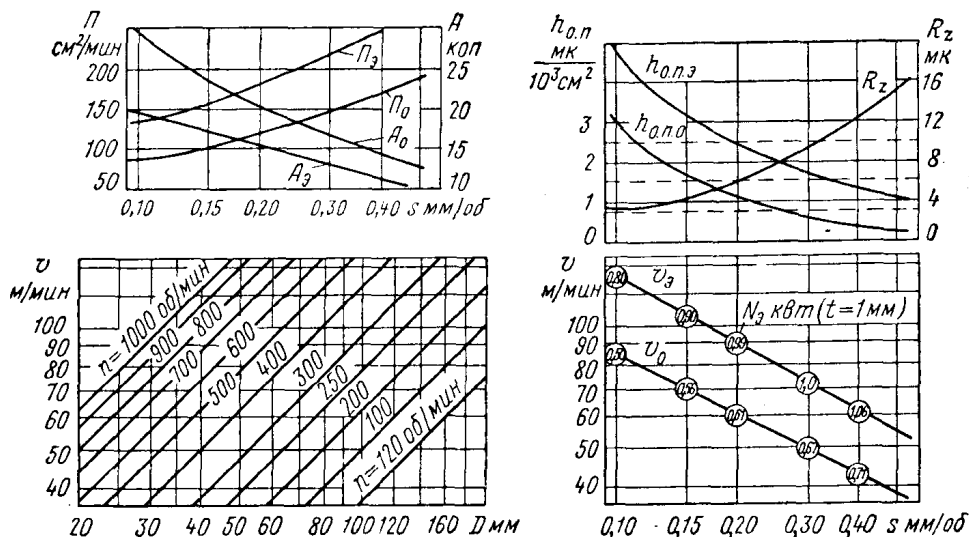


Рис. 43. Номограмма для определения подачи и скоростей резания при точении стали 1X18H9T резцами BK4 ($t=0,5 \div 2$ мм)

при некотором повышении технологической производительности труда на данном рабочем месте за счет резкого возрастания расхода инструмента.

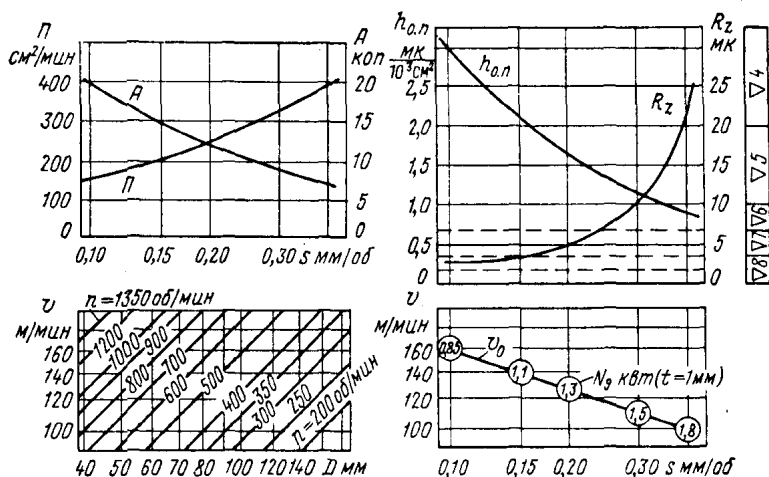


Рис. 44. Номограмма для определения подач и скоростей резания при чистовом точении стали 1X18H9T резцами Т30К4 ($t=0,50$ мм)

Целесообразный диапазон изменения скоростей резания заключен между линиями v_0 и v_9 . Скорости резания по линии v_0 должны выбираться при повышенных требованиях к точности

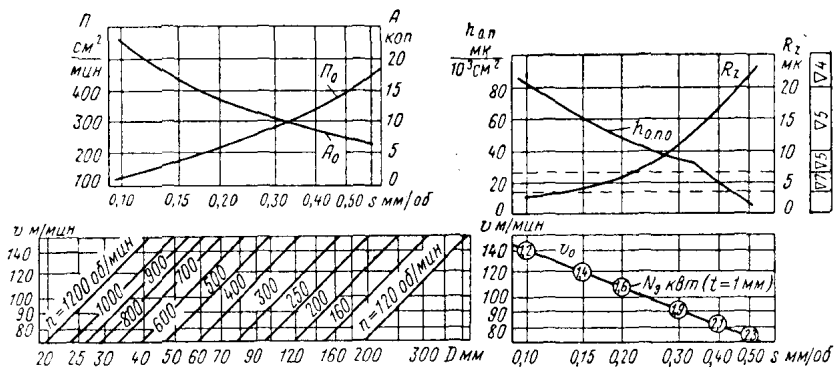


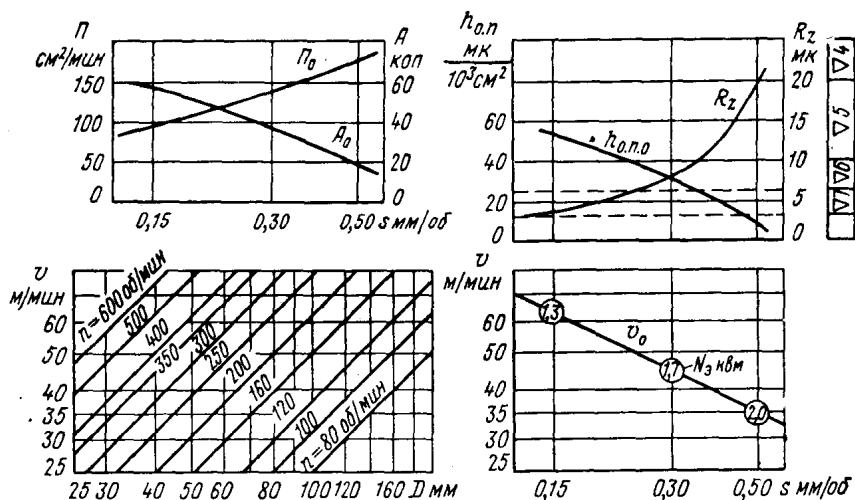
Рис. 45. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении стали ЭИ654 резцами Т14К6 ($t=0,5 \div 2$ мм)

обработки деталей, при обработке крупногабаритных деталей, при групповом методе обработки деталей, а также при эксплуатации инструмента на многорезцовых и автоматизированных станках.

В остальных случаях скорости резания должны выбираться по линии v_a .

По полученной скорости резания и диаметру обрабатываемой детали находится число оборотов шпинделя станка.

Наличие сетки с числами оборотов n шпинделя станка и линий v_o и v_a , на узловых точках которых проставлены величины эффективной мощности резания N_a , облегчает задачу наиболее полного использования мощности станка и режущих свойств резца. Числа оборотов необходимо округлять в большую сторону при выборе ско-



Такие номограммы одинаково удобны для рабочего и конструктора, технолога и нормировщика, так как они позволяют увя-

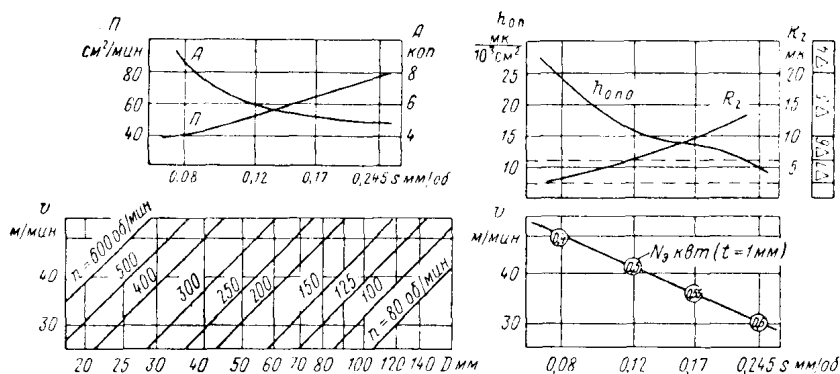


Рис. 47. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении стали ЭИ437А резцами ВК8 ($t=0,50$ мм)

зывать выбор режимов резания с чистотой, точностью, производительностью и себестоимостью обработки; рассчитывать точность обработки на станках; снизить потери времени работы оборудова-

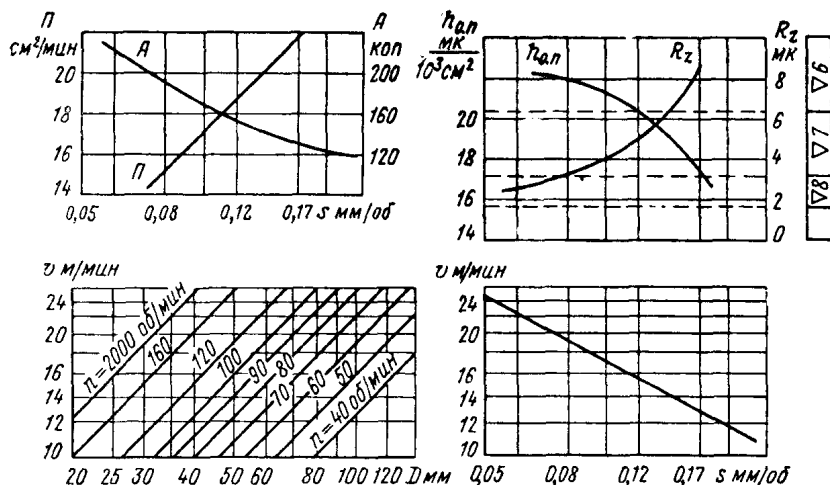


Рис. 48. Номограмма для определения подач и скоростей резания при точении закаленной стали X12M (HRC 60—61) резцами T14K8 ($t=0,25$ мм)

ния на смену изношенного инструмента; обоснованно назначать кинематические характеристики вновь проектируемых специальных станков.

10. Основные выводы

1. Применяемые в настоящее время нормативы по режимам резания, разработанные на основе стойкостных зависимостей вида $v=f(T)$ и $v=f(T, t, s)$, не учитывают размерной стойкости инструмента и связанной с ней точности обработки, поэтому не отвечают полностью требованиям, возникающим при конструировании и отладке автоматического оборудования.

2. При чистовой обработке углеродистых и легированных сталей, жаропрочных сталей и сплавов, а также закаленных сталей резцами, оснащенными различными твердыми сплавами, каждому значению подачи соответствует определенная оптимальная скорость резания v_0 , при работе на которой достигается максимальная размерная стойкость инструмента.

3. Снижение скорости резания ниже оптимальной v_0 всегда приводит к снижению размерной стойкости инструмента и точности обработки, хотя период общей стойкости T в отдельных случаях при этом может быть выше оптимального периода стойкости T_0 , наблюдаемого при работе на оптимальной скорости резания v_0 .

Таким образом, современная техническая литература и нормативы по режимам резания в ряде случаев ориентируют на более высокие значения T и тем самым на использование явно заниженных скоростей резания.

4. Оптимальным скоростям резания для данного сочетания обрабатываемого материала и инструмента при работе на любой подаче соответствует одна и та же оптимальная температура резания, являющаяся своего рода физической константой для заданной пары резец—изделие. При этой температуре наблюдается наименьшая (но различная для разных подач) интенсивность износа и максимальная размерная стойкость инструмента.

Это положение о постоянстве оптимальной температуры резания для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{0.п}=f(v)$, полученных при работе на различных подачах, носит характер всеобщности, так как оно строго подтверждается при обработке твердосплавными резцами углеродистых, закаленных и легированных сталей, а также жаропрочных сталей и сплавов.

5. На основе положения о постоянстве оптимальной температуры резания автором разработан метод ускоренного определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, позволяющий подобрать оптимальные режимы автоматизированных процессов обработки резанием. Для этого достаточно зафиксировать величину т. э. д. с., возникающей в паре резец—изделие при работе на любом из сочетаний s и v , удовлетворяющих уравнению максимальной размерной стойкости, и поддерживать постоянство этой т. э. д. с.

Таким образом, оптимальные сочетания s и v и величины $h_{0.п.0}$ можно определить на основании всего лишь двух стойкостных испытаний и одного по определению т. э. д. с.

6. Положение о постоянстве так называемой рациональной температуры контакта, на основе которого рядом исследователей предлагается методика сокращенных стойкостных испытаний соблюдается лишь в частных случаях и не носит всеобщего характера.

Рациональная температура контакта, найденная при стойкостных испытаниях на одной подаче, при распространении ее на другие подачи может дать ошибку в определении скоростей резания до 40—60%.

7. Чем хуже обрабатываемость металла резанием, тем резче проявляется экстремальный характер зависимости $h_{o,п} = f(v)$, тем уже диапазон целесообразных скоростей резания и тем выгодней расчетное определение оптимальных режимов резания по параметрическим уравнениям максимальной размерной стойкости инструмента.

8. Представленные номограммы облегчают выбор оптимальных сочетаний подач и скоростей резания и определение соответствующих им величин поверхностного относительного износа. Номограммы позволяют увязывать выбор режимов резания с чистотой, точностью, производительностью и себестоимостью обработки, производить расчеты точности обработки на металлорежущих станках, снизить потери времени работы оборудования, вызываемые износом инструмента, что особенно важно при автоматизированных процессах обработки, обоснованно назначать кинематические характеристики проектируемых станков. Для правильной, технически грамотной эксплуатации инструмента такие номограммы необходимо иметь для всех основных обрабатываемых на данном производстве материалов.

Глава IV

ВЛИЯНИЕ СЕЧЕНИЯ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ НА РАЗМЕРНУЮ СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Подача оказывает непосредственное влияние на технологическую производительность и себестоимость обработки деталей и на качество обработанной поверхности. Поэтому установление влияния подачи на стойкость инструмента имеет большое практическое значение.

Установлением характера зависимостей $h_{0.л} = f(s)$ занимался ряд исследователей, например в работах [9] [34] [35] [39] [76]. При рассмотрении этих работ обнаруживаются большие противоречия. Так, большинство исследователей считают, что с повышением подачи интенсивность износа инструмента возрастает. Такой вывод следует и из общепринятой зависимости периода стойкости инструмента от элементов режима резания

$$T = \frac{C^{1/m}}{v^{1/m} s^{y/m} t^{x/m}}.$$

Если принять $v = \text{const}$ и $t = \text{const}$, а размерную стойкость определять, как часть общего периода стойкости инструмента, то можно прийти к выводу о повышении размерной стойкости при снижении подачи.

Это, по-видимому, и служит теоретической основой проникших в техническую литературу ошибочных рекомендаций об использовании весьма малых подач при чистовом точении сталей.

Некоторыми исследователями получены кривые $h_{0.л} = f(s)$, имеющие точки минимума. Часть исследователей считает, что с повышением подачи относительный износ снижается, а по данным других авторов изменение подачи вообще не сказывается на величине относительного износа.

Такая противоречивость оценки влияния подачи на интенсивность износа резцов, по-видимому, связана с тем, что исследования проводились при постоянных скоростях, соответствующих различным температурам в зоне резания. Изменение подачи (при $v = \text{const}$)

приводило к изменению тепловой напряженности процесса резания, являющейся одним из решающих факторов (для заданной пары обрабатываемый материал — инструмент) интенсивности износа инструмента (см. рис. 24—26).

Зависимость относительного износа от температуры контакта в зоне резания $h_{o,л} = f(\theta^\circ)$ подобна зависимости относительного износа от скорости резания $h_{o,л} = f(v)$ и носит экстремальный характер. Повышение подачи приводит к повышению температуры в зоне резания, и подача как температурный фактор оказывает большое влияние на изменение относительного износа. Следовательно, для того, чтобы получить наиболее полное и правильное представление о влиянии подачи на интенсивность износа инструмента, следует рассматривать это влияние с учетом уровня применяемых скоростей резания и диапазона изменения температур контакта, вызываемого изменением подачи.

1. Влияние подачи на размерную стойкость инструмента при постоянной оптимальной температуре резания

Установление закономерностей влияния подачи на размерную стойкость инструмента при постоянной оптимальной температуре резания θ_o является важнейшей задачей теории и практики, так как в подавляющем большинстве случаев инструменты должны эксплуатироваться на оптимальных сочетаниях s и v , обеспечивающих θ_o и максимальную размерную стойкость.

Размерная стойкость инструмента T_p равна произведению радиального износа h_r , принимаемого в качестве критерия затупления, на удельную размерную стойкость $T_{y,p}$, т. е.

$$T_p = h_r T_{y,p} 10^3 \text{ см}^2. \quad (43)$$

Чем меньше поверхностный относительный износ резца, тем выше его удельная размерная стойкость, тем большее число деталей может быть обработано в пределах допуска без подналадки инструмента.

Назовем удельную размерную стойкость, соответствующую оптимальному поверхностному относительному износу, оптимальной $T_{o,y,p}$.

Величина $h_{o,п,о}$, а следовательно, и величина $T_{o,y,p}$ определяются параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости (36).

Подставляя в уравнение (43) значение $h_{o,п,о}$ из уравнения (36), получаем

$$T_p = h_r T_{o,y,p} = \frac{h_r}{h_{o,п,о}} = \frac{h_r}{\frac{C_2}{s^{x_2}}} = \frac{h_r}{C_2} s^{x_2}. \quad (44)$$

Так как $C_2 = \text{const}$, то при $h_r = \text{const}$ размерная стойкость резца пропорциональна величине подачи в степени x_2 .

Показатель степени x_2 при обработке различных материалов колеблется в пределах от 0,32 до 1,75 (см. табл. 14) и является величиной положительной. Следовательно, при обработке различных по своим свойствам материалов (легированные стали, жаропрочные стали, жаропрочные сплавы и закаленные стали) повышение подачи при сохранении постоянства оптимальной температуры резания приводит к повышению размерной стойкости резцов.

Чем больше показатель степени x_2 , тем повышение подачи сильнее влияет на повышение размерной стойкости и тем выгоднее с точки зрения размерной стойкости инструмента работать на увеличенных подачах.

Так, повышение подачи в 4 раза (от 0,10 до 0,40 мм/об) при точении стали 1X18H9T резцом ВК6 (показатель степени $x_2=1,3$) приводит к повышению размерной стойкости в 6,2 раза, а при точении той же стали резцом Т30К4 (показатель степени $x_2=0,88$) — лишь в 3,28 раза.

Линейный относительный износ $h_{o.л}$ не является универсальной характеристикой размерной стойкости инструмента, поэтому зависимость $h_{o.л}=f(s)$ является менее ценной для анализа вопросов размерной стойкости по сравнению с зависимостями $h_{o.п}=f(s)$ и $T_p=f(s)$. Однако, учитывая, что понятие относительного линейного износа все еще применяется в технической литературе, рассмотрим характер зависимости $h_{o.л}=f(s)$ при обработке различных материалов.

Так как

$$h_{o.п.o} = \frac{h_{o.л.o}}{10s} \quad (45)$$

и

$$h_{o.п.o} = \frac{C_2}{s^{x_2}},$$

то

$$h_{o.л.o} = \frac{10sC_2}{s^{x_2}} = 10C_2s^{1-x_2}. \quad (46)$$

Формула (46) показывает, что при $x_2 < 1$ линейный относительный износ с повышением подачи возрастает, при $x_2 > 1$ — $h_{o.л}$ снижается, а при $x_2 = 1$ подача на величину $h_{o.л}$ влияния не оказывает (при $h_o = \text{const}$).

Значение показателя степени x_2 зависит от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента. Чем хуже обрабатываемость металла резанием, тем меньше показатель степени x_2 . Так, для резцов Т15К6 при точении стали 40Х и 30ХГСА $x_2 = 1,25 \div 1,6$; при точении жаропрочной стали ЭИ654 $x_2 = 0,76$, а при точении закаленной стали ЭХ12М (HRC 60—61) $x_2 = 0,65$;

Для резцов ВК8 при точении стали 1X18H9T $x_2=1,6$; при точении более труднообрабатываемой жаропрочной стали ЭИ654 $x_2=1,15$, а при точении жаропрочного сплава ЭИ437А $x_2=0,76$.

При точении стали 1X18H9T и ЭИ654 значение x_2 для резцов вольфрамокобальтовой группы больше, чем для резцов вольфрамтитанокобальтовой группы, а при точении жаропрочных сталей и закаленных сталей значение x_2 для резцов Т14КВ меньше, чем для резцов Т15К6.

При постоянной оптимальной температуре резания увеличение подачи может приводить как к снижению линейного относительного износа, так и к его повышению в зависимости от свойств материала детали и резца, но и в тех случаях, когда $x_2 < 1$, повышение подачи приводит к снижению поверхностного относительного износа резца и повышению его размерной стойкости, хотя линейный относительный износ при этом и возрастает.

2. Влияние подачи на период стойкости резца при постоянной оптимальной температуре резания

Доктор Рейхель [82] высказал положение, сводящееся к тому, что определенному периоду стойкости резца соответствует одна и та же температура резания, не зависящая от комбинации элементов режима резания (t, s, v) при определенном обрабатываемом материале и резце.

В научном и практическом отношении представляет большой интерес установление взаимосвязи между периодом стойкости резца и величиной подачи при условии сохранения постоянства оптимальной температуры резания θ_o .

Зависимость $T=f(s)$ при $\theta_o=\text{const}$ может быть получена следующим образом.

Из уравнений (1) и (45)

$$l = \frac{(h_r - h_n) 100}{sh_{o, \text{п.о}}} + l_n,$$

но так как

$$l = v_o T_o,$$

то

$$T_o = \frac{100(h_r - h_n) + l_n sh_{o, \text{п.о}}}{h_{o, \text{п.о}} s v_o}. \quad (47)$$

Приравняв, как и в уравнении (32), для простоты l_n и h_n нулю, получаем

$$T_o = \frac{100 h_r}{h_{o, \text{п.о}} s v_o}. \quad (48)$$

Подставив в уравнение (48) вместо v_0 и $h_{0.п.0}$ их значения из уравнения (36), получим

$$T_0 = \frac{100h_r}{v_0 h_{0.п.0} s} = \frac{100h_r}{\frac{C_1}{s^{x_1}} \frac{C_2}{s^{x_2}} s} = \frac{100 \cdot h_r}{C_1 C_2} s^{x_1+x_2-1} = C_3 h_r s^{x_3}, \quad (49)$$

где

T_0 — оптимальный период стойкости в мин;

h_r — величина радиального износа, принимаемая в качестве критерия затупления;

C_3 — постоянный коэффициент;

$x_3 = x_1 + x_2 - 1$ — показатель степени.

Значения x_3 при обработке различных материалов приведены в табл. 14.

В общем случае возможно одно из следующих трех условий:

$$x_3 > 0;$$

$$x_3 < 0;$$

$$x_3 = 0.$$

Нетрудно видеть, что только при $x_3 = 0$ период стойкости не зависит от величины подачи и любой комбинации s и v , обеспечивающей постоянство оптимальной температуры резания, соответствует постоянный период стойкости, что отвечает принципу Рейхеля [82]. Таким образом принцип Рейхеля, применительно к оптимальной температуре резания вытекает из формулы (49) как частный и довольно редко встречающийся в практике случай, когда $x_3 = 0$.

Однако из табл. 14 следует, что в подавляющем большинстве случаев $x_3 > 0$, т. е. является положительной величиной; повышение подачи в этом случае приводит к росту периода стойкости. Например, при точении стали 30ХГСА резцом Т15К6 при $t = 1,5$ мм повышение подачи от 0,11 до 0,52 мм/об привело к повышению T_0 с 18 до 70 мин. При точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК8 при $t = 0,5$ мм повышение подачи от 0,10 до 0,40 мм/об повысило T_0 с 19,5 до 64 мин. Аналогичные результаты получены при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК6 и ВК4 при $t = 0,5$ мм, стали ЭИ654 резцами ВК6 при $t = 2$ мм и в ряде других случаев.

Когда $x_3 < 0$, то повышение подачи приводит к некоторому снижению периода стойкости. Такие случаи, по всей вероятности, будут наблюдаться при неудачном выборе марки твердого сплава. Так, при точении жаропрочного сплава ЭИ437А резцами ВК15М $x_3 = -0,17$, а для резцов ВК8 $x_3 = 0,16$, так как резцы ВК15М по сравнению с резцами ВК8 обладают значительно меньшей размерной стойкостью, а для таких материалов, как закаленная сталь ЭХ12М твердостью HRC 60—61 при точении резцами Т15К6, или жаропрочная сталь ЭИ654 при точении резцами Т14К8 $x_3 = \pm 0,10$. В этих слу-

чаях с некоторым приближением можно говорить о соблюдении принципа Рейхеля.

Формула (49) связывает период стойкости с подачей, когда за критерий износа принимается некоторая величина радиального износа h_r , а величины l_n и h_n приняты равными нулю. При проведении стойкостных опытов критерием износа обычно служит некоторая ширина фаски износа по задней, поверхности h_z . Естественно, что между опытными данными о влиянии подачи на оптимальный период стойкости и данными расчета по формуле (49) может быть полное соответствие лишь в том случае, когда при изменении подачи сохраняется постоянство отношения величины радиального износа к ширине фаски износа по задней поверхности h_r/h_z . Однако чаще всего повышение подачи приводит к снижению этого отношения.

Само собою разумеется, что при эксплуатации инструмента в условиях автоматизированного производства, а также в крупном и точном машиностроении, в качестве критерия затупления лучше принимать некоторую величину h_r , увязанную с полем допуска, а не h_z [22].

Следовательно, формула (49), определяющая оптимальный период стойкости инструмента в зависимости от подачи и величины износа h_r , принимаемого в качестве критерия затупления, является своего рода переходом от непривычных зависимостей, определяемых параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости, к общепринятым стойкостным формулам (при $\theta_0 = \text{const}$).

В заключение отметим, что даже в тех случаях, когда показатель степени x_3 отрицателен и оптимальный период стойкости T_0 с повышением подачи снижается, размерная стойкость инструмента с повышением подачи (при $\theta_0 = \text{const}$) все же возрастает, так как показатель степени x_2 во всех исследованных нами случаях положительен.

3. Влияние подачи на период стойкости резца при постоянной произвольно выбранной температуре резания

Выше было показано, что принцип Рейхеля (при $\theta_0 = \text{const}$) справедлив лишь в частных случаях.

Может возникнуть вопрос о справедливости принципа Рейхеля применительно к произвольно выбранным температурам резания, соответствующим определенным периодам стойкости, но при несоблюдении этого принципа применительно к оптимальной температуре резания, т. е. когда $\theta_0 \neq \text{const}$.

Ответить на этот вопрос необходимо хотя бы потому, что до сих пор у различных исследователей на этот счет нет единого мнения [77], [82], [84].

Наши исследования показывают (табл. 15), что при одном и том же периоде стойкости различным сочетаниям s и v соответствует различная температура резания или т. э. д. с. При этом разность в величине термоэлектродвижущей силы ΔE колеблется в пределах

от 0,9 до 1,55 мв, что эквивалентно изменению скорости резания Δv (при $s=0,20$ мм/об) на 28—100%.

Точно так же при постоянной температуре резания или т. э. д. с. различным сочетаниям v и s соответствуют различные периоды стойкости. Так, при $E=14,5$ мв в случае чистового точения стали 1Х18Н9Т резцом ВК3 период стойкости для различных сочетаний s и v колебался в пределах от 17,5 до 70 мин., а при точении той же стали резцом ВК4 (при $E=14,0$ мв) период стойкости колебался в пределах от 40 до 98 мин.

Исследования показывают (табл. 16), что при работе на подаче 0,61 мм/об (при $t=5$ мм) и скорости резания 72 м/мин период стойкости составил 45 мин, а на подаче 0,39 мм/об и скорости резания 82 м/мин — только 17,5 мин, хотя в обоих случаях наблюдалась одна и та же температура резания.

Таблица 15

Влияние подачи при $T=\text{const}$ на температуру резания
(или величину т. э. д. с. E мв) при чистовом точении некоторых материалов

Обрабатываемый материал	Материал резца	t мм	s мм/об	T мин	v_T м/мин	E_T мв	$\Delta E_T = E_{\max} - E_{\min}$	Δv %
30ХГСА	Т15К6	1,5	0,11	30	100	7,8	1,55	100
			0,21		106	8,85		
			0,30		102	9,1		
			0,52		101	9,35		
1Х18Н9Т	Т30К4	0,5	0,10	25	138	17	1,5	43
			0,15		145	18		
			0,20		115	17,6		
			0,30		125	18,4		
			0,40		115	18,5		
1Х18Н9Т	ВК4	0,5	0,10	60	136	14,4	1,0	32
			0,15		111	14,7		
			0,20		92	14,2		
			0,30		70	13,7		
			0,40		64	14,1		
1Х18Н9Т	ВК6	0,5	0,10	60	106	13,7	0,9	28
			0,15		100	14		
			0,20		82	13,6		
			0,30		78	14		
			0,40		80	14,5		
ЭИ736	Т14К8	1,0	0,10	60	102	16,2	1,2	47
			0,20		110	17,1		
			0,40		100	17,4		

Влияние подачи на температуру резания и период стойкости резца ВК8
при черновом точении стали 1Х18Н9Т

($t=5$ мм; $\gamma=15^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $r=1,5$ мм; $h_3=0,30$ мм)

s мм/об	$v=72$ м/мин		$v=82$ м/мин	
	θ° С	T мин	θ° С	T мин
0,21	881	34	906	41
0,39	920	52	946	17,5
0,61	950	45	977	3,7

Следовательно, при повышении подачи (при $\theta = \text{const}$) происходит значительное повышение стойкости также и при снятии стружек крупного сечения ($t=5$ мм).

Таким образом, и в случае сохранения постоянства произвольно выбранной (не оптимальной) температуры резания при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК8 принцип Рейхеля не подтверждается.

В рассмотренных опытах (см. табл. 15—16) при работе на различных подачах (при $T = \text{const}$ или $\theta = \text{const}$) резцы затуплялись до одинаковой ширины фаски износа по задней поверхности ($h_3=0,30$ и $0,40$ мм). Но при эксплуатации инструмента в автоматизированном производстве, как уже отмечалось, лучше за критерий износа (затупления) принимать некоторую величину радиального износа h_r .

При работе на различных скоростях резания и подачах величина отношения h_r/h_3 не остается строго постоянной. Поэтому различные критерии затупления (h_3 или h_r) могут привести к некоторым различиям в величине температур резания при работе на различных подачах при сохранении постоянства периода стойкости (или к различиям в периодах стойкости при сохранении постоянства температуры резания).

В тех случаях, когда за критерий затупления принимается некоторая величина радиального износа h_r , исследование зависимостей $T=f(\theta)$ при работе на различных подачах может быть заменено исследованием зависимостей $v_n=f(\theta)$.

Нетрудно видеть, что необходимым условием соблюдения принципа Рейхеля в этом случае должно быть совпадение кривых $v_n=f(\theta)$ для различных подач.

Экспериментальные данные о влиянии температуры резания на скорость размерного износа при точении различных сталей твердосплавными резцами с различными подачами представлены на рис. 49, откуда видно, что скорости размерного износа во всем практически целесообразном диапазоне изменения скоростей (и температур) резания для различных подач сильно отличаются друг от друга. Например, при температуре резания 800°C повышение подачи от $0,10$ до $0,40$ мм/об приводит к снижению скорости размерного

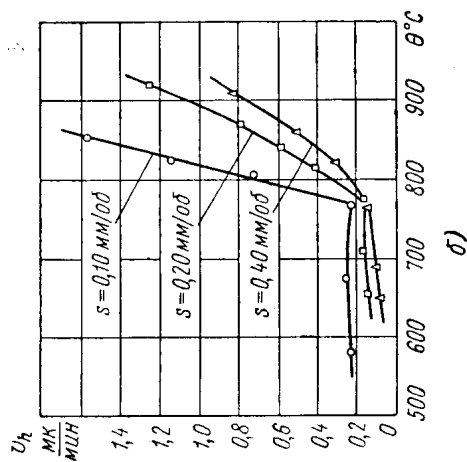
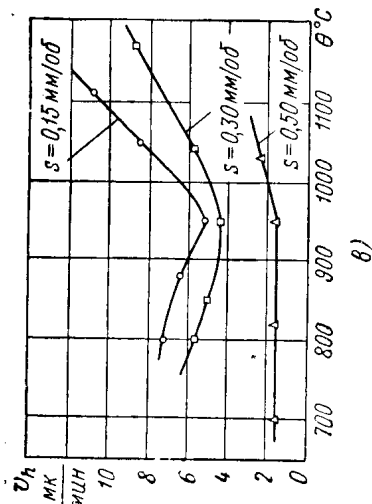
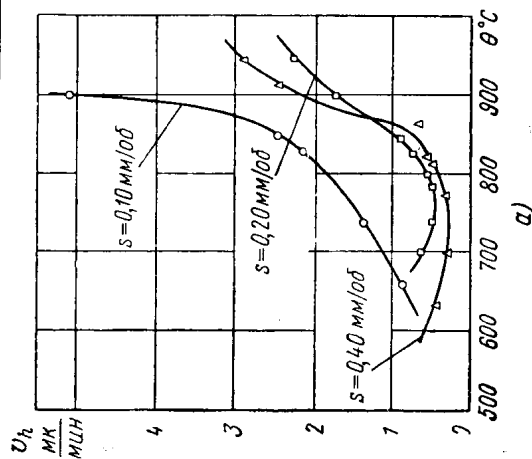


Рис. 49. Зависимость скорости резания от температуры кон-
такта при точении:

а—сталь 1Х18Н9Т, резец ВК8; $t=0.50$ мм;
б—сталь ЭИ336, резец Т14К8; $t=1.0$ мм;
в—сталь ЭИ654, резец ВК6; $t=2$ мм

износа с 1,85 до 0,35 *мк/мин* (в 5,3 раза), а при температуре резания 850°С — с 2,45 до 0,65 *мк/мин* (в 3,75 раза).

Таким образом, получив на основе стойкостных и температурных испытаний эмпирическую зависимость периода стойкости (или скорости размерного износа) от температуры резания для подачи 0,40 *мм/об* и распространив эту зависимость на другие подачи, можно совершить ошибку в определении периода стойкости более чем на 400%.

При точении жаропрочной стали ЭИ736 резцами Т14К8 и при точении стали ЭИ654 резцами ВК6 скорости размерного износа для различных подач (при $\theta = \text{const}$) также сильно отличаются друг от друга. Например, при постоянной температуре 850°С повышение подачи от 0,10 до 0,40 *мм/об* приводит к снижению скорости размерного износа от 1,58 до 0,42 *мк/мин* (в 3,8 раза). При точении стали ЭИ654 резцами ВК6 при постоянной температуре 950°С повышение подачи от 0,15 до 0,50 *мм/об* приводит к снижению скорости размерного износа от 5,1 до 1,46 *мк/мин* (в 3,5 раза).

Следовательно, при применении температурного метода установления зависимостей $v = f(T, s)$, основанного на принципе Рейхеля, можно совершить ошибку в определении скорости размерного износа и периода стойкости на 240—250%.

Данные о совершенной неприемлемости принципа Рейхеля получены также при точении стали 40ХНМА резцами Т14К8 (см. рис. 24), и стали 1Х18Н9Т резцами ВК6 и ВК3 (см. рис. 25—26).

4. Влияние подачи на производительность

Производительность процесса резания может определяться объемом металла, превращаемого в стружку в единицу времени (объемная производительность P_v) или площадью новой поверхности, образуемой в единицу времени (поверхностная производительность P_n). Объемная и поверхностная производительность при точении могут быть выражены уравнениями:

$$P_v = stv \text{ см}^3/\text{мин}; \quad (50)$$

$$P_n = 10sv \text{ см}^2/\text{мин}. \quad (51)$$

Объемная производительность лучше подходит для определения производительности при черновой обработке, когда удаляется большой припуск. Интенсивность процессов чистовой обработки наиболее полно характеризует поверхностная производительность.

В нашей работе рассматриваются вопросы размерного износа и размерной стойкости инструмента при чистовой обработке металлов, поэтому производительность этих процессов мы будем характеризовать величиной P_n .

Наименьшая интенсивность размерного износа и максимальная размерная стойкость, как мы установили, наблюдаются при оптимальном сочетании подачи и скорости резания, обеспечивающем постоянство оптимальной температуры резания.

Производительность при оптимальном сочетании подачи и скорости резания (так называемая оптимальная производительность обработки P_o) может быть определена по формуле (51), т. е.

$$P_o = 10v_o s.$$

Подставляя вместо v_o ее значение по выражению (36), получим

$$P_o = \frac{10sC_1}{s^{x_1}} = 10C_1 s^{1-x_1}. \quad (52)$$

Из формулы (52) следует, что оптимальная производительность обработки при повышении подачи возрастает и тем больше, чем меньше величина показателя степени x_1 . Например, увеличение подачи в 4 раза (от 0,10 до 0,40 мм/об) при точении стали 1Х18Н9Т резцом Т14К8 ($x_1=0,25$) на оптимальных скоростях резания повышает P_o в 2,82 раза, а при точении той же стали резцом ВК4 ($x_1=0,50$) и при том же увеличении подачи P_o возрастает лишь в 2 раза.

Следовательно, повышение подачи при работе на оптимальных скоростях резания приводит к одновременному повышению производительности обработки и размерной стойкости инструмента.

5. О характере зависимостей $h_{o.п} = f(s)$ при $v = \text{const}$

Значительный интерес представляет установление влияния подачи на интенсивность размерного износа при сохранении постоянства площади обработанной поверхности (или массы снятого металла). В этом случае длина пути резания будет изменяться обратно пропорционально изменению подачи.

Интенсивность размерного износа при сохранении постоянства площади обработанной поверхности характеризуется, как известно, только поверхностным относительным износом $h_{o.п}$.

Подача может влиять на поверхностный относительный износ при $P = \text{const}$ следующим образом.

1. С повышением подачи (при $v = \text{const}$) пропорционально уменьшается длина пути резания, следовательно, уменьшается время резания и величина износа. Поэтому повышение подачи, как фактор, уменьшающий длину пути резания, всегда действует в сторону снижения поверхностного относительного износа.

2. При изменении подачи происходит изменение температуры резания, поэтому как температурный фактор, подача должна влиять на интенсивность износа режущего инструмента (см. рис. 24—26).

Здесь возможны три случая:

а) работа происходит на сравнительно низких скоростях резания, и для всех подач температура резания ниже оптимальной. Повышение подачи в этом случае уменьшает трение на поверхностях контакта, уменьшает интенсивность адгезионных явлений [52] и интенсивность износа инструмента;

б) работа ведется на средних скоростях резания, когда температура в зоне резания при повышении подачи переходит через оптимальное значение. В этом случае зависимость интенсивности износа от подачи, как температурного фактора, будет иметь точку минимума. Пока температура резания ниже оптимальной, повышение подачи снижает интенсивность износа за счет снижения интенсивности адгезионных явлений. При некотором значении подачи температура резания принимает оптимальное значение, соответствующее минимальной интенсивности износа инструмента. Дальнейшее повышение подачи приводит к повышению интенсивности износа инструмента за счет повышения интенсивности диффузионных процессов [52];

в) при работе на сравнительно высоких скоростях резания, когда температура резания для всех подач выше оптимальной, повышение подачи повышает интенсивность диффузионных процессов и действует в сторону повышения интенсивности износа [52].

3. При изменении подачи изменяются глубина наклепанного слоя h_c и величина отношения глубины наклепа к толщине среза

$$\Delta h_c = \frac{h_c}{a}.$$

При работе на малых подачах глубина наклепа может оказаться выше толщины среза ($\Delta h_c > 1$) и режущее лезвие все время будет работать в наклепанном слое, но при некотором значении подачи толщина среза становится выше глубины наклепа ($\Delta h_c < 1$), и режущее лезвие будет работать под наклепанным слоем [13]. Следовательно, подача может выступать как фактор, изменяющий исходные механические свойства срезаемого слоя металла.

В том случае, когда режущее лезвие будет работать в наклепанном слое, интенсивность износа инструмента будет повышенной. При работе лезвия под наклепанным слоем (что может быть достигнуто путем повышения подачи) интенсивность износа инструмента должна снижаться.

4. При изменении подачи (при $v = \text{const}$) могут изменяться нормальные и касательные силы и коэффициент трения на задней поверхности, во многом определяющие интенсивность износа режущих инструментов.

Однако это влияние подачи на износ инструмента почти целиком является косвенным и может проявляться при работе лишь на сравнительно низких скоростях резания [25].

5. С изменением подачи изменяется контактное давление на передней грани резца. С ростом подачи нормальное удельное давление на передней грани увеличивается, так как площадь контакта растет в меньшей степени, чем силы нормального давления [25].

Помимо трения, как единственной «нормальной» причины износа инструмента, высокие подачи (так называемые, ломающие) могут вызывать весьма интенсивный износ в виде осыпания, выкрашивания и сколов режущих кромок.

6. Изменение подачи изменяет частоту и амплитуду вибраций. Вибрации, как известно, увеличивают износ инструмента *, ухудшают чистоту обработанной поверхности, снижают производительность оборудования и срок его службы [36]. Кроме того, наклепанный слой металла при вибрациях имеет гораздо большую твердость, чем без вибраций.

Наблюдения за процессом резания, показывают, что с повышением толщины среза вибрации уменьшаются. Следовательно, повышение подачи благодаря уменьшению вибраций будет действовать в сторону снижения интенсивности размерного износа инструмента. Этот фактор будет проявляться тем сильнее, чем меньше жесткость и виброустойчивость системы СПИД. Вибрации, наряду с непосредственным влиянием на интенсивность износа инструмента, имеют и косвенное влияние через глубину и степень наклепа поверхностного слоя.

7. При повышении подачи величина отношения $\lambda = P_y/P_z$ уменьшается, что приводит к росту жесткости суппорта и системы СПИД [31]. Повышение жесткости системы снижает вибрации и износ инструмента [40], [41], [43] и повышает чистоту обработанной поверхности.

Естественно, что при повышении подачи интенсивность размерного износа будет определяться совокупным действием рассмотренных факторов.

Некоторые факторы (1, 3, 6, 7) при повышении подачи при любых скоростях резания действуют в сторону снижения поверхностного относительного износа. Направление действия подачи, как температурного фактора, зависит от уровня скоростей (и температур) резания. Остальные факторы могут действовать лишь при определенных скоростях резания, тогда как при работе с другими скоростями их действием практически можно пренебречь.

Различные обрабатываемые материалы, обладающие различными механическими и теплофизическими характеристиками, имеют различную склонность к адгезии, диффузии, наклепу и наростообразованию, обладают различной вибровозбуждаемостью и дают различную степень изменения температуры резания в зависимости от подачи. Все это, безусловно, будет сказываться на характере зависимости $h_{o.п} = f(s)$, как результат одновременного действия многих факторов.

Различия в свойствах инструментальных материалов (твердость и прочность в исходном состоянии и при температурах резания, склонность к адгезии и диффузии) также будут оказывать влияние на характер этой зависимости.

6. Зависимость $h_{o.п} = f(s)$ при точении различных материалов

В качестве примера рассмотрим влияние подачи на величину поверхностного относительного износа резца Т14К8 при точении

* Вопросы вибрационного резания здесь не рассматриваются.

стали ЭИ654. Подача изменялась от 0,2 до 0,4 мм/об. Так как толщина среза при работе на всех подачах была больше глубины наклепанного слоя и в процессе резания не было вибраций и сколов режущего лезвия, то факторы 3, 5, 6 и 7 при повышении подачи не могли оказать влияния на изменение интенсивности износа. Действием фактора 4 также можно пренебречь, потому что нормальные и касательные силы на задней грани при изменении подачи остались без изменения.

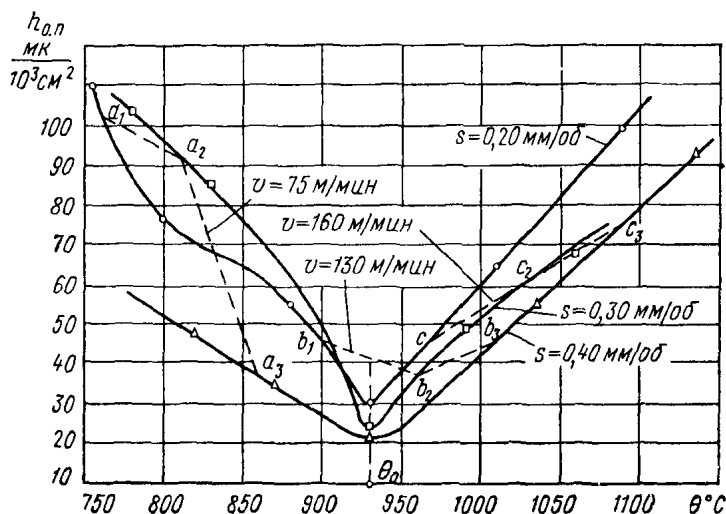


Рис. 50. Влияние средней температуры контакта на величину поверхностного относительного износа при точении.

Сталь ЭИ654, резец Т14К8; $t=1,0$ мм

Следовательно, характер зависимости $h_{o.п}=f(s)$ в данном случае будет определяться действием факторов 1 и 2. Фактор 1 при повышении подачи всегда действует в сторону снижения величины $h_{o.п}$. Влияние фактора 2, т. е. изменения температуры резания, представлено на рис. 50. Различные температуры резания получались путем подбора скоростей резания.

Рис. 50 показывает, что при работе на всех подачах повышение температуры резания до оптимальной θ_0 вызывает резкое снижение $h_{o.п}$, а при дальнейшем повышении температуры — его резкое повышение.

При работе с постоянной скоростью резания 75 м/мин увеличение подачи с 0,2 до 0,4 мм/об приводит к повышению температуры резания в пределах левой ветви кривой $h_{o.п}=f(\theta^\circ)$ и уменьшению поверхностного относительного износа (точки a_1 , a_2 и a_3). Факторы 1 и 2 действуют в одном направлении и вызывают монотонное сни-

жение величины $h_{0,п}$. При работе с постоянной скоростью резания 130 м/мин температура резания переходит через оптимальное значение. При переходе от подачи 0,2 к подаче 0,3 мм/об поверхностный относительный износ снижается, так как факторы 1 и 2 действуют в одном направлении. Дальнейшее увеличение подачи от 0,3 до 0,4 мм/об приводит к повышению $h_{0,п}$ (точки b_1 , b_2 и b_3). Так как факторы 1 и 2 действуют здесь в противоположных направлениях, то повышение $h_{0,п}$ можно объяснить только лишь преобладающим влиянием фактора 2 по сравнению с фактором 1.

При работе с постоянной скоростью резания 160 м/мин температура резания для всех рассматриваемых подач выше оптимальной. Следовательно, факторы 1 и 2 здесь действуют в противоположных направлениях. Но повышение подачи приводит к монотонному повышению поверхностного относительного износа (точки c_1 , c_2 и c_3), что также можно объяснить лишь преобладающим действием фактора 2 во всем диапазоне подач.

Таким образом, характер зависимости $h_{0,п}=f(s)$ для различных скоростей резания здесь различен (рис. 51). Главным фактором, определяющим характер зависимостей при работе с различными скоростями резания, в данном случае является температура резания.

Аналогичный характер влияния подачи на величину поверхностного относительного износа наблюдается при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК2 (рис. 52, а), при точении жаропрочного сплава ЭИ437А резцами ВК8 (рис. 52, б), при точении закаленной стали ЭХ12М резцами Т15К6 и Т14К8 (рис. 53—54).

В рассмотренных примерах при работе на высоких скоростях резания, соответствующих правым ветвям кривых $h_{0,п}=f(\theta)$, влияние подачи, как температурного фактора, оказалось более сильным по сравнению с влиянием подачи, как фактора, уменьшающего длину пути резания. Только этим можно объяснить то, что при работе на высоких скоростях увеличение подачи приводит к монотонному повышению величины поверхностного относительного износа. Зависимость $h_{0,п}=f(s)$, когда при $v > v_0$ наблюдается преобладающее влияние подачи, как температурного фактора, будем для краткости изложения называть зависимостью первого типа. К указанному типу и относятся зависимости $h_{0,п}=f(s)$, приведенные на рис. 52—54.

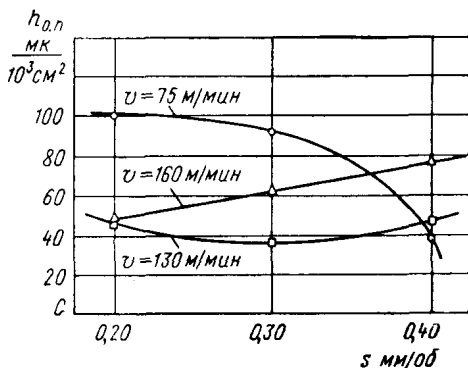


Рис. 51. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении с различными скоростями резания.

Сталь ЭИ654, резец Т14К8; $t=1,0$ мм

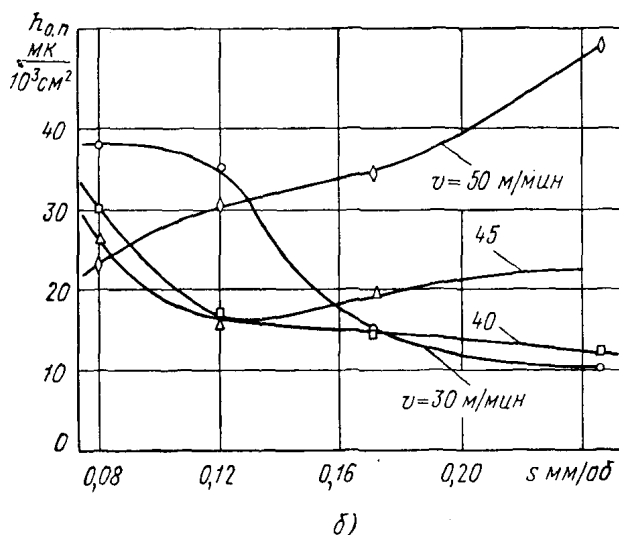
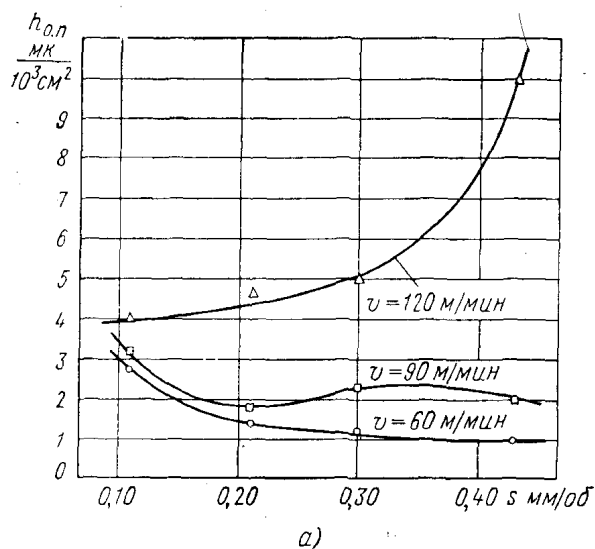


Рис. 52. Влияние подачи на величину поверхностного относительного износа при точении ($t=0,5 \text{ мм}$):
 а—сталь 1X18H9T, резец BK2; б—сплав ЭИ437А, резец BK8

По-видимому, при некоторых сочетаниях трущейся пары (обрабатываемый материал — материал режущей части инструмента) подача как температурный фактор может оказывать меньшее влияние на величину $h_{o,п}$, по сравнению с подачей как фактором, изменяющим длину пути резания. В этом случае поверхностный относительный износ с увеличением подачи будет снижаться при работе на любых скоростях резания.

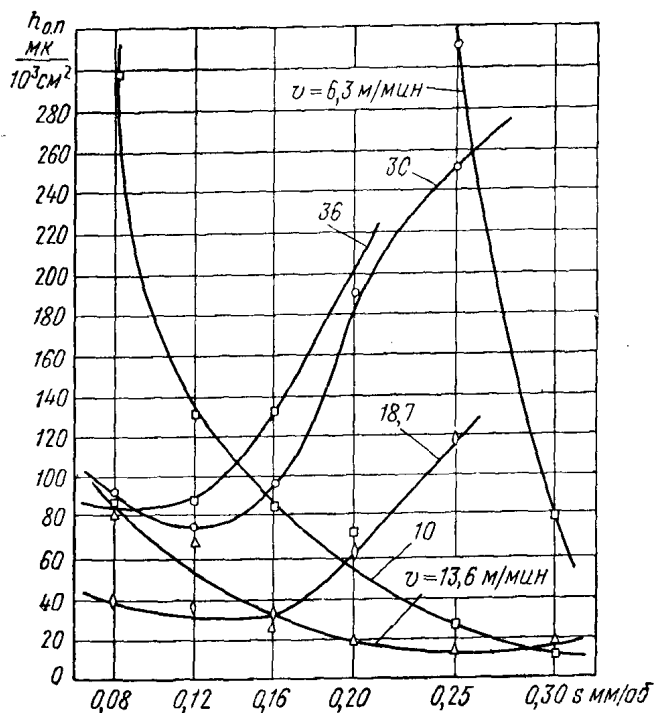


Рис. 53. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении.

Закаленная сталь ЭХ12М (HRC 58—59), резец Т15К6; $t = 0,25$ мм

Закономерности такого рода получены при точении стали 40ХНМА резцом Т14К8 (рис. 55—56). Рис. 55 показывает, что минимум интенсивности износа резца при работе на любой подаче наблюдается при одной и той же температуре резания. При работе со сравнительно низкой скоростью резания 130 м/мин увеличение подачи с 0,11 до 0,43 мм/об приводит к интенсивному снижению поверхностного относительного износа (точки a_1 , a_2 , a_3), так как факторы 1 и 2 здесь действуют в одном направлении. При работе на относительно высокой скорости резания 270 м/мин, соответствующей правым ветвям кривых $h_{o,п} = f(\theta)$ для всех рассматриваемых подач, повышение подачи хотя и приводит к повышению величины поверхностного относительного износа за счет повышения

температуры, но действие подачи, как фактора, уменьшающего длину пути резания, оказалось более сильным (точки c_1 , c_2 и c_3).

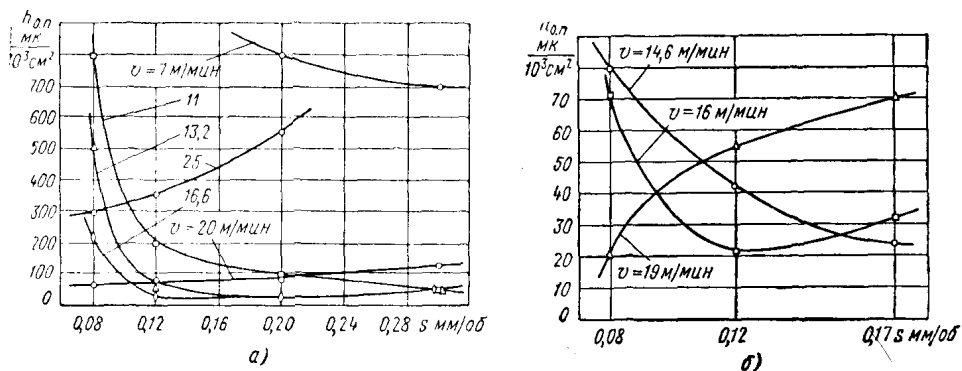


Рис. 54. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении.

Закаленная сталь ЭХ12М (HRC 60—61)
а—резец Т15К6; $t=0,50 \text{ мм}$; б—резец Т14К8; $t=0,25 \text{ мм}$

В результате функция $h_{0,п}=f(s)$ получилась также монотонно убывающей.

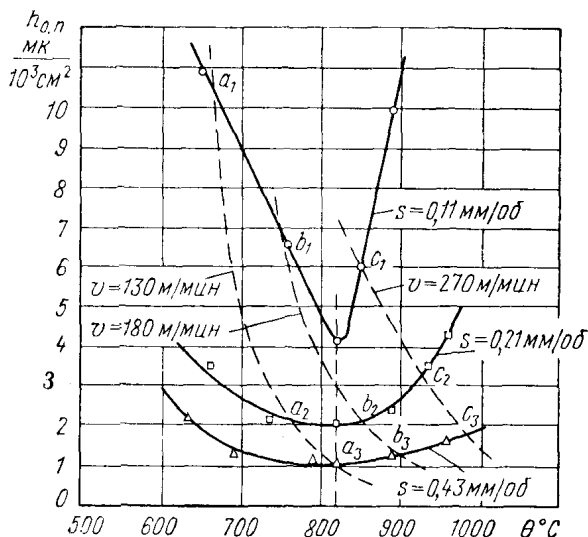


Рис. 55. Влияние средней температуры контакта на величину поверхностного относительного износа при точении.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1,0 \text{ мм}$

При работе на средней скорости резания 180 м/мин точки b_1 , b_2 и b_3 кривой $h_{0,п}=f(s)$ занимают среднее положение.

Характерно, что при работе на самой малой подаче (0,11 мм/об) повышение скорости резания приводит к снижению величины $h_{o,п}$, тогда как для более высоких подач (0,21 и 0,43 мм/об) это повышает $h_{o,п}$, и кривые $h_{o,п}=f(s)$ становятся более пологими.

Зависимость $h_{o,п}=f(s)$, когда при $v > v_0$ наблюдается преобладающее влияние подачи, как фактора, снижающего длину пути резания, будем называть зависимостью второго типа.

Зависимость $h_{o,п}=f(s)$ первого типа получается в том случае, когда повышение скорости резания в диапазоне $v > v_0$ сопровождается интенсивным ростом скорости взаимного диффузионного

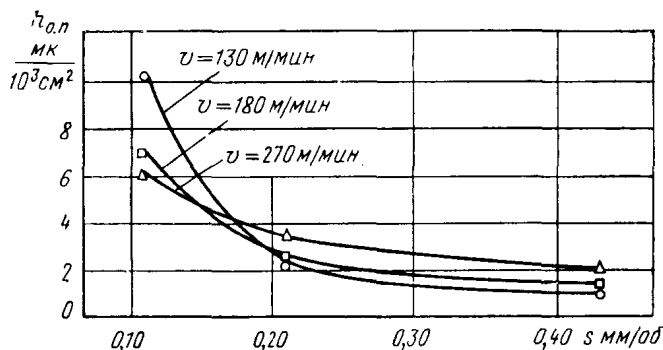


Рис. 56. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении с различными скоростями резания.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8

растворения инструментального и обрабатываемого материала, т. е. когда с повышением скорости резания и температуры наблюдается быстрый рост интенсивности диффузионного износа [52] [109]. В тех случаях, когда при повышении скорости резания в диапазоне $v > v_0$ наблюдается слабый рост скорости взаимного диффузионного растворения инструментального и обрабатываемого материала, то мы получаем зависимость $h_{o,п}=f(s)$ второго типа.

Зависимость $h_{o,п}=f(s)$ второго типа наблюдается при точении стали ЭИ736 резцом, оснащенным твердым сплавом Т14К8 (рис. 57—58), а также при точении стали ЭИ654 резцами, оснащенными твердыми сплавами Т15К6 и ВК8 (рис. 59).

Интенсивность роста скорости диффузионного износа при повышении скорости резания может характеризоваться величиной показателя степени u в уравнении

$$h_{o,п} = C v^u.$$

Скорость резания в этом уравнении выступает, как температурный фактор. Повышение подачи также сопровождается повышением температуры резания (см. рис. 50, 55 и 57). Следовательно, чем выше показатель степени u , тем повышение подачи (при $v = \text{const}$)

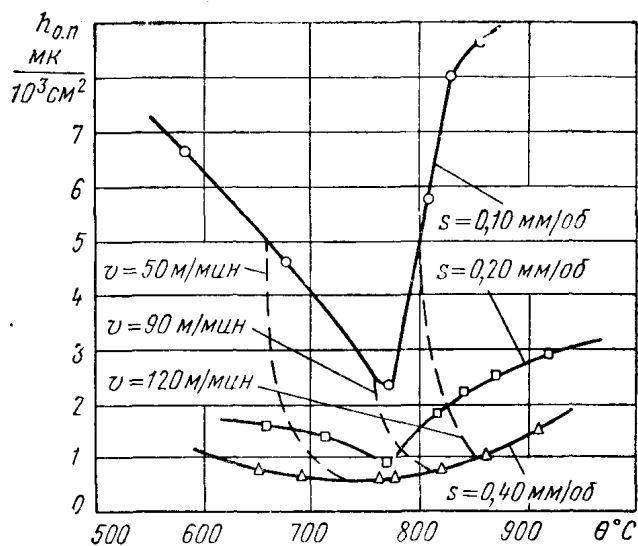


Рис. 57. Влияние средней температуры контакта на поверхностный относительный износ при точении.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8; $t=1,0$ мм

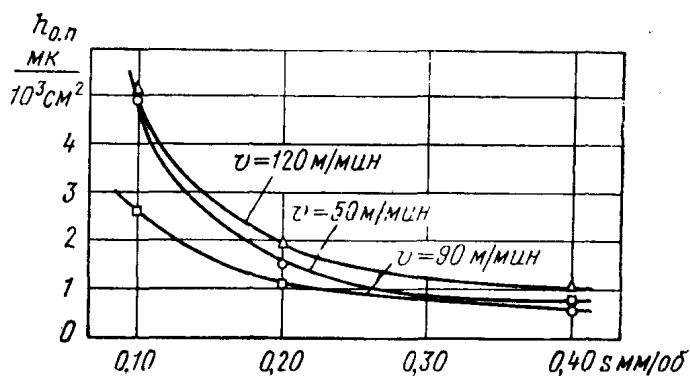


Рис. 58. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении с различными скоростями резания.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8; $t=1,0$ мм

будет сопровождаться более интенсивным ростом скорости диффузионного износа, тем больше вероятность получения зависимости $h_{o.п}=f(s)$ первого типа. При малой величине показателя степени u наиболее вероятно получение зависимости $h_{o.п}=f(s)$ второго типа (табл. 17).

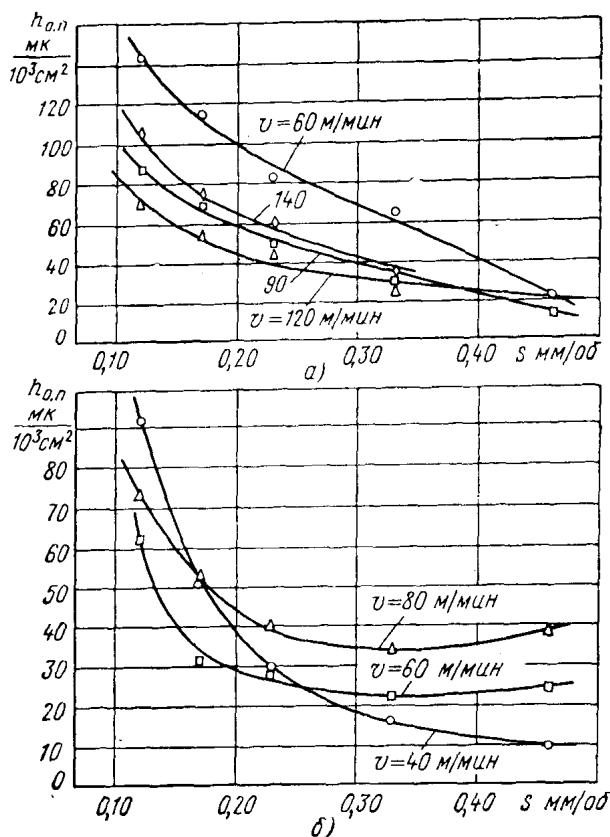


Рис. 59. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении стали ЭИ654 с различными скоростями резания ($t=1 \text{ мм}$):

а—резец Т15К6; б—резец ВК8

Данные, приведенные в табл. 17, показывают, что для зависимости $h_{o.п}=f(s)$ первого типа величина $u=2,6 \div 5,5$, тогда как для $h_{o.п}=f(s)$ второго типа $u=0,65 \div 1,2$. Абсолютная величина поверхностного относительного износа, наблюдаемого при работе на оптимальной скорости резания, на тип зависимости $h_{o.п}=f(s)$ влияния не оказывает, так как один и тот же тип указанной зависимости

Таблица 17

Величина показателя степени «и» в формуле $h_{o.n} = C \cdot v^u$
и тип зависимости $h_{o.n} = f(s)$

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	Глубина резания t мм	Подача s мм/об	Оптимальная скорость резания v_o м/мин	Диапазон скоростей резания, для которого получена формула $h_{o.n} = C v^u$	Показатель степени u	Тип зависимости $h_{o.n} = f(s)$
ЭИ654 1X18H9T ЭХ12М; HRC 60—61 ЭИ437А	T14K8 BK2 T14K8 BK8	1 0,50 0,25 0,50	0,40 0,43 0,17 0,245	102 63 12,8 30	102—175 80—136 12,8—28,4 30—52	2,6 3,1 4,3 5,5	первый
ЭИ736 ЭИ654 ЭИ654 40XНМА	T14K8 T15K6 BK8 T14K8	1 1 1 1	0,20 0,47 0,33 0,21	85 80 48 168	113—210 80—124 48—70 214—352	0,65 0,85 1,2	второй
1X18H9T 1X18H9T	BK3 BK8	0,50 0,50	0,30 0,30	52 60	77—128 60—120	2,3 2,3	третий

может наблюдаться как при низком, так и при высоком значении $h_{o.n.o.}$

На практике встречается и третий, промежуточный тип зависимости $h_{o.n} = f(s)$, когда при работе на сравнительно низких скоростях повышение подачи приводит к монотонному снижению поверхностного относительного износа, а при работе на средних и высоких скоростях резания зависимость $h_{o.n} = f(s)$ носит экстремальный характер. Зависимость $h_{o.n} = f(s)$ третьего типа наблюдается при точении стали 1X18H9T резцами, оснащенными пластинками твердых сплавов BK3 и BK8 (рис. 60), T14K8, BK4 и BK6, при точении стали 40X резцами T15K6 (рис. 61), а также при точении стали 30XГСА резцами T15K6. Повышенная интенсивность износа резцов при работе на средних и высоких скоростях резания с малыми подачами здесь может быть объяснена повышенной чувствительностью данных марок твердого сплава к изменению исходных механических свойств обрабатываемого материала в результате наклепа. При работе на подаче 0,10 мм/об глубина наклепа больше толщины срезаемого слоя и режущее лезвие все время работает в наклепанном слое, что и обуславливает повышенную интенсивность износа инструмента. При увеличении подачи до 0,20 мм/об глубина наклепа становится меньше толщины срезаемого слоя ($\Delta h_c < 1$), что спо-

способствует снижению интенсивности износа инструмента. В диапазоне подач $0,10\text{--}0,20\text{ мм/об}$ преобладающим оказывается действие факторов 1 и 3, и несмотря на повышение температуры резания и повышение интенсивности диффузионного износа величина по-

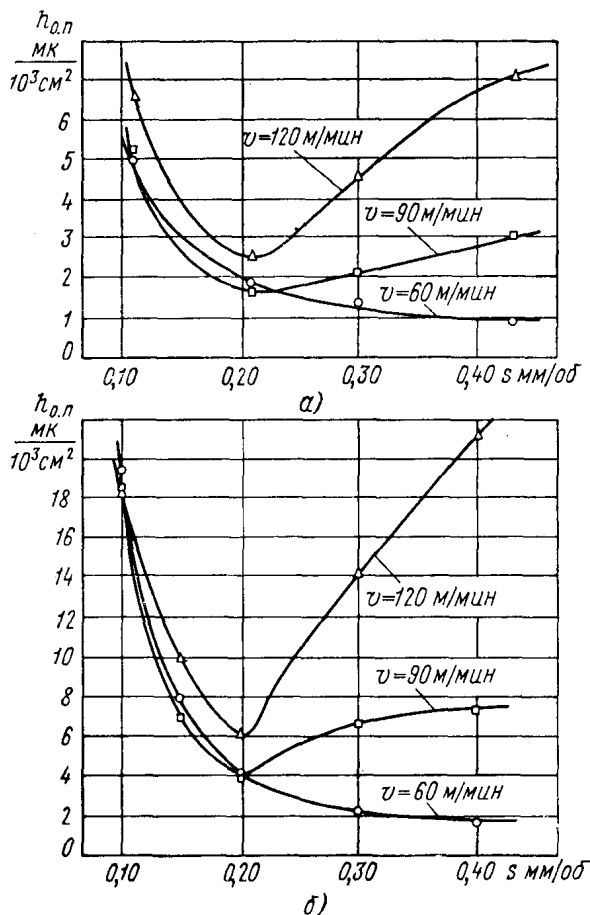


Рис. 60. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении стали 1Х18Н9Т с различными скоростями резания ($t=0,5\text{ мм}$):

а—резец ВК3; б—резец ВК8

верхностного относительного износа снижается. При дальнейшем повышении подачи режущее лезвие все время работает под наклепанным слоем (фактор 3 не действует) и преобладающее влияние на величину поверхностного относительного износа переходит к температуре резания. Кривые $h_{o,п}=f(s)$ приобретают экстремальный характер при работе не только при средних скоростях резания, но

и при высоких скоростях (и температурах) резания, соответствующих правой ветви кривой $h_{o.п} = f(\theta)$.

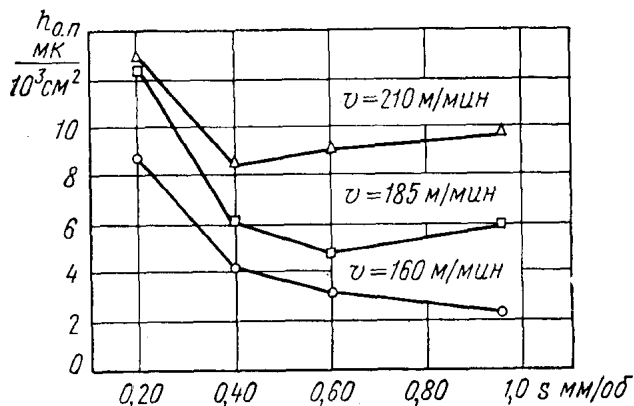


Рис. 61. Влияние подачи на поверхностный относительный износ при точении.

Сталь 40Х, резец Т15К6; $t = 1,5$ мм

Как видно из табл. 17, величина u для зависимости $h_{o.п} = f(s)$ третьего типа занимает промежуточное значение, что и следовало ожидать.

7. Влияние глубины резания на поверхностный относительный износ резцов

При изменении глубины резания давление на единицу длины режущего лезвия, усадка стружки, ширина контакта стружки с передней гранью инструмента и температура резания остаются практически постоянными. По данным одних исследователей изменение глубины резания в пределах, наиболее характерных для чистовой и получистовой обработки, не оказывает заметного влияния на период стойкости инструмента [34], [76] и величину относительного износа [9], [10]. По данным других исследователей [39] повышение глубины резания сопровождается значительным повышением интенсивности размерного износа.

Номограммы для выбора оптимальных сочетаний подач и скоростей резания нами разработаны при некоторых постоянных значениях глубины резания ($t = 0,25$; $0,50$; $1,0$ и $2,0$ мм).

Естественно, что разработка таких номограмм для каждой глубины резания потребует больших затрат времени и материальных средств. Поэтому целесообразно исследовать возможность по номограмме, разработанной для одной глубины резания, выбрать оптимальные сочетания s и v при работе с другими глубинами резания. С этой целью были поставлены специальные исследования при то-

чении стали 1X18H9T резцами, оснащенными пластинками твердых сплавов Т5К10, Т14К8, ВК4 и ВК6 (рис. 62—63).

Оптимальные для различных подач скорости резания были определены на основе длительных стойкостных испытаний, проведенных при глубине резания 0,50 мм. Указанные скорости резания при изменении глубины резания оставались постоянными.

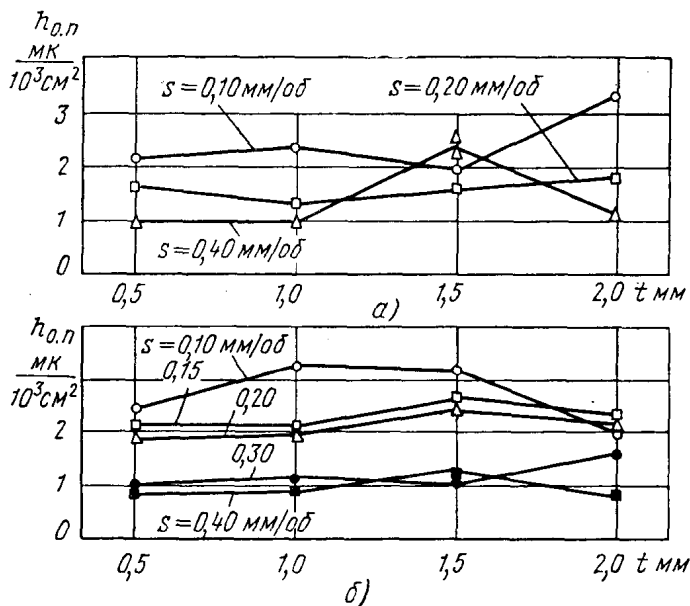


Рис. 62. Влияние глубины резания на поверхностный относительный износ при точении стали 1X18H9T с постоянной скоростью резания, оптимальной для $t=0,50$ мм:

а—резец Т5К10; б—резец Т14К8

Рис. 62 и 63 показывают, что при этом изменение глубины резания в пределах от 0,5 до 2 мм не оказывает существенного влияния на величину поверхностного относительного износа.

Указанный вывод не является неожиданным, так как при постоянной скорости резания изменение глубины резания мало влияет на температуру резания (рис. 64, б).

В отличие от опытов по точению стали 1X18H9T, где для разных глубин резания принимались постоянные скорости резания, при точении стали ЭИ654 резцами ВК8 сохранялась постоянной оптимальная (для $t=1$ мм) температура резания, и вывод о незначительном влиянии глубины резания на величину $h_{o,п}$ был полностью подтвержден (рис. 64, а).

При одной и той же оптимальной температуре резания, найденной при одной глубине резания, повышение глубины резания дает некоторое снижение величины $h_{o,п}$. Причиной повышенной интен-

сивности износа резца при работе с малой глубиной резания, по-видимому, является повышенное значение отношения $\lambda_1 = P_y/P_z$ по сравнению с работой на больших глубинах резания. Повышение λ_1 (за счет снижения глубины резания) приводит к снижению жестко-

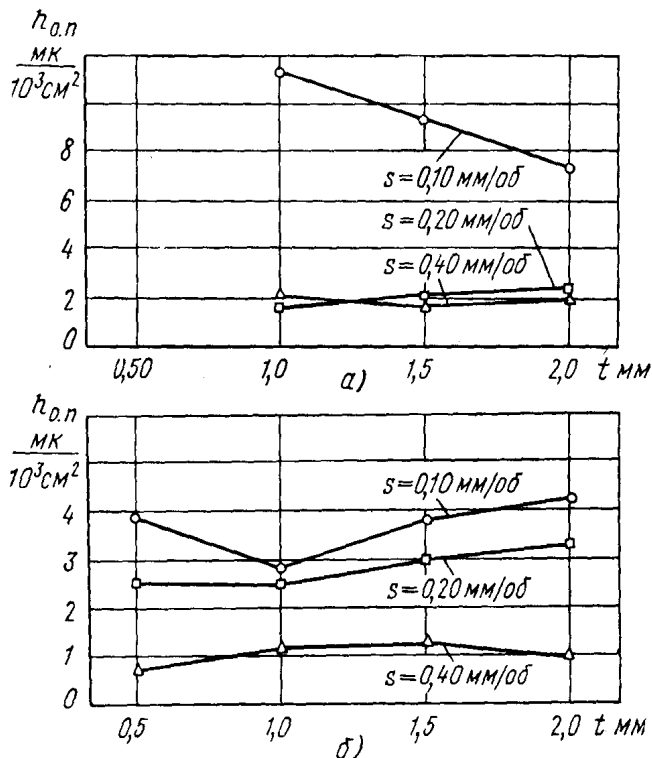


Рис. 63. Влияние глубины резания на поверхностный относительный износ при точении стали 1Х18Н9Т с постоянной скоростью резания, оптимальной для $t=0,50$ мм:

а—резец BK4; б—резец BK6

сти суппорта и при сохранении постоянства оптимальной температуры резания будет действовать в сторону повышения интенсивности износа.

Опыты по точению стали 30ХГСА резцами Т15К6, проведенные при произвольных сочетаниях подачи и скорости резания, также не показали сколько-нибудь заметного влияния глубины резания на величину $h_{0.п}$ (рис. 65).

8. Основные выводы

1. При точении различных материалов с постоянной оптимальной температурой резания увеличение подачи повышает производительность обработки и размерную стойкость инструмента, хотя период стойкости при этом в ряде случаев может снижаться.

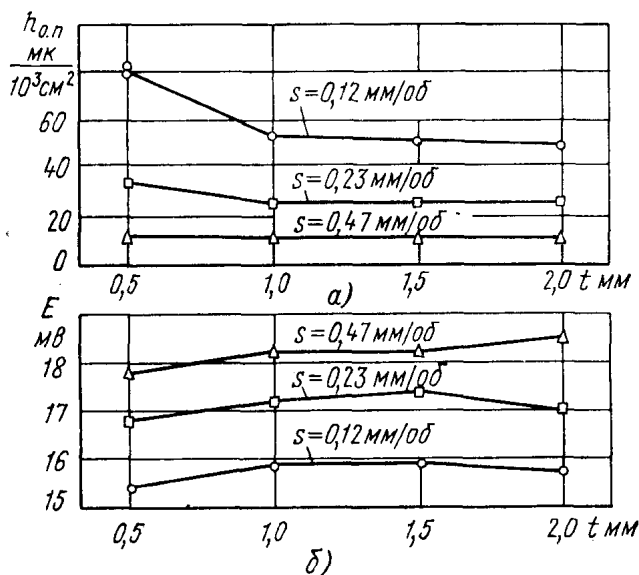


Рис. 64. Влияние глубины резания при точении стали ЭИ654, резец ВК8:

а—на поверхностный относительный износ при постоянной оптимальной (для $t=1 \text{ мм}$) температуре контакта; б—на термоэлектродвижущую силу при постоянной скорости резания $v=76 \text{ м/мин}$

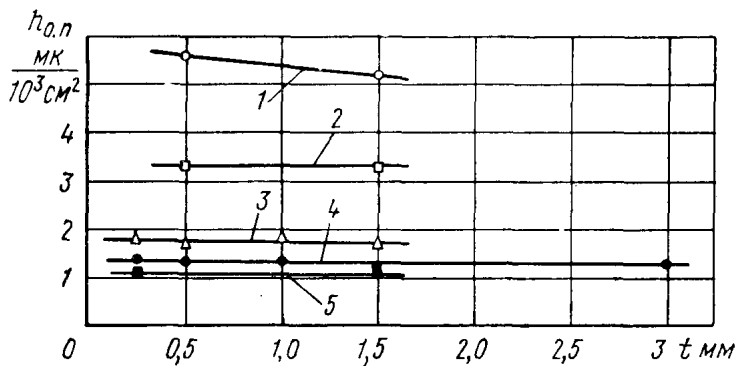


Рис. 65. Влияние глубины резания на поверхностный относительный износ резца Т15К6 при точении стали 30ХГСА:

1— $s=0,11 \text{ мм/об}$, $v=170 \text{ м/мин}$; 2— $s=0,21 \text{ мм/об}$, $v=78 \text{ м/мин}$; 3— $s=0,30 \text{ мм/об}$, $v=125 \text{ м/мин}$; 4— $s=0,30 \text{ мм/об}$, $v=84 \text{ м/мин}$; 5— $s=0,52 \text{ мм/об}$, $v=95 \text{ м/мин}$

2. Это повышение размерной стойкости и производительности тем больше, чем лучше обрабатываемость металла резанием и выше режущие свойства инструментального материала.

3. При одном и том же периоде стойкости инструмента различным сочетаниям s и v соответствуют различные температуры резания (или т. э. д. с.), а при постоянных температурах резания различным сочетаниям s и v соответствуют различные периоды стойкости.

4. При применении температурного метода установления зависимостей $v=f(T, s)$, основанного на принципе Рейхеля, ошибка в определении скорости резания может достигать 30—100%, а в определении периода стойкости — 300—500%.

5. Подача воздействует на интенсивность износа инструмента, по совокупности через изменение длины пути и температуры резания, глубины наклепа, нормальных и касательных сил, коэффициента трения на задней поверхности, а также подача как фактор, изменяющий контактное давление на передней грани резца и, наконец, как фактор, изменяющий амплитуду и частоту вибраций и жесткость СПИД.

6. При работе на сравнительно низких скоростях резания, соответствующих так называемому адгезионному износу инструмента, увеличение подачи всегда приводит к монотонному снижению поверхностного относительного износа.

При работе на средних скоростях резания, когда при некоторых средних подачах появляется диффузионный износ, кривая $h_{o,п}=f(s)$ может монотонно снижаться или иметь точку минимума при подаче, обеспечивающей оптимальную температуру резания.

При работе на высоких скоростях резания, соответствующих диффузионному износу инструмента, увеличение подачи может приводить к монотонному повышению кривой $h_{o,п}=f(s)$ (первый тип зависимости), монотонному снижению (второй тип), и, наконец, к экстремальной форме (третья зависимость).

7. Противоречивость в оценках характера влияния подачи на интенсивность износа резцов, полученная различными исследователями, объясняется тем, что влияние подачи рассматривалось без учета уровня применяемых скоростей резания, диапазона изменения температур контакта, интенсивности нарастания скорости диффузионного износа инструмента при повышении температуры контакта, а также без учета влияния других факторов, воздействие которых на интенсивность износа при изменении подачи также изменяется.

8. Изменение глубины резания в пределах от 0,25 до 2 мм на величину поверхностного относительного износа существенного влияния не оказывает. Поэтому номограммы для определения оптимальных сочетаний s и v , разработанные для одного значения глубины резания, могут быть использованы и для других глубин резания в диапазоне от 0,25 до 2 мм.

Глава V

НОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Изучение проблемы обрабатываемости новых марок сталей и сплавов, обладающих повышенными прочностными, антикоррозионными, жаропрочными и т. п. свойствами весьма актуально для современного производства.

Основными показателями, характеризующими обрабатываемость металлов, являются:

- 1) уровень скоростей резания, с которыми наиболее рационально обрабатывать данный материал;
- 2) легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях;
- 3) легкость получения необходимой чистоты и качества обработанной поверхности при отделочных операциях;
- 4) силы, возникающие при резании, и мощность;
- 5) характер образования стружки и ее деформация (усадка);
- 6) температура резания.

При различных видах обработки и условиях эксплуатации инструмента на первый план могут, вообще говоря, выступать различные показатели обрабатываемости. Так, при окончательных операциях (чистовое точение, развертывание, протягивание и т. д.) большое значение имеет чистота и качество обработанной поверхности, а при нарезании резьб в глухих отверстиях — форма стружки и легкость ее отвода.

Но во всех случаях, независимо от специфических особенностей технологического процесса и требований к чистоте и качеству обработанных поверхностей, производительность и стоимость обработки определяются уровнем целесообразных скоростей резания. Следовательно, наиболее важным показателем обрабатываемости является скорость резания v_T при некотором заданном периоде стойкости T . Чем большую скорость резания при прочих равных условиях допускает режущий инструмент при обработке данного материала, тем лучше обрабатываемость этого материала.

Выбор периода стойкости является весьма важным для решения задачи правильной эксплуатации станков и инструментов и установления рациональных режимов обработки.

Чаще всего [95] количественной характеристикой обрабатываемости при точении принято считать скорость резания v_{60} , соответствующую 60-минутной стойкости резцов. Но как известно, наимыгоднейшие периоды стойкости одного и того же режущего инструмента различны для работы на станках, имеющих различную стоимость. Они не являются одинаковыми для всех заводов и даже для всех цехов данного завода. Расчет наимыгоднейших периодов стойкости обычно производится с учетом конкретных технико-экономических условий эксплуатации станков и режущего инструмента.

Определение и сравнение обрабатываемости металлов по скорости резания, так же как и стойкостные испытания резцов, наиболее правильно производить при периоде стойкости, обеспечивающем наимышшую производительность и наименьшую себестоимость обработки. Указанный период принято называть наимыгоднейшим или экономическим периодом стойкости инструмента.

Но один и тот же режущий инструмент может использоваться в различных условиях производства. Следовательно, инструмент может иметь различные по величине экономические периоды стойкости.

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают, что наиболее объективными и ценными для современного производства характеристиками обрабатываемости металлов применительно к чистовой обработке являются оптимальная скорость резания v_o и оптимальный поверхностный относительный износ $h_{o.п.o}$.

Указанные характеристики (v_o и $h_{o.п.o}$) по сравнению со скоростью резания v_T обладают следующими основными преимуществами.

1. Оптимальная скорость резания v_o соответствует критической точке (точке минимума) на кривой $h_{o.п.} = f(v)$, в то время как скорость резания v_T ни с какой критической точкой кривой $T = f(v)$ не связана.

2. Оптимальным скоростям резания v_o при работе на различных подачах (при заданных материалах обрабатываемого изделия и инструмента) соответствует постоянная оптимальная температура резания, в то время как скоростям резания v_T для разных подач в общем случае соответствуют различные температуры резания.

Положение о постоянстве оптимальной температуры резания для точек минимума интенсивности износа инструмента, установленное при точении, нашло полное подтверждение также при растачивании и торцовом фрезеровании.

3. На основе т. э. д. с., зафиксированной при оптимальной скорости резания v_o , можно надежно осуществлять автоматическое веде-

ние процессов обработки на режимах, соответствующих максимуму размерной стойкости инструмента и точности обработки.

Автоматическое ведение процессов обработки резанием на основе сохранения постоянства величины т. э. д. с., зафиксированной при скорости резания v_T , найденной для одной из подач, не дает удовлетворительных по точности результатов, так как одной и той же величине т. э. д. с. при работе на различных подачах соответствуют различные периоды стойкости, отличающиеся между собой на 200—500%.

4. Скорости резания v_0 , являющиеся оптимальными по интенсивности размерного износа и размерной стойкости инструмента, являются оптимальными и по высоте неровностей обработанной поверхности [60], [64].

Так как уровень скоростей резания v_T зависит от выбранного периода стойкости T , то естественно, что скорости резания, являющиеся оптимальными по чистоте обработки, в общем случае не будут совпадать со скоростями резания v_T .

5. При работе на оптимальных скоростях резания обеспечивается минимум глубины и степени наклепа поверхностного слоя.

Наличие взаимосвязи между интенсивностью размерного износа $h_{0.п}$ с одной стороны и высотой неровностей, глубиной и степенью наклепа поверхностного слоя с другой стороны, не является неожиданным, так как интенсивность износа и процесс образования поверхностного слоя в значительной мере определяются действием одних и тех же физических причин.

6. Оптимальная скорость резания v_0 и величина $h_{0.п.0}$ не зависят от абсолютной величины износа резца h_r или h_3 , принимаемой в качестве критерия затупления, в то время как скорость резания v_T и период стойкости T являются прямой функцией величины h_3 .

На рис. 66 приведено влияние скорости резания на величину поверхностного относительного износа резца Т14К8 при точении стали ЭИ736 при трех значениях величины h_r , принятой для подсчета $h_{0.п}$. Каждому значению h_r соответствует одна и та же оптимальная скорость резания ($v_0 = 85$ м/мин), причем абсолютные величины $h_{0.п}$ при различных значениях v практически совпадают. В то же время каждому значению величины h_3 соответствует свое значение скорости резания v_T (рис. 67). Например, для периода стойкости $T = 30$ мин получились следующие значения скорости v_T :

h_3 в мм	0,20	0,25	0,30
v_T в м/мин	108	147	182

При изменении абсолютной величины h_3 , принимаемой в качестве критерия затупления, всего лишь на 0,10 мм скорость резания v_T изменяется в 1,67 раза. Независимость величин v_0 и $h_{0.п.0}$ от критерия затупления (рис. 68—69) позволяет резко сократить продолжительность опытов при исследовании обрабатываемости металлов и установлении режимов резания, так как здесь отпадает необ-

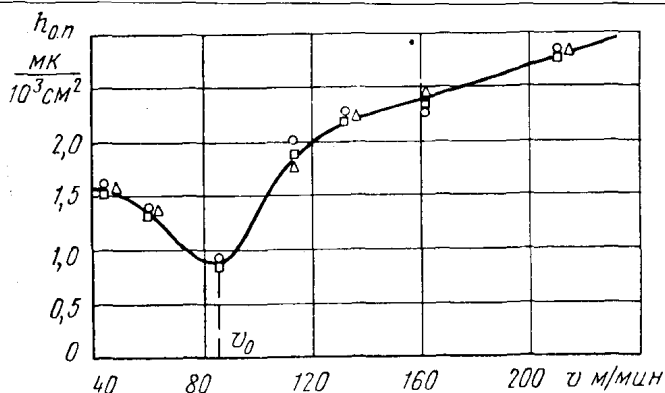


Рис. 66. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об
 ○— $h_r=20$ мк; □— $h_r=25$ мк; △— $h_r=30$ мк

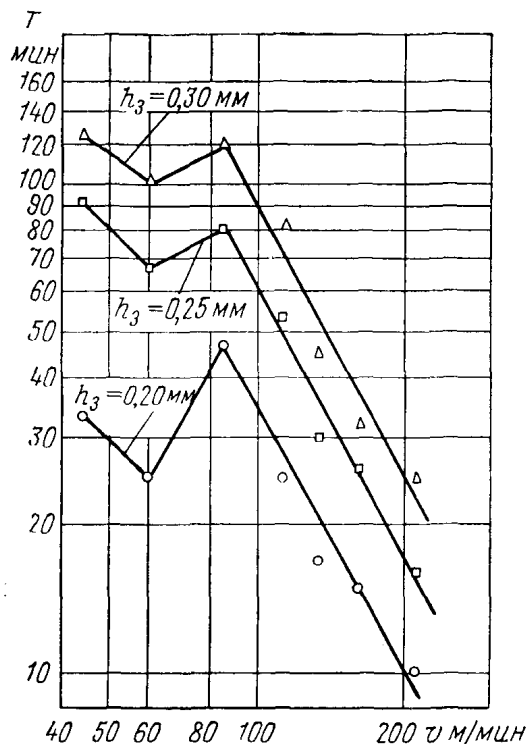


Рис. 67. Влияние скорости резания на период стойкости резца при различной ширине фаски износа по задней грани, принимаемой в качестве критерия затупления.

Сталь ЭИ736, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об

ходимость проведения стойкостных опытов до полного затупления инструмента.

7. Чаще всего количественной характеристикой обрабатываемости металла при точении принято считать скорость резания v_{60} , соответствующую 60-минутной стойкости резцов. Так как указанный период стойкости для многих труднообрабатываемых материалов вообще невозможно получить при самом широком изменении скоростей резания, эта характеристика не может служить показателем обрабатываемости, тогда как оптимальные скорости резания v_0 су-

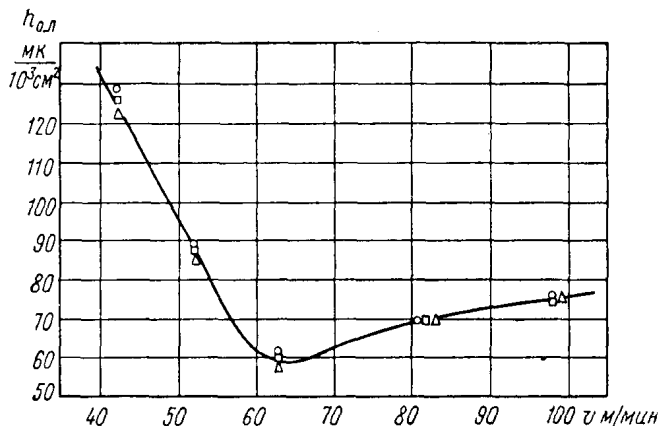


Рис. 68. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления.

Сталь ЭИ654, резец ВК6; $t=2$ мм, $s=0,15$ мм/об;
 ○ — $h_r=30$ мк; □ — $h_r=40$ мк; △ — $h_r=50$ мк

ществуют для каждого обрабатываемого материала. Так, при точении жаропрочной стали ЭИ654 с глубиной резания 2 мм, на подачах 0,15 и 0,30 мм/об стойкость резцов ВК6 не превышает 10 мин, при работе на подаче 0,50 мм/об — 24 мин (рис. 70) при оптимальных скоростях резания соответственно 63, 45 и 34 м/мин.

8. Скорости резания v_T неудобны для сравнения режущих свойств различных инструментальных материалов, так как эти скорости резания для разных марок твердого сплава могут соответствовать разным ветвям кривой $h_{ол}=f(v)$, и по уровню скоростей резания v_T твердые сплавы могут располагаться в любой последовательности, определяемой выбранным периодом стойкости T (табл. 18).

Так, при $T=70$ мин твердый сплав ВК6 имеет преимущество перед твердым сплавом Т14К8 как по уровню скорости v_{70} , так и по величине $h_{ол}$. Сравнение тех же резцов по величине v_T и $h_{ол}$ при $T=40$ мин показывает на преимущества твердого сплава Т14К8, а при $T=55$ мин указанные твердые сплавы практически равноцен-

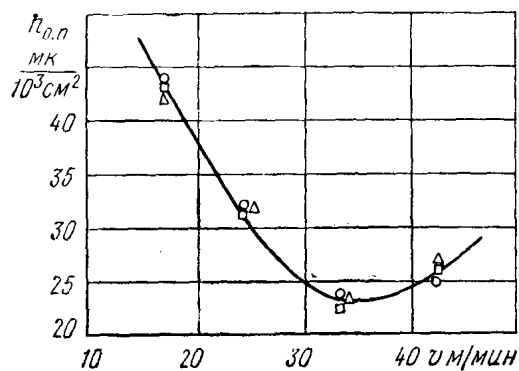


Рис. 69. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления
Сталь ЭИ654, резец ВК6; $t=2$ мм, $s=0,50$ мм/об,
○— $h_r=25$ МК; □— $h_r=30$ МК; △— $h_r=35$ МК

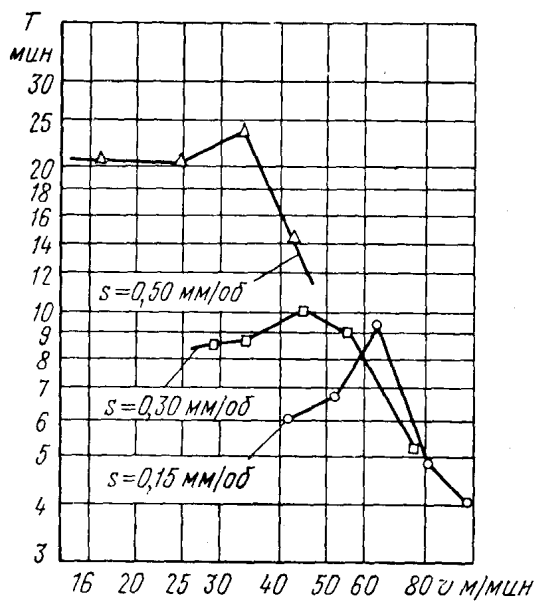


Рис. 70. Влияние скорости резания на период стойкости при точении.
Сталь ЭИ654, резец ВК6; $t=2$ мм

ны. Для твердого сплава ВК6 скорость резания $v_{70}=92$ м/мин соответствует правой ветви кривой $h_{o.п}=f(v)$, а для твердого сплава Т14К8 скорость резания $v_{70}=57$ м/мин соответствует левой ветви кривой $h_{o.п}=f(v)$.

Таблица 18

Сравнение v_T и $h_{o.п}$ при различных значениях периода стойкости T .

(сталь 1Х18Н9Т; резцы ВК6 и Т14К8; $t=0,50$ мм; $s=0,15$ мм/об; критерий затупления $h_3=0,40$ мк)

Период стойкости T $мин$	Скорость резания $м/мин$		Отношение $\frac{v'_T}{v''_T}$ %	Величина поверх- ностного относи- тельного износа $мк/10^3 \cdot см^2$		Отношение $\frac{h'_{о.п}}{h''_{о.п}}$ %
	v'_T (ВК6)	v''_T (Т14К8)		$h'_{о.п}$ (ВК6)	$h''_{о.п}$ (Т14К8)	
40	115	205	56	3	2,4	125
55	100	100	100	3	3	100
70	92	57	161,5	2,7	6,8	39,7

Оптимальный период стойкости $мин$		Оптимальная скорость резания $м/мин$		Отноше- ние $\frac{v'_o}{v''_o}$ %	Оптимальный по- верхностный от- носительный из- нос в $мк/10^3 \cdot см^2$		Отноше- ние $\frac{h'_{о.п.о}}{h''_{о.п.о}}$ %
T'_o (ВК6)	T''_o (Т14К8)	v'_o (ВК6)	v''_o (Т14К8)		$h'_{о.п.о}$ (ВК6)	$h''_{о.п.о}$ (Т14К8)	
145	49	69	164	42	1,8	2,1	86

Для резцов, оснащенных твердым сплавом Т14К8, повышение скорости резания от $v_{70}=57$ до $v_o=164$ м/мин приводит к снижению величины $h_{o.п}$ и повышению размерной стойкости инструмента. Для резцов, оснащенных твердым сплавом ВК6, повышение скорости резания против $v_{70}=92$ м/мин приводит к монотонному повышению величины $h_{o.п}$ и снижению размерной стойкости инструмента.

При оптимальных скоростях резания v_o сплавы ВК6 и Т14К8 по величине $h_{o.п.o}$ (т. е. поверхностного относительного износа, наблюдаемого при оптимальных скоростях резания) примерно равноценны и отличаются лишь по уровню v_o .

9. В отличие от v_o скорость резания v_T не раскрывает резервов повышения размерной стойкости инструмента, а в ряде случаев использование v_T приводит к выбору совершенно нерациональных

режимов резания, соответствующих левым ветвям кривых $h_{o.п} = f(v)$ [64], [65], [66]. Это происходит в том случае, когда зависимость $T—v$ устанавливается при работе на относительно высоких скоростях резания, которым соответствуют периоды стойкости значительно меньшие, чем T , а скорость резания v_T находится путем экстраполяции зависимости $T—v$ на заданный период стойкости T .

Для составления полного представления об обрабатываемости металла резанием необходимо знать как величину оптимальной скорости резания v_o , так и величину оптимального поверхностного относительного износа $h_{o.п.о.}$, наблюдаемого при работе на этой скорости резания. Уровень скоростей резания v_o определяется главным образом влиянием особенностей обрабатываемого металла на температуру резания, а величина $h_{o.п.о.}$ — истирающей способностью обрабатываемого материала и его адгезионной склонностью к материалу инструмента.

Таким образом, оптимальная скорость резания v_o и оптимальный поверхностный относительный износ $h_{o.п.о.}$ являются важнейшими и объективными характеристиками обрабатываемости металла резанием.

Кроме того, величина $h_{o.п.о.}$, являясь универсальной характеристикой размерной стойкости инструмента, характеризует легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях и в отличие от периода стойкости T может использоваться для расчетов точности обработки, при проектировании и отладке технологических процессов в условиях автоматизированного производства, а также при проектировании специальных станков.

Глава VI

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА И МАТЕРИАЛА ИНСТРУМЕНТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА

Применяемые в настоящее время экспериментальные методы определения обрабатываемости обладают большой трудоемкостью и требуют значительного расхода металла. Поэтому иностранные и отечественные исследователи [91] в течение многих лет пытаются установить связь обрабатываемости (по скорости резания v_T) с физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала.

Однако следует отметить, что предложенные разными авторами формулы и уравнения для определения обрабатываемости пригодны лишь в частных случаях [52]. Установление взаимосвязей между физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала и обрабатываемостью не являлось предметом нашего исследования. Из этой большой и важной темы здесь затрагиваются отдельные вопросы, для освещения которых мы располагаем необходимыми экспериментальными данными.

1. О взаимосвязи между истинным пределом прочности при растяжении S_k и новыми характеристиками обрабатываемости v_o и $h_{o,п.o}$

Известно [80], что с увеличением истинного предела прочности при растяжении обрабатываемость материала ухудшается. Механические свойства некоторых материалов, расположенных в порядке возрастания истинного предела прочности при растяжении, приведены в табл. 19, откуда видно, что сталь 1X18H9T и сталь 40XHMA имеют примерно равные истинные пределы прочности.

Кривые $h_{o,п}=f(v)$ для этих материалов также близки друг к другу на протяжении всего наиболее важного в практическом отношении диапазона скоростей резания (рис. 71).

Механические свойства исследованных материалов

Марка материала	$\sigma_{0,2}$ Н/мм ²	σ_B Н/мм ²	δ %	ψ %	S_k Н/мм ²	$A_{2,5}$ Н/мм ²
40ХНМА	432	736	18,5	41	874	—
30ХГСА	481	815	14	36	928	—
40Х	354	746	12,5	23	932	564
1Х18Н9Т	246	619	55	67	958	775
ЭИ654	461	795	39	55	1110	860
ЭИ736	941	990	14	56	1130	745
18ХНВА	1050	1230	15	48	1415	619
ЭИ437А	805	1170	30	46	1520	1180

На основании этих данных можно было бы сделать заключение о том, что уровень оптимальных скоростей резания v_o и значения $h_{o,п.о}$ для различных обрабатываемых материалов удовлетворительно определяются величиной истинного предела прочности. Но такое заключение справедливо лишь в частных случаях. На том же рис. 71 приведены кривые $h_{o,п} = f(v)$ для сталей ЭИ654 и ЭИ736, обладающих равными истинными пределами прочности, но значительно отличающихся по уровню оптимальных скоростей резания (в 1,7 раза) и еще больше по величине $h_{o,п.о}$ (в 36 раз).

Характерно, что по величине v_o лучшей обрабатываемостью обладает сталь ЭИ654, а по величине $h_{o,п.о}$ — сталь ЭИ736.

Стали 30ХГСА и 40Х, обладающие равными истинными пределами прочности при растяжении, отличаются по уровню оптимальных скоростей резания в 2,15 раза и по величине $h_{o,п.о}$ в 1,5 раза (рис. 72).

Жаропрочные стали 1Х18Н9Т и ЭИ654 незначительно (в пределах 14%) отличаются по величине истинного предела прочно-

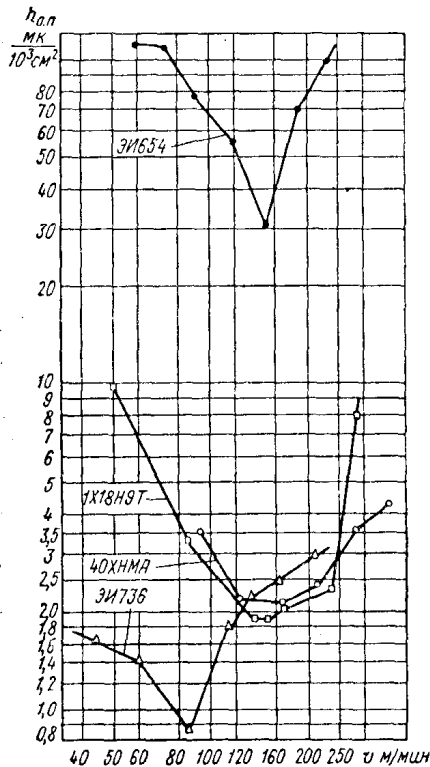


Рис. 71. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резца Т14К8 ($t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об)

сти при растяжении, но по $h_{o.п.o}$ указанные материалы отличаются друг от друга в 29,6 раза (рис. 73).

Истинный предел прочности стали 18ХНВА в 1,48 раза выше истинного предела прочности стали 1Х18Н9Т, но оптимальные скорости резания при их обработке (резец Т30К4; $s=0,10$ мм/об) равны между собой, а величина $h_{o.п.o}$ для стали 18ХНВА даже меньше (в 1,42 раза), чем для стали 1Х18Н9Т.

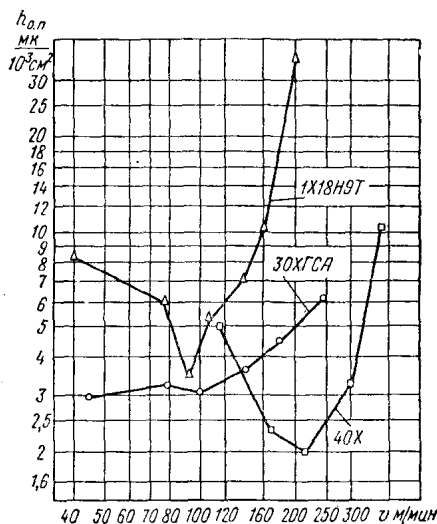


Рис. 72. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резца Т15К6 ($s=0,20$ мм/об)

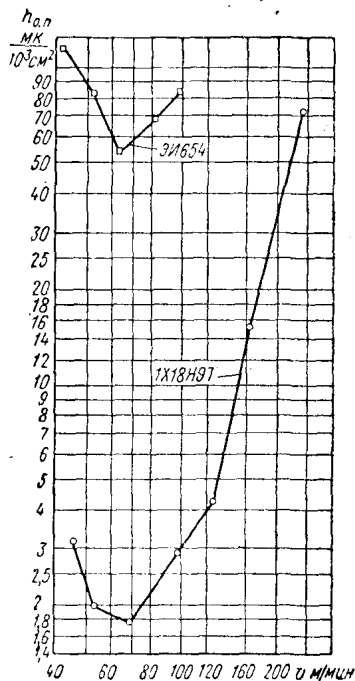


Рис. 73. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резца ВК6 ($s=0,15$ мм/об)

Таким образом, приходится констатировать, что истинный предел прочности при растяжении не может даже приблизительно определять уровень оптимальных скоростей резания и интенсивность износа резца при работе на оптимальной скорости резания.

2. Влияние твердости стали на интенсивность размерного износа резца

При выборе рациональных условий обработки закаленных сталей приходится учитывать ряд характерных особенностей [56] [61], [81].

1. Износ твердосплавного резца при обработке закаленных сталей всегда происходит при высоких температурах (700—1100°С) контактирующих поверхностей инструмента и детали, что приводит в процессе резания к существенному изменению исходных фи-

зико-механических свойств обрабатываемого материала и материала режущего инструмента в зоне резания.

2. Повышение твердости стали приводит к резкому снижению усадки стружки и ширины контакта стружки с передней поверхностью реза.

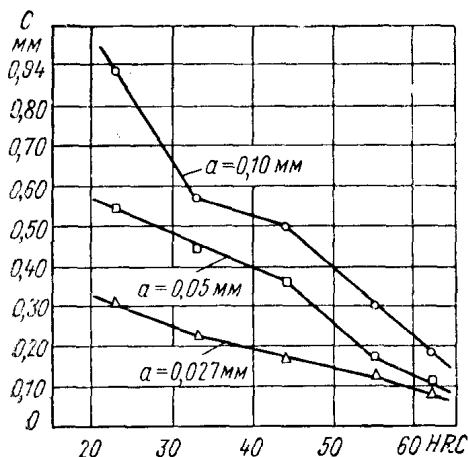


Рис. 74. Влияние твердости стали ЭХВГ на ширину контакта стружки с передней гранью.

Резец ВК8; $\gamma = -10^\circ$; резание свободное

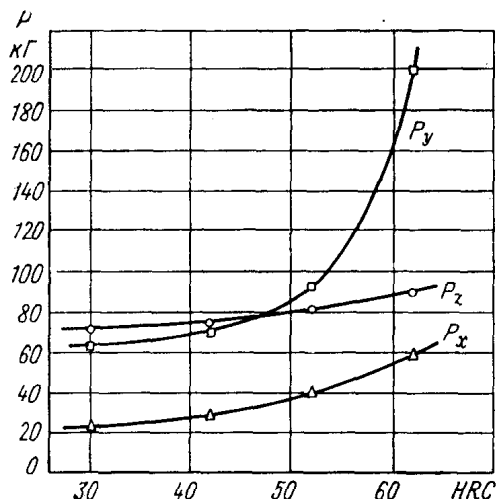


Рис. 75. Влияние твердости стали ЭХВГ на составляющие силы резания.

Резец Т15К6; $t=0,60$ мм; $s=0,30$ мм/об; $\varphi=\varphi_1=15^\circ$, $\gamma_{\text{прд}}=-25^\circ$, $\gamma_{\text{попер}}=0$, $r=0$

Для стали ЭХВГ твердостью HRC 45—65 при толщине срезаемого слоя от 0,027 до 0,10 мм и сохранении постоянства оптимальной температуры резания ширина контакта стружки с резцом может быть определена по формуле

$$c = \frac{36 \cdot 10^3 a^{0,75}}{HRC^{2,5}} \text{ мм}, \quad (53)$$

где a — толщина среза в мм;
HRC — твердость по Роквеллу.

При повышении твердости стали ЭХВГ от HRC 23 до HRC 62 ширина (и площадь) контакта стружки с передней гранью уменьшается в среднем в 5 раз (рис. 74), а составляющая силы резания P_z возрастает в 1,2—1,5 раза (рис. 75).

Значительное снижение площади контакта стружки с передней гранью реза при повышении механических свойств обрабатываемого материала получено также в исследованиях [25], [102].

Это приводит к резкому повышению среднего контактного давления стружки на переднюю грань и оказывает решающее влияние на выбор величины переднего угла. Оптимальная величина перед-

него угла находится в прямой зависимости от твердости закаленной стали и может быть определена по формуле

$$\gamma = (18 - 0,7HRC) \text{ град.} \quad (54)$$

3. На заднюю грань при обработке закаленных сталей, как правило, приходится большее усилие, чем на переднюю, а нарастание износа по задней грани резко увеличивает радиальную составляющую силы резания (рис. 76).

4. Для закаленной стали характерна более высокая истирающая способность, чем для незакаленной.

5. Резание закаленных сталей ведется на сравнительно низких скоростях. Это увеличивает время, в течение которого теплота трения стружки о резец успевает распространиться в зону стружкообразования и в некоторой степени изменить исходные свойства обрабатываемого материала [71]. Низкие скорости приводят к значительному росту поверхностного относительного износа. Из графика рис. 77 видно, что для сталей с твердостью от HRC 45 до HRC 65 зависимость $h_{0,п} = f(v)$ носит резко выраженный экстремальный характер. Чем выше твердость стали в исходном состоянии, тем ниже оптимальная скорость резания и тем выше величина оптимального поверхностного относительного износа.

На рис. 78 приведены стойкостные зависимости для стали ЭХВГ различной твердости при критерии затупления $h_r = 60 \text{ мк}$. Во всем диапазоне скоростей резания кривая $T-v$ при обработке более твердой стали расположена значительно ниже кривой $T-v$ для стали с меньшей твердостью.

С повышением твердости стали при сохранении постоянства режима резания температура резания повышается (рис. 79, 80). Она может быть подсчитана по формуле

$$\theta^{\circ} = 10,7v^{0,36}HRC^{0,75} \text{ град} \quad (55)$$

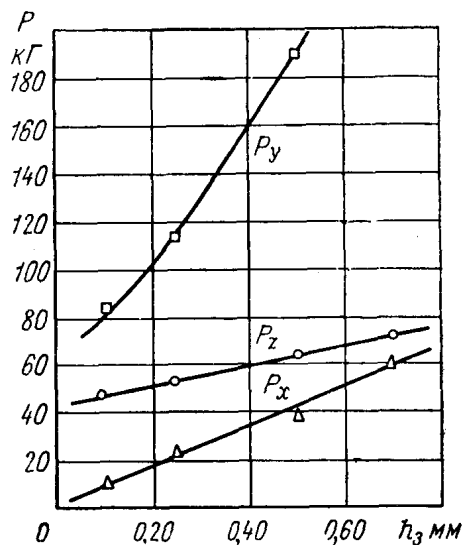


Рис. 76. Зависимость составляющих сил резания от ширины фаски износа по задней грани при чистовом точении.

Закаленная сталь ЭХ12М (HRC 61–62), резец Т15К6;
 $t=0,25 \text{ мм}$; $s=0,20 \text{ мм/об}$, $v=17 \text{ м/мин}$;
 $\varphi=\varphi_1=15^\circ$, $\gamma_{\text{прод}}=-25^\circ$, $\gamma_{\text{попер}}=0$, $\alpha=12^\circ$,
 $l=1,5 \text{ мм}$

Рис. 79 показывает, что минимум интенсивности размерного износа резца при обработке стали, имеющей различную исходную твердость, наблюдается при одной и той же оптимальной температуре резания ($\theta = 720-725^\circ \text{C}$), что подтверждается также исследованиями [71].

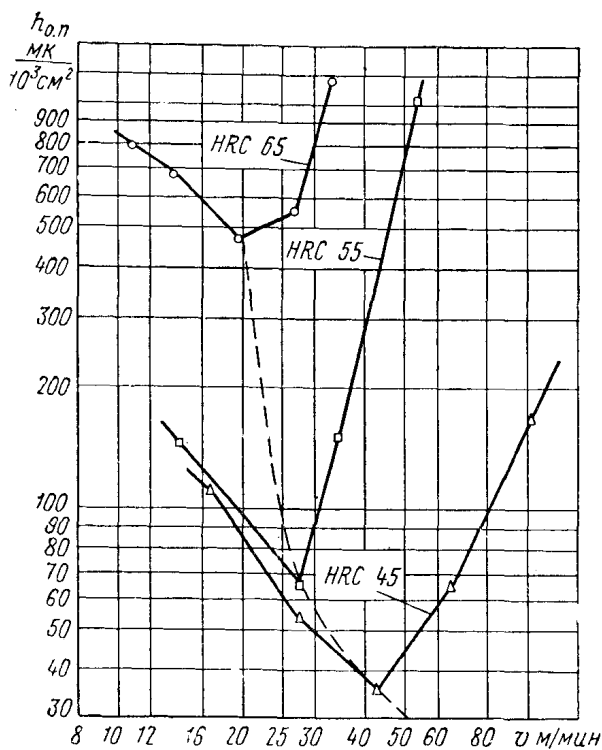


Рис. 77. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резца ВК8 при точении закаленной стали ЭХВГ различной твердости ($t=0,25$ мм, $s=0,10$ мм/об)

Интересно отметить, что для стали с твердостью HRC 45 и HRC 65 период стойкости при оптимальной температуре резания не является максимальным, но наблюдается минимум интенсивности износа резца и максимум его размерной стойкости.

Рис. 80 показывает, что во всем диапазоне температур резания кривые $T=f(\theta)$ для стали с меньшей твердостью располагаются выше соответствующих кривых для стали с большей твердостью. Следовательно, как в зоне адгезионного, так и в зоне диффузионного износа твердосплавного инструмента исходная твердость стали оказывает существенное влияние на интенсивность износа резца и период его стойкости.

Разница в периодах стойкости резца при $\theta = \text{const}$ при обработке сталей с разной твердостью (и структурой) обусловлена различиями в их истирающей способности [95].

При точении закаленной стали повышение скорости резания и температуры до оптимальных приводит к повышению отношения

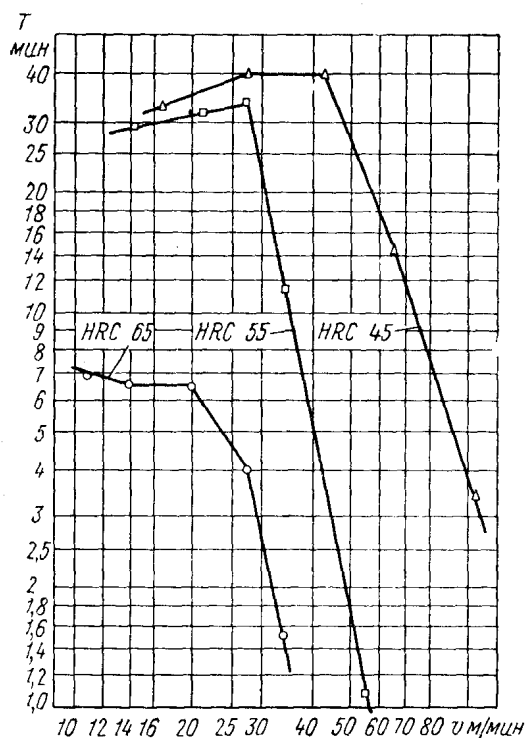


Рис. 78. Влияние скорости резания на период стойкости резца ВК8 при точении закаленной стали ЭХВГ различной твердости ($t=0,25$ мм, $s=0,10$ мм/об)

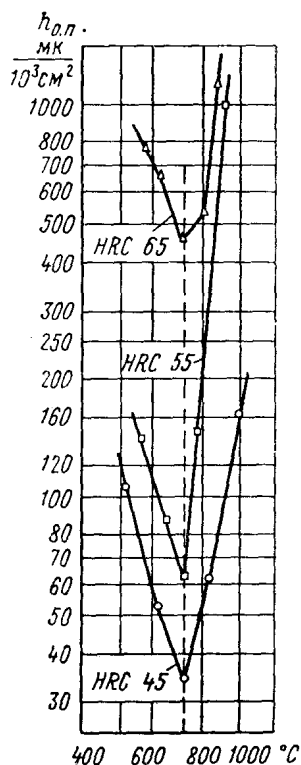


Рис. 79. Влияние температуры резания на поверхностный относительный износ резца ВК8 при точении закаленной стали ЭХВГ различной твердости ($t=0,25$ мм, $s=0,10$ мм/об)

твердостей в зоне контакта материала резца и обрабатываемого материала H_1/H_2 (рис. 81). Это, по-видимому, и служит основной причиной снижения интенсивности износа инструмента. Дальнейшее повышение температуры резания приводит к снижению отношения H_1/H_2 , что наряду с диффузией и обуславливает повышение интенсивности износа. Таким образом, при обработке закаленных сталей различной твердости минимум интенсивности размерного износа инструмента наблюдается при постоянной оптимальной температуре резания. Максимум отношения твердостей

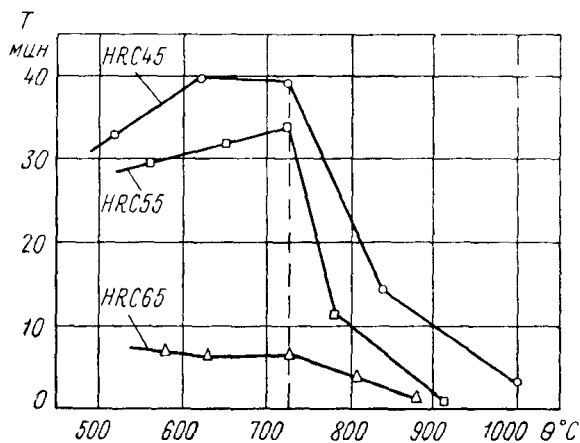


Рис. 80. Влияние температуры резания на период стойкости резца ВК8 при точении закаленной стали ЭХВГ различной твердости ($t=0,25$ мм, $s=0,10$ мм/об)

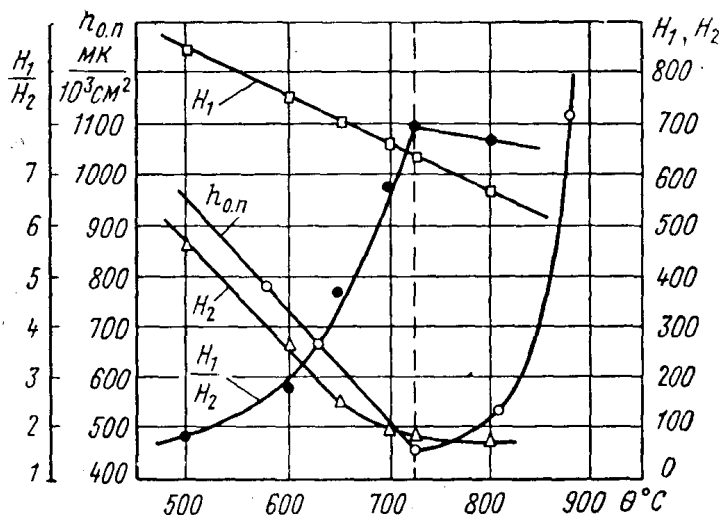


Рис. 81. Влияние температуры резания на поверхностный относительный износ и микротвердость в зоне контакта при точении.

Закаленная сталь ЭХВГ, резец ВК8 (HRC 65); $t=0,25$ мм, $s=0,10$ мм/об (кривые $H_1=f(\theta)$ и $H_2=f(\theta)$ — по М. Г. Лозинскому [51])

в зоне контакта и минимум интенсивности износа наблюдаются при одной и той же оптимальной температуре резания.

3. О сравнении режущих свойств различных инструментальных материалов

В настоящее время различные марки твердого сплава сравниваются между собой при некотором произвольно выбранном постоянном значении скорости резания. Так как зависимости $h_{o.п} = f(v)$ при обработке различных материалов резцами, оснащенными раз-

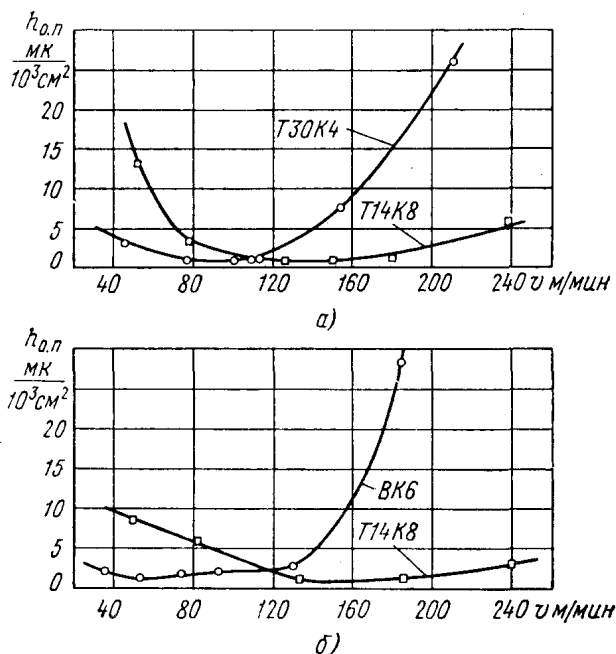


Рис. 82. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резцов, оснащенных различными твердыми сплавами (сталь 1X18H9T; $t=0,50$ мм):

а— $s=0,40$ мм/об; б— $s=0,30$ мм/об

личными марками твердого сплава, носят экстремальный характер, а точки минимума интенсивности износа при обработке одного и того же материала для разных твердых сплавов наблюдаются при различных оптимальных скоростях резания (рис. 82, 83), то сравнение разных твердых сплавов при каком-то постоянном значении скорости резания может создать неправильное представление об их относительной износостойкости.

В доказательство того рассмотрим графики на рис. 84, 85*.

При работе на низкой скорости резания (80 м/мин), соответствующей левой ветви кривой $h_{o.п} = f(v)$ для каждой марки твердого сплава, инструментальные материалы в порядке возрастания величины $h_{o.п}$ расположились в такой последовательности: Т30К4, Т15К6, Т14К8 и Т5К10. Так как левые ветви кривых $h_{o.п} = f(v)$ соответствуют так называемому адгезионному износу, интенсивность которого определяется отношением твердостей материала инструмента и обрабатываемого материала H_1/H_2 в зоне контакта [52], то

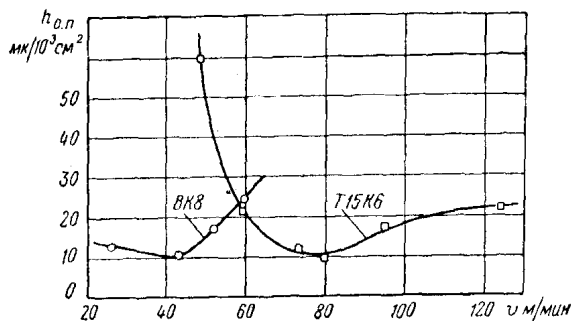


Рис. 83. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ резцов, оснащенных различными твердыми сплавами.

Сталь ЭИ654; $t=1$ мм, $s=0,47$ мм/об

такая последовательность расположения твердых сплавов по интенсивности износа является вполне закономерной и обоснованной.

Известно [52], что изменение марки твердого сплава на температуру резания оказывает незначительное влияние. Поэтому температуру в зоне резания и твердость обрабатываемого материала в зоне контакта при постоянной скорости резания для резцов, оснащенных различными марками твердых сплавов, можно считать практически независимыми от применяемой марки твердого сплава. Следовательно, твердые сплавы, имеющие более высокую твердость при температуре резания, будут иметь и большую величину отношения твердостей H_1/H_2 .

Титановольфрамкобальтовые твердые сплавы располагаются по твердости в порядке ее убывания (при различных температурах в интервале 20—1150°) на основе исследований А. И. Бетанели [7] и Н. Ф. Казакова [34] в той же последовательности, что и в наших исследованиях при работе на низких скоростях резания по величине

* В графиках рис. 84, 85, 87 и 89 значения $h_{o.п}$ и H_v для различных марок твердых сплавов соединены между собой лишь для удобства сопоставления. Значения твердости при различных температурах взяты из работы [34].

не поверхностного относительного износа (в порядке его возрастания).

Следовательно, нашими исследованиями подтверждается вывод Т. Н. Лоладзе [52] о существовании корреляции между интенсивностью износа различных марок твердого сплава в условиях адгезионного износа и отношением контактных твердостей H_1/H_2 .

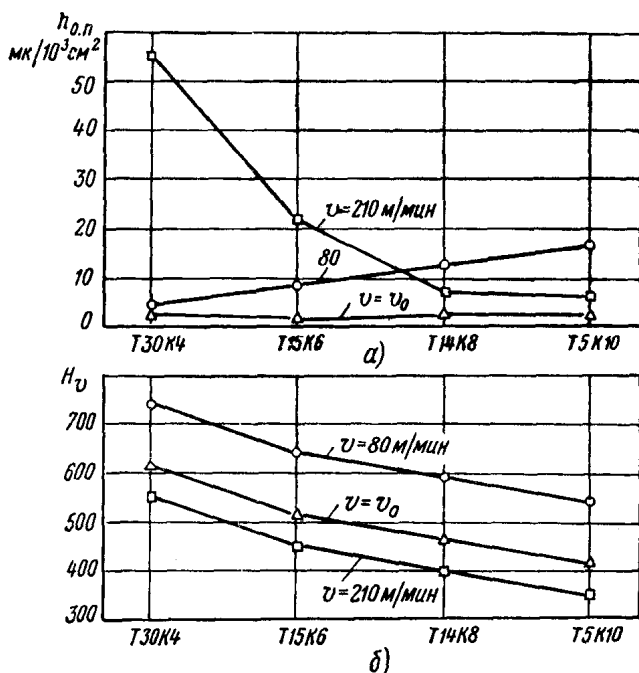


Рис. 84. Зависимость поверхностного относительного износа твердосплавных резцов и их твердости при температуре резания от марки твердого сплава.

Сталь 1X18H9T; $t=0,50$ мм, $s=0,10$ мм/об

Но те же марки твердого сплава при работе на высоких скоростях резания (210 м/мин), соответствующих правым ветвям кривых $h_{0,п}=f(v)$, по величине поверхностного относительного износа расположились в обратной последовательности (см. рис. 84). Титановольфрамокобальтовые твердые сплавы располагаются по твердости в одной и той же последовательности при всех температурах испытания. Поэтому и по величине отношения контактных твердостей H_1/H_2 указанные марки твердого сплава при низкой скорости резания (80 м/мин) и высокой скорости резания (210 м/мин) располагаются в одной и той же последовательности.

Относительная износостойкость различных марок твердых сплавов при высокой скорости резания находится в противоречии с отношением контактных твердостей H_1/H_2 (см. рис. 84 и 85).

Известно, что правые ветви кривых $h_{o.п} = f(v)$ соответствуют так называемому диффузионному износу инструмента. Следовательно, при работе на скоростях резания, соответствующих диффузионному износу инструмента, отношение контактных твердостей H_1/H_2 инструментального и обрабатываемого материала перестает быть фактором, определяющим относительную износостойкость различных марок твердых сплавов.

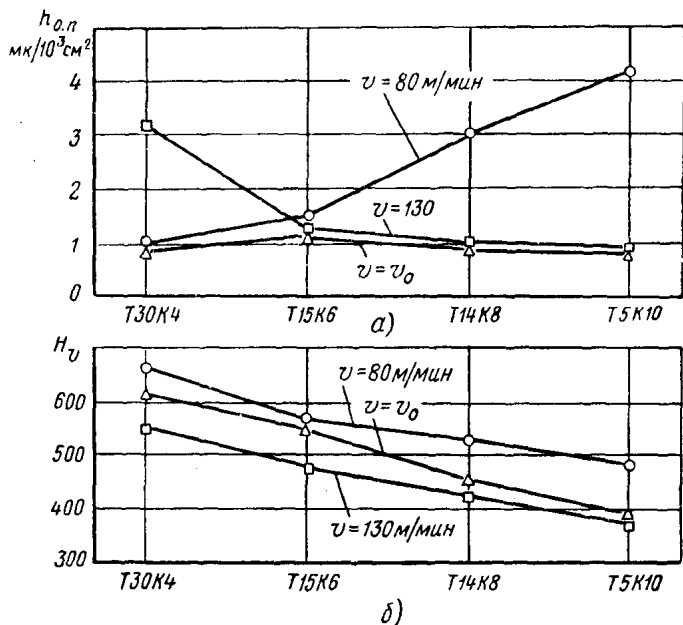


Рис. 85. Зависимость поверхностного относительного износа твердосплавных резцов и их твердости при температуре резания от марки твердого сплава.

Сталь 1X18H9T, $t=0,50$ мм, $s=0,40$ мм/об

Так, при точении стали 1X18H9T со скоростью резания 80 м/мин ($t=0,50$ мм; $s=0,10$ мм/об) поверхностный относительный износ $h_{o.п}$ резца Т30К4 составляет 4,5 мм/10³ см², $h_{o.п}$ резца Т5К10 — 17 мк/10³ см², т. е. в 3,78 раза больше.

При точении той же стали со скоростью резания 210 м/мин $h_{o.п}$ резца Т30К4 составляет 55 мк/10³ см², а $h_{o.п}$ резца Т5К10 всего 6,5 мк/10³ см², т. е. в 8,45 раза меньше.

Таким образом, получив частную зависимость об относительной износостойкости твердых сплавов Т30К4 и Т5К10 при скорости резания 80 м/мин и распространив эту зависимость на скорость резания 210 м/мин, можно совершить ошибку в определении относительной износостойкости указанных марок твердого сплава в 32 раза. Примерно такую же ошибку в определении относительной износостойкости твердых сплавов Т30К4 и Т5К10 можно совершить и в случае проведения испытаний на подаче 0,40 мм/об.

Очевидно, что наиболее правильно сравнивать различные марки твердого сплава и минералокерамики при оптимальных скоростях резания. Несмотря на то, что они различны для различных марок твердого сплава, сравнение износостойкости твердых сплавов показывает, что величины $h_{o.п.o}$ для резцов, оснащенных различными марками твердого сплава, мало отличаются друг от друга.

Так, при работе на оптимальных скоростях резания ($t=0,50$ мм; $s=0,10$ мм/об) при точении стали 1X18H9T $h_{o.п.o}$ резца Т30К4 составил $2,56$ мк/ 10^3 см², а $h_{o.п.o}$ резца Т5К10 — $2,23$ мк/ 10^3 см², т. е. по величине $h_{o.п.o}$ указанные марки твердого сплава отличаются друг от друга всего на 13%.

При работе на более высокой подаче $0,40$ мм/об различные марки титановольфрамокобальтового твердого сплава по величине $h_{o.п.o}$ отличаются еще меньше.

Малое влияние марки твердого сплава на величину $h_{o.п.o}$ проявляется не только внутри титановольфрамокобальтовой группы твердых сплавов, но и вольфрамокобальтовой группы.

Ниже приводятся данные о величине $h_{o.п.o}$ резцов, оснащенных различными марками твердого сплава, при точении стали 1X18H9T ($t=0,50$ мм и $s=0,30$ мм/об):

Марка твердого сплава	Т30К4	Т15К6	Т14К8	Т5К10	ВК2	ВК3	ВК4	ВК6	ВК8
Величина $h_{o.п.o}$ в мк/ 10^3 см ²	1,13	1,48	0,99	1,15	1,33	1,33	1,23	1,0	2,3

Коэффициент вариации величины оптимального поверхностного относительного износа для девяти марок твердого сплава составляет 29,2%, а для восьми марок твердого сплава (без сплава ВК8, который имеет повышенную интенсивность размерного износа по сравнению с другими марками твердого сплава) коэффициент вариации величины $h_{o.п.o}$ составляет всего 14,4%.

Для того, чтобы полнее оценить насколько близко сходятся различные марки твердого сплава по величине относительного износа, наблюдаемого при оптимальных скоростях резания, рассмотрим стабильность режущих свойств некоторых инструментальных материалов. Условия, при которых проводились испытания, и коэффициент вариации величины поверхностного относительного износа приведены в табл. 20.

Приведенные данные показывают, что коэффициент вариации величины поверхностного относительного износа различных резцов, оснащенных пластинками одной и той же партии и марки твердого сплава, при точении стали 1X18H9T в случае сохранения строго постоянных условий испытания находится в пределах от 8,4 до 13,3%, т. е. весьма незначительно отличается от коэффициента вариации величины оптимального поверхностного относительного износа для восьми разноименных марок твердого сплава. Следовательно, различные марки твердого сплава при работе на оптимальных (но различных для каждого твердого сплава) скоростях резания показы-

вают при точении стали 1X18H9T практически совпадающие величины интенсивности размерного износа.

Таблица 20

Коэффициент вариации* режущих свойств некоторых инструментальных материалов

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	Количество резцов	Режим резания			Длина пути резания l м	Коэффициент вариации величин $h_{o,п}$
			t мм	s мм/об	v м/мин		
Осевая сталь	ЦМ332	6	0,25	0,10	250	11 000	10,7
1X18H9T	BK2	5	0,5	0,20	157	500	8,8
1X18H9T	BK2	5	0,5	0,20	141	2 000	10,6
1X18H9T	BK6	5	0,5	0,20	168	500	13,3
1X18H9T	BK8	8	0,50	0,20	178	600	8,4
ЭИ654	T14K8	3	1,0	0,20	105	500	6,0

* Коэффициентом вариации называется отношение среднего квадратического отклонения к средней арифметической величине, выраженное в процентах.

Ошибка в определении относительной износостойкости твердых сплавов, принадлежащих различным группам (BK и ТК), при произвольно выбранных постоянных скоростях резания получается еще более значительной (рис. 86).

Так, при работе на скорости резания 52 м/мин ($t=0,50$ мм; $s=0,30$ мм/об) величина $h_{o,п}$ резца, оснащенного твердым сплавом BK6, составляет 1 мк/10³ см², а для резца T14K8 — 8,4 мк/10³ см², т. е. больше в 8,4 раза. При работе же со скоростью резания 185 м/мин величина $h_{o,п}$ для резца BK6 составляет 28,5 мк/10³ см², а для резца T14K8 — всего лишь 1,17 мк/10³ см², т. е. меньше в 24,2 раза.

Таким образом, если частное соотношение величин поверхностного относительного износа, полученное при точении стали 1X18H9T резцами BK6 и T14K8 со скоростью 52 м/мин, распространить на соотношение величин $h_{o,п}$ при скорости резания 185 м/мин, то будет совершена ошибка в определении относительной износостойкости указанных марок твердого сплава в 197 раз.

Противоречивый характер данных об относительной износостойкости различных инструментальных материалов, наблюдаемый различными исследователями, по-видимому, объясняется именно тем, что сравнение инструментов проводилось при произвольно выбранных постоянных скоростях резания и, следовательно, интенсив-

ность износа для различных инструментальных материалов соответствовала различным фазам кривой $h_{o.п} = f(v)$. Например, при точении стали ЭИ654 ($t=1$ мм; $s=0,47$ мм/об) скорость резания 50 м/мин соответствует правой ветви кривой $h_{o.п} = f(v)$ для резцов, оснащенных твердым сплавом ВК8 и левой ветви для резцов Т15К6.

Слабое влияние марки твердого сплава на величину оптимального поверхностного относительного износа $h_{o.п.o}$ наблюдается также и при точении жаропрочной стали ЭИ654. Если при скорости резания 48 м/мин резцы ВК8 и Т15К6 отличаются по величине $h_{o.п}$ примерно в 4 раза, то те же резцы при работе на оптимальных скоростях резания (43 и 80 м/мин) отличаются по величине $h_{o.п.o}$ всего лишь на 15% (см. рис. 83).

Поэтому сравнительные испытания различных инструментальных материалов при постоянных скоростях резания могут быть оправданы и являются необходимыми лишь в тех случаях, когда инструмент предназначен для работы при этом постоянном режиме резания.

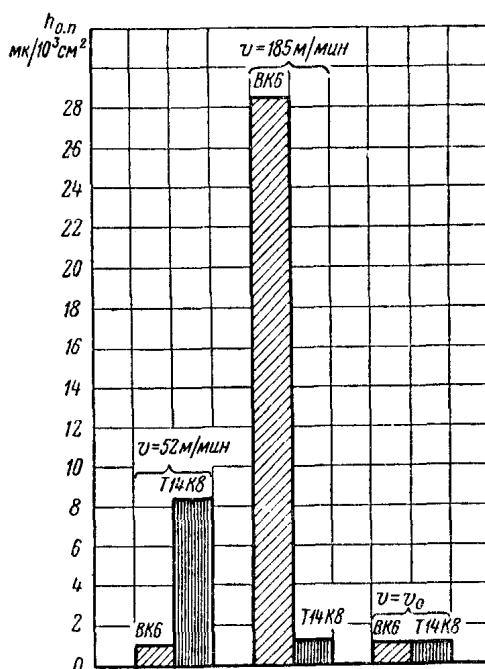


Рис. 86. Сравнение интенсивности износа резцов ВК6 и Т14К8 при точении стали 1Х18Н9Т на различных скоростях резания ($t=0,50$ мм, $s=0,30$ мм/об)

4. Взаимосвязь интенсивности износа инструмента с чистотой обработанной поверхности

Различные инструментальные материалы при той же геометрии инструмента и тех же режимах резания могут дать различную чистоту обработки. Это объясняется различием в силах адгезии и условий трения на поверхностях контакта и разной способностью различных инструментальных материалов сохранять режущую кромку.

Неодинаковая склонность разных твердых сплавов к слипанию с обрабатываемым материалом сказывается на усадке стружки, величине среднего коэффициента трения, а также на величине сил, действующих на задней грани резца [25], [28], [30].

Между склонностью твердого сплава к адгезии и чистотой обработанной поверхности, а также интенсивностью износа существует прямая и тесная связь [52]. Следовательно, для различных инструментальных материалов должна существовать прямая связь между интенсивностью износа инструмента и высотой неровностей обработанной поверхности.

Такая связь впервые была установлена нами при точении осевой стали резцами, оснащенными различными инструментальными марками материалов [58], [60].

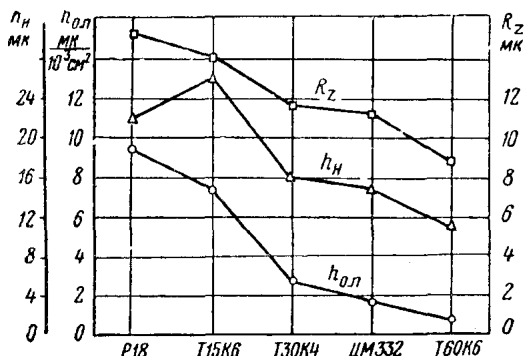


Рис. 87. Зависимость начального и относительного износа резца и высоты неровностей обработанной поверхности от марки инструментального материала при чистовом точении осевой стали ($\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0$; $r=1$ мм; $t=0,25$ мм; $s=0,10$ мм/об; $v=116$ м/мин для P18 и 250 м/мин для остальных марок)

Опыты показали, что те инструментальные материалы, которые имеют меньшую величину относительного износа, имеют также и меньший начальный износ и дают меньшую высоту неровностей обработанной поверхности (рис. 87).

Влияние марки инструментального материала на чистоту обработанной поверхности следует устанавливать не при произвольно выбранных и постоянных для всех твердых сплавов скоростях

резания, а при оптимальных для каждого сплава. В этом случае будет выдержано постоянство таких условий резания, при которых для каждого твердого сплава обеспечивается минимальная интенсивность размерного износа.

Оценка влияния марки твердого сплава на высоту неровностей при оптимальной скорости резания более правильна, так как сравнение при $v=\text{const}$ в ряде случаев может привести к ошибочным заключениям в силу того, что высота неровностей при произвольно выбранных постоянных скоростях резания может принадлежать для различных твердых сплавов разным фазам кривой $R_z=f(v)$.

Так, при точении стали 1Х18Н9Т резцами ВК3 и Т14К8 на оптимальных скоростях резания (52 и 133 м/мин соответственно) были получены довольно близкие величины поверхностных относительных износов $h_{0,л.о}$ и практически совпадающие значения высот неровностей R_z (рис. 88). Если же резцы ВК3 и Т14К8 сравнивать при постоянной скорости резания 52 м/мин, то резец ВК3 оказывается более износостойким и дающим более чистую поверхность, так как для него скорость резания 52 м/мин является оптимальной, а для резца Т14К8 она находится в зоне усиленного адгезионного износа.

И наоборот, скорость резания 133 м/мин для резца Т14К8 является оптимальной, тогда как резец ВКЗ при этой скорости резания подвергается усиленному диффузионному износу. Следовательно, данные об относительной высоте неровностей, так же как и данные об относительной износостойкости, полученные для различных инструментальных материалов при одной и той же скорости резания, ни в коем случае нельзя распространять на другие скорости резания без риска совершить грубую ошибку.

Вероятность такой ошибки будет тем большей, чем больше для сравниваемых сплавов разница оптимальных скоростей резания.

Влияние марки твердого сплава на высоту неровностей обработанной поверхности при точении стали 1Х18Н9Т на оптимальных, но различных для каждого твердого сплава, скоростях резания приведено на рис. 89. Так как по мере затупления резца высота неровностей R_z не оставалась постоянной, то при оценке влияния марки твердого сплава на величину R_z , последняя принималась как среднее арифметическое высот неровностей, полученных на обработанной поверхности в начале и в конце периода нормального износа резца.

Марки твердого сплава расположены в порядке возрастания величин $h_{o.p.o.}$. Рис. 89 показывает, что по высоте R_z твердые сплавы расположились в той же последовательности. Твердые сплавы ВК6 и Т30К4 при работе на подаче 0,30 мм/об дают несколько меньшую высоту неровностей R_z по сравнению с твердыми сплавами Т14К8 и ВК4, хотя по интенсивности износа они отличаются друг от друга весьма незначительно (рис. 89, а). Характерно, что именно для этих двух марок твердого сплава наблюдается некоторое нарушение строгой закономерности между относительными уровнями величин $h_{o.p.o.}$ и R_z , что, по-видимому, связано с лучшей способностью

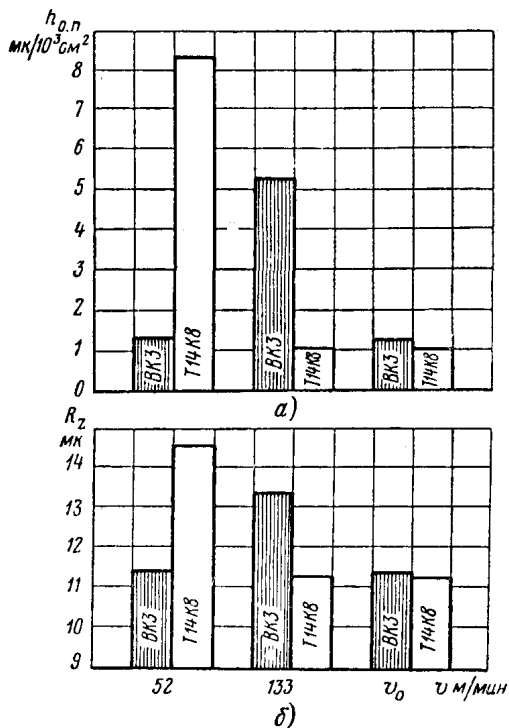


Рис. 88. Интенсивность износа инструмента и высота неровностей обработанной поверхности при точении с различными скоростями резания.

Сталь 1Х18Н9Т, резцы ВКЗ и Т14К8 ($t=0,50$ мм; $s=0,30$ мм/об; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $r=1$ мм)

твердых сплавов Т30К4 и ВК6 сохранять первоначальную форму своей режущей кромки [30].

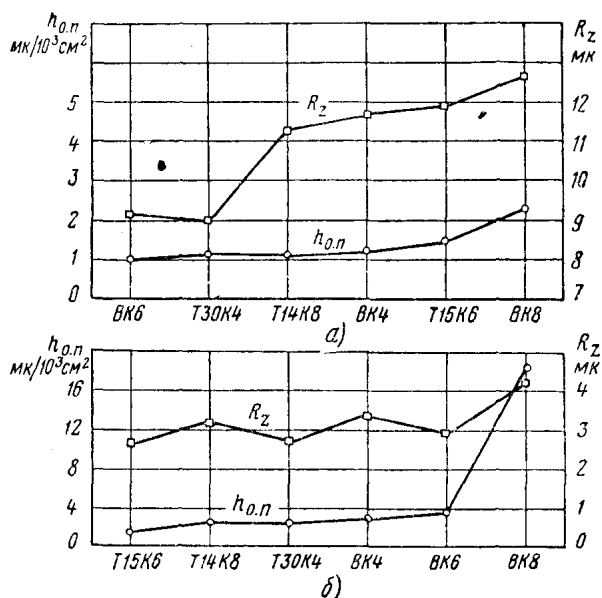


Рис. 89. Зависимость высоты неровностей обработанной поверхности и поверхностного относительного износа резца от марки инструментального материала при точении стали 1Х18Н9Т на оптимальных скоростях резания ($t=0,50$ мм):

а— $s=0,30$ мм/об; б— $s=0,10$ мм/об

5. Основные выводы

1. Между характеристиками механических свойств обрабатываемого материала и уровнем оптимальных скоростей резания и величиной $h_{0.п.о}$ нет непосредственной зависимости.

2. Зависимость поверхностного относительного износа от скорости резания $h_{0.п}=f(v)$ при обработке закаленной стали различной твердости носит резко выраженный экстремальный характер.

3. Чем выше твердость стали в исходном состоянии, тем при меньшей скорости резания наблюдается минимальная интенсивность размерного износа инструмента и тем выше величина $h_{0.п.о}$.

4. Минимум интенсивности размерного износа резца при обработке закаленной стали различной твердости наблюдается при одной и той же оптимальной температуре резания. Точкам максимума кривых $T=f(v)$ при обработке стали разной твердости соответствует различная температура резания.

5. Во всем диапазоне температур резания кривая $T=f(\theta)$ предполагается тем ниже, чем выше исходная твердость закаленной стали. Следовательно, при работе на любых скоростях (и температурах) резания наряду с явлениями адгезии и диффузии на интенсивность износа резца большое влияние оказывает исходная твердость и структура обрабатываемого материала.

6. При точении закаленной стали с повышением температуры резания до оптимальной повышается величина отношения твердости материала резца и обрабатываемого материала в зоне резания. Дальнейшее повышение температуры резания приводит к некоторому снижению указанного отношения. Максимум отношения контактных твердостей и минимум интенсивности износа резца наблюдаются при одной и той же оптимальной температуре резания.

7. Так как зависимости $h_{o,п}=f(v)$ при обработке различных материалов твердосплавными резцами носят экстремальный характер, и минимум интенсивности износа при обработке одного и того же материала для разных марок твердого сплава наблюдается при различных оптимальных скоростях резания, то частное соотношение величин $h_{o,п}$, полученное при работе на одной какой-либо скорости резания, совершенно недопустимо распространять на другие скорости резания.

8. Встречающиеся в технической литературе противоречия в оценке относительной износостойкости различных марок твердого сплава объясняются тем, что сравнительные испытания инструментов обычно проводятся при постоянных скоростях резания. Износ различных марок твердого сплава при $v=\text{const}$ может иметь различный характер (адгезионный, диффузионный) и соответствовать разным фазам кривой $h_{o,п}=f(v)$.

9. Объективные данные об относительной износостойкости различных марок твердого сплава дает величина оптимального поверхностного относительного износа $h_{o,п.о.}$

10. Величина $h_{o,п}$ резцов группы ТК при точении стали 1X18H9Г в условиях адгезионного износа тем выше, чем меньше содержание карбидов титана в твердом сплаве и, следовательно, чем ниже величина отношения контактных твердостей H_1/H_2 .

Чем меньше твердый сплав группы ТК содержит карбидов титана, тем он более инертен по отношению к стали 1X18H9Г и тем выше его износостойкость при диффузионном износе при работе на малых подачах 0,10—0,20 мм/об.

11. В тех случаях, когда действительные условия обработки отличаются от оптимальных, определяемых параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости, следует специально подбирать наилучшую для заданного сочетания s и v марку твердого сплава.

12. При обработке различных по своим свойствам и обрабатываемости материалов высота неровностей обработанной поверхности находится в тесной взаимосвязи с интенсивностью размерного износа инструмента.

Скорость и глубина резания, передний и задний угол инструмента, марка инструментального материала и другие факторы, влияющие на интенсивность радиального износа, воздействуют в том же направлении на высоту неровностей обработанной поверхности.

13. Параметрические уравнения максимальной размерной стойкости инструмента могут одновременно использоваться также и для выбора скоростей резания, являющихся оптимальными по чистоте обработки.

14. Последовательность расположения различных марок твердого сплава по высоте неровностей, образующихся на обрабатываемой детали, зависит от уровня применяемых скоростей резания и для различных скоростей резания может носить противоположный характер.

15. Наиболее объективные данные о влиянии марки инструментального материала на высоту неровностей могут быть получены только при работе на оптимальных (но различных для разных марок твердого сплава) скоростях резания.

При эксплуатации резцов на оптимальных скоростях резания происходит весьма существенное сглаживание разницы между отдельными марками твердого сплава как по интенсивности размерного износа, так и по высоте неровностей обработанной поверхности.



Глава VII

НОВЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА

В автоматизированном производстве часто рациональнее производить замену резцов вместо подналадки, так как при использовании быстросменной оснастки на замену резца расходуется меньше времени, чем на его подналадку [98]. Сигналом для замены инструмента является выход размера детали за пределы поля допуска. При этом время работы инструмента до его замены определяется не общей стойкостью, а размерной стойкостью, которая измеряется длиной пути резца в металле или количеством деталей, обработанных в пределах допуска. По данным эксплуатации автоматической линии роликовых подшипников 1-го ГПЗ размерная стойкость на токарных операциях составляет всего от 30 до 50% общей стойкости (в зависимости от допустимой ширины фаски износа по задней поверхности). В этих условиях изыскание геометрии инструмента, обеспечивающей повышенную размерную стойкость даже за счет некоторого снижения общей стойкости, является задачей весьма актуальной. Примером такой геометрии инструмента являются предложенные нами резцы с фаской по задней поверхности под нулевым задним углом*.

Ниже приводятся результаты исследования размерной стойкости таких резцов с нулевой фаской по задней грани и высоты неровностей поверхности при чистовой обработке некоторых материалов.

1. Определение оптимальной ширины нулевой фаски по задней грани

К концу периода начального износа на задней грани резца образуется поверхность износа шириной $h_{з.н.}$, расположенная под углом $\alpha_{ф}=0$, после чего интенсивность износа резца остается постоянной.

* А. Д. Макаров, Новый способ повышения размерной стойкости резцов и производительности обработки, Удостоверение № 11688 о регистрации работы в Комитете по делам Изобретений и открытий при Совете Министров СССР от 26 декабря 1958 г.

Поверхность износа прилегает к главной режущей кромке, вершине резца, а также к вспомогательной режущей кромке. Поэтому, если у вновь заточенного резца или зуба фрезы вдоль всего режущего лезвия (а не только по главной режущей кромке) снять фаску под нулевым углом, то можно исключить период начального износа и с самого начала процесса резания работать в зоне так называемого нормального износа инструмента. Снижение радиального износа в начальный период работы резца обеспечит повышение размерной стойкости.

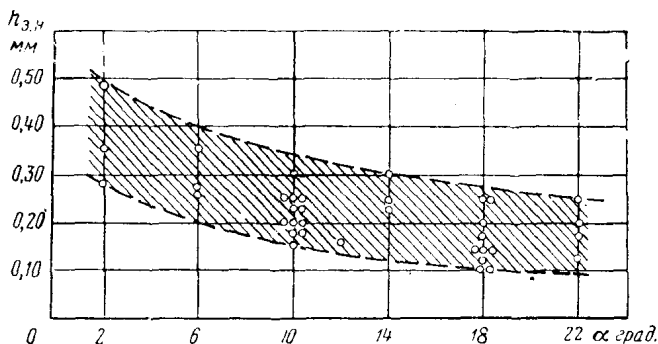


Рис. 90. Влияние заднего угла резца на его начальный износ по задней грани при точении осевой стали ($\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\gamma=0$; $r=0,5\div2,0$ мм; $l_n=2000$ м; $t=0,1\div1,0$ мм; $s=0,10\div0,30$ мм/об; $v=100\div540$ м/мин)

В качестве оптимальной ширины такой фаски, снимаемой у вновь заточенного резца, логично принять величину $h_{з.н.}$. Главным фактором, влияющим на величину $h_{з.н.}$, является задний угол резца α . На основании графоаналитической обработки опытных данных (рис. 90) для определения величины $h_{з.н.}$ в мм выведена формула

$$h_{з.н.} = \frac{0,80}{\alpha^{0,66}}, \quad (56)$$

дающая достаточно хорошее совпадение с опытными данными табл. 21.

Так как скорость резания, подача и глубина резания на величину $h_{з.н.}$ заметного влияния не оказывают, то формула (56) и табл. 21 могут быть использованы для выбора ширины фаски $f_3=h_{з.н.}$ для всего практически целесообразного для чистовой обработки диапазона изменения режима резания (v, s, t).

Экспериментальная проверка влияния ширины фаски f_3 на радиальный износ резца h_r , износ по задней поверхности h_3 и высоту неровностей R_z была проведена (рис. 91—92) при продольном точении стали 18ХНВА резцом Т15К6 при $f_3=0,05\div0,20$ мм и $\alpha_{ф}=0^\circ$.

Все опыты были проведены одной и той же пластинкой твердого сплава, при режиме резания: $v=125$ м/мин, $s=0,10$ мм/об, $t=0,25$ мм

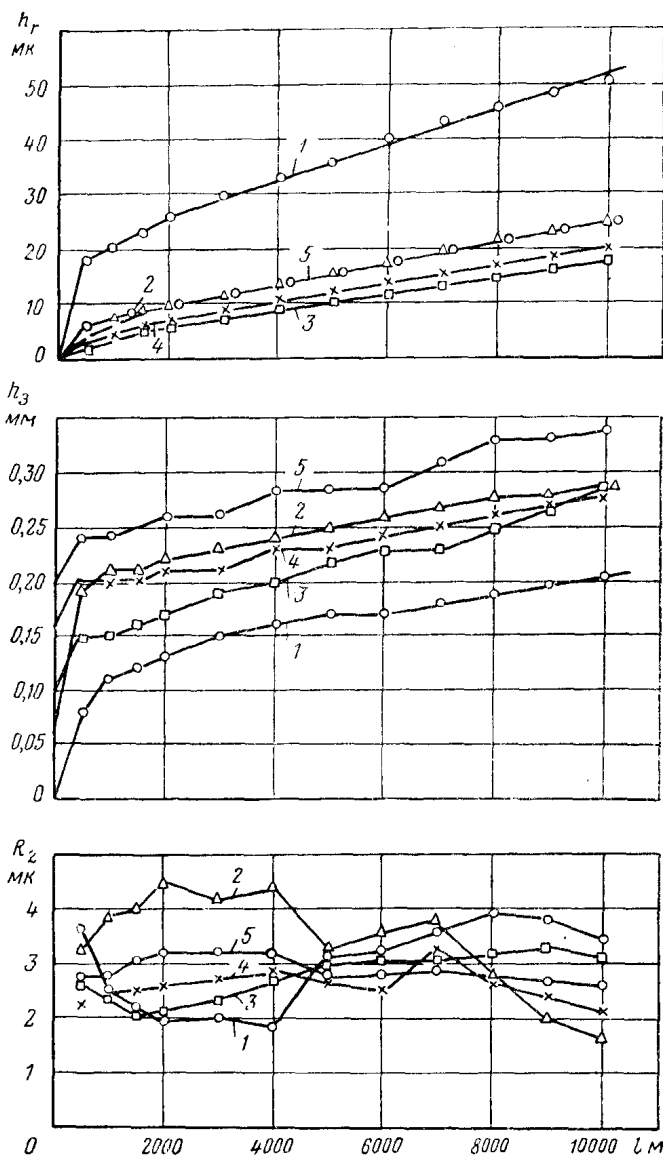


Рис. 91. Влияние длины пути резания на радиальный износ реза Т15К6, износ по задней поверхности и высоту неровностей при точении стали 18ХНВА при различной ширине нулевой фаски:

1— $f_3=0$; 2— $f_3=0,05$ мм; 3— $f_3=0,10$ мм; 4— $f_3=0,15$ мм; 5— $f_3=0,20$ мм

Зависимость начального износа резца по задней грани $h_{з.н}$ от заднего угла α

Задний угол α в град	6	8	10	12	15	18
Расчетный начальный износ [по формуле (56)]	0,245	0,20	0,175	0,155	0,134	0,118
Средний фактический начальный износ	0,255		0,174			0,119
Число опытов	2		13			10

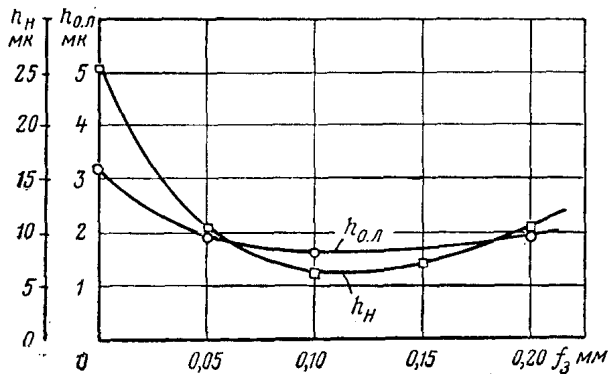


Рис. 92. Влияние ширины нулевой фаски на начальный и относительный износ резца Т15К6 при точении стали 18ХНВА ($\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $\gamma=0$; $r=1$ мм; $l_n=2000$ м; $t=0,25$ мм; $s=0,10$ мм/об; $v=125$ м/мин)

и длине пути резания 10 000 м, что соответствовало 80 мин машинного времени работы резца. Можно было предполагать, что фаска уменьшит только начальный износ, однако опыты показали, что резец с нулевой фаской по задней грани менее интенсивно изнашивается и при дальнейшей работе (табл. 22).

Из табл. 22 следует, что оптимальная ширина фаски $f_3=0,10 \div 0,15$ мм, при которой резец в начальный период изнашивается вчетверо медленнее резца без фаски, а в период нормальной работы — в 2 раза. Как уменьшение, так и увеличение ширины фаски сверх оптимальных значений приводит к росту начального и относительного износа, а следовательно, и к снижению точности обработки.

То же наблюдалось при точении стали 40Х минералокерамическим резцом ЦМ332 (рис. 93), где оптимальная ширина фаски, обеспечивающая наименьшую величину радиального износа, $f_3=0,10 \div 0,20$ мм.

Начальный, относительный и размерный износ резца Т15К6
с различной шириной фаски при точении стали 18ХНВА

($t = 0,25$ мм; $s = 0,10$ мм/об; $v = 125$ м/мин; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 10^\circ$;
 $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 1$ мм)

Ширина фаски f_3 мм	Начальный ради- альный износ		Относительный износ		Размерный износ	
	h_n мк	%	$h_{o,л}$ мк/км	%	h_r мк	%
0	25,5	100	3,18	100	51	100
0,05	10	39	1,875	59	25	49
0,10	6	23,5	1,56	49	18,5	36
0,15	7	27,4	1,63	51	20	39
0,20	10	39	1,875	59	25	49

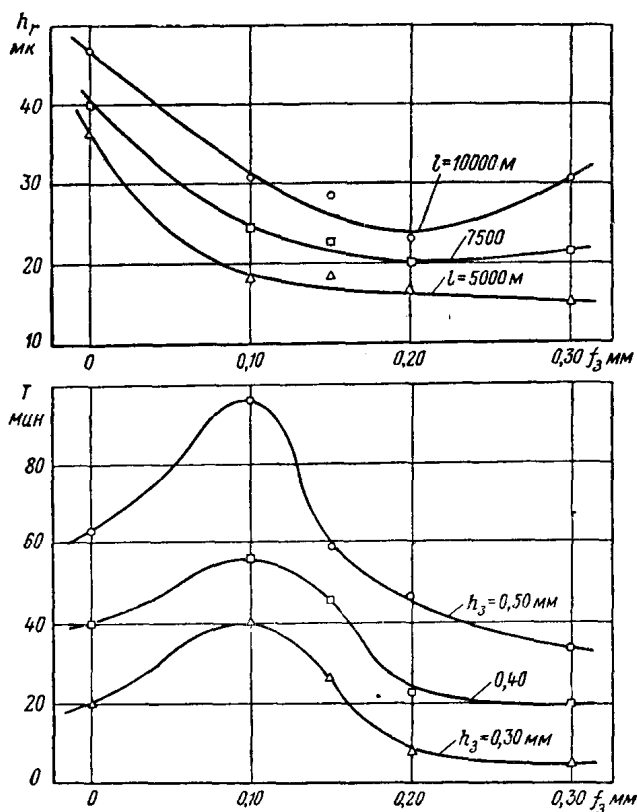


Рис. 93. Влияние ширины нулевой фаски на ради-
альный износ при различной длине пути резания и на
период стойкости резца при различном критерии из-
носа.

Сталь 40X; резец ЦМ332; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0$; $r = 1$ мм;
 $t = 0,25$ мм; $s = 0,10$ мм/об; $v = 300$ м/мин

Резцы с фаской $f_3 \geq 0,20$ мм имеют меньшую интенсивность радиального износа по сравнению с резцами без фаски, но при этом сокращается общий период стойкости.

При $f_3 = 0,10 - 0,15$ мм общая стойкость минералокерамического резца повышается.

2. Эффективность фаски при различных скоростях резания

Наблюдения за изменением интенсивности размерного износа резцов Т30К4 после нанесения нулевой фаски при различных скоростях резания показали на стали 18ХНВА, что при всех скоростях резания в диапазоне 75—300 м/мин фаска значительно снижает ра-

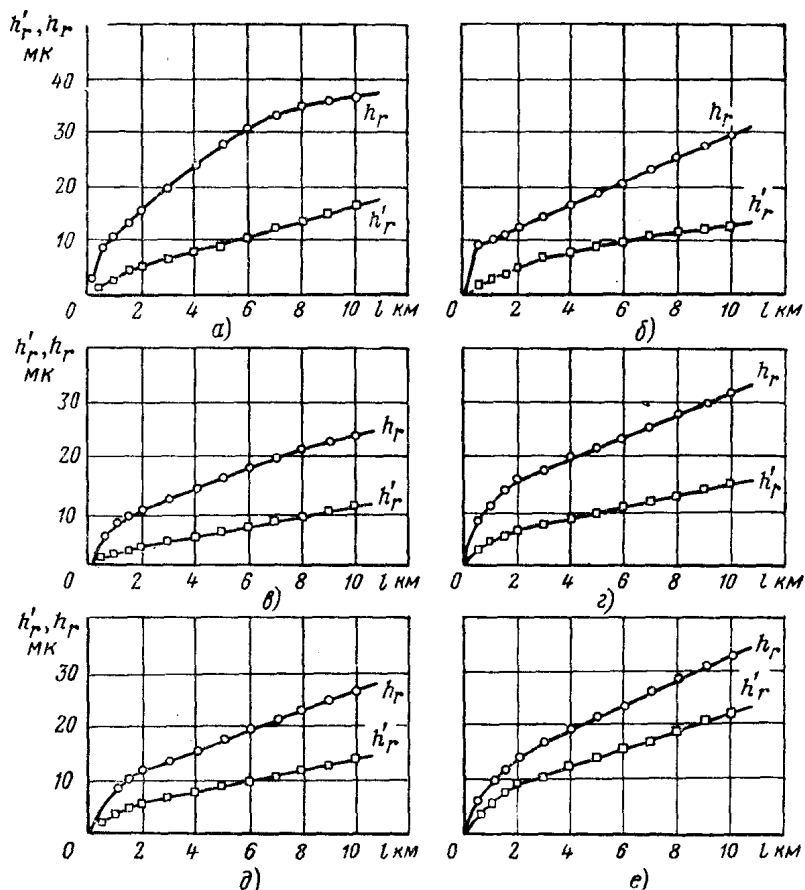


Рис. 94. Сравнение радиального износа резца Т30К4 в зависимости от длины пути резания при точении стали 18ХНВА ($t = 0,25$ мм; $s = 0,10$ мм/об; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 10^\circ$; $r = 1,0$ мм; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\gamma = 0$; $f_3 = 0,10$ мм):

а— $v = 75$ м/мин; б— $v = 100$ м/мин; в— $v = 150$ м/мин; г— $v = 200$ м/мин;
 д— $v = 250$ м/мин; е— $v = 300$ м/мин;
 ○ — резцы без фаски; □ — резцы с фаской

диальный износ резца (табл. 23) и эффективность фаски тем выше, чем ближе скорость резания к оптимальной (100—250 м/мин) (рис. 94—95). При этих скоростях резания фаска снижает относительный износ в среднем на 50%. Таким образом, при оптимальных по относительному износу скоростях резания нанесение фаски приобретает еще большее значение, так как обеспечивает весьма существенное повышение размерной стойкости.

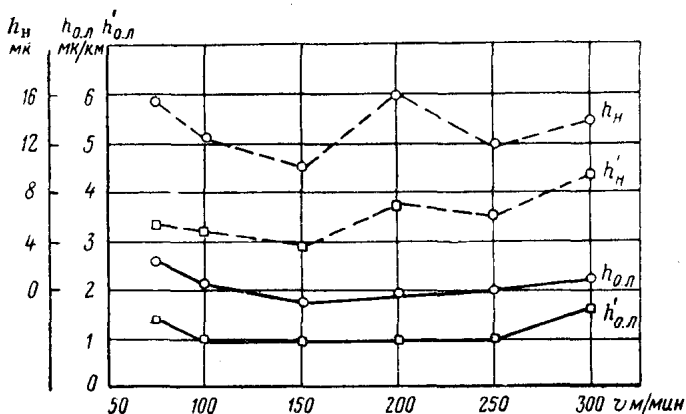


Рис. 95. Сравнение начального и относительного износа резцов Т30К4 в зависимости от скорости резания при точении стали 18ХНВА

○ — резцы без фаски; □ — резцы с фаской

Таблица 23

Износ резцов Т30К4 без фаски и с фаской на различных скоростях резания

(сталь 18ХНВА; $\alpha = 18^\circ$; $t = 0,25$ мм; $s = 0,10$ мм/об; $l_n = 2000$ м; $l = 10\,000$ м)

Скорость резания <i>м/мин</i>	Начальный радиальный износ в <i>мк</i>		Отно- шение $\frac{h'_н}{h_н}$ $\frac{h'_н}{\%}$	Относи- тельный линейный износ в <i>мк/км</i>		Отно- шение $\frac{h'_{0,л}}{h_{0,л}}$ $\frac{h'_{0,л}}{\%}$	Конечный радиальный износ в <i>мк</i>		Отно- шение $\frac{h'_р}{h_р}$ $\frac{h'_р}{\%}$
	без фаски $h_н$	с фас- кой $h'_н$		без фаски $h_{0,л}$	с фас- кой $h'_{0,л}$		без фаски $h_р$	с фас- кой $h'_р$	
75	15,5	5,5	35,5	2,62	1,44	55	37	17	46
100	12,5	5	40,0	2,19	1,0	45,5	30	13	43
150	10	3,5	35	1,75	0,94	53,5	24	11	46
200	16	7	44	2,0	1,06	53	32	15,5	48
250	11,5	6	52	1,94	1,0	51,5	27	14	52
300	14	7	50	2,25	1,68	74,5	32	23	72

3. Эффективность фаски при различных подачах

Аналогично предыдущему установлено, что при работе на всех подачах в рассмотренном диапазоне их изменения (рис. 96—97, табл. 24) резец с фаской имеет примерно в два раза меньший относительный и конечный радиальный износ, чем резец без фаски, а его размерная стойкость в 2 раза выше. Повышенная размерная стой-

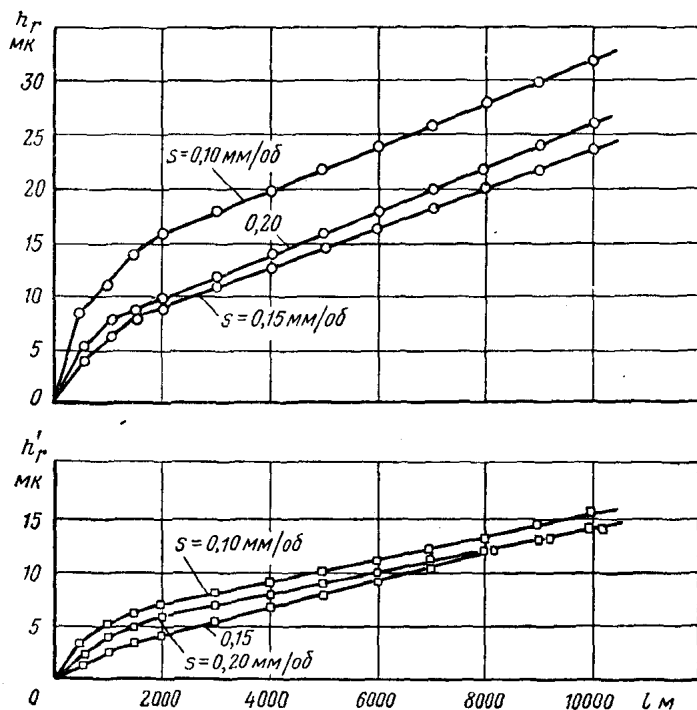


Рис. 96. Сравнение радиального износа резца Т30К4 в зависимости от длины пути резания при точении стали 18ХНВА ($v=200$ м/мин; $t=0,25$ мм).

О—резцы без фаски; □—резцы с фаской

кость резцов с фаской обусловлена тем, что новые участки вспомогательной режущей кромки, которые по мере износа резца вступают в резание и формируют профиль обработанной поверхности, уже имеют некоторое притупление, что снижает удельное контактное давление на задней поверхности и уменьшает интенсивность износа. При использовании же обычного резца вступающие в работу новые точки режущей кромки не имеют притупления и изнашиваются так же интенсивно, как главная режущая кромка в период начального износа.

Таким образом, фаска на задней поверхности резца, выполненная по всему периметру режущей кромки, при чистовой обработке

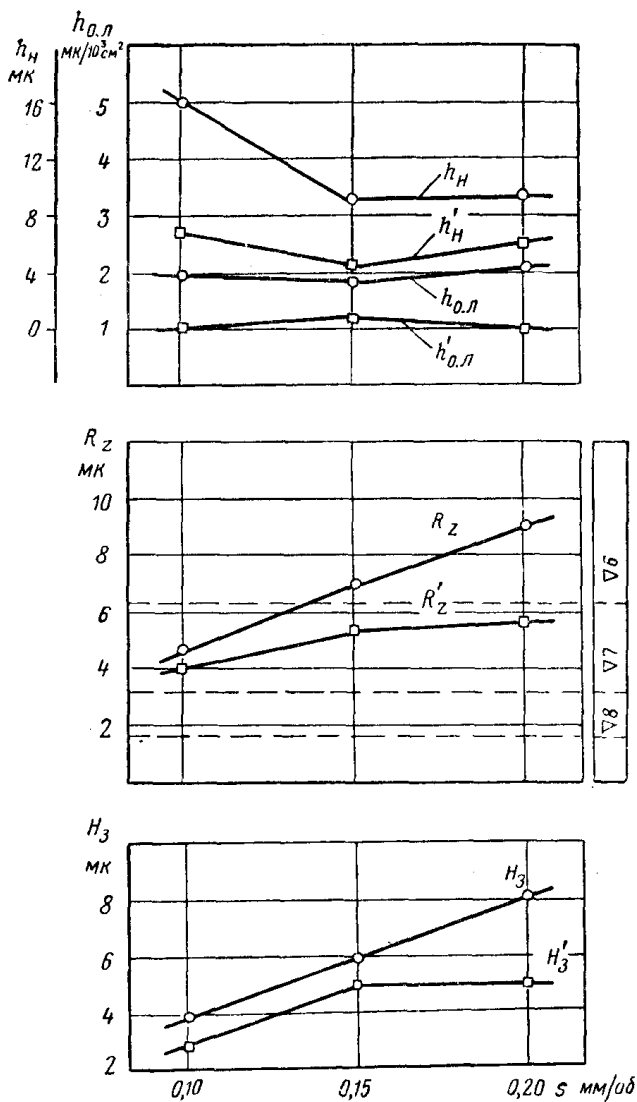


Рис. 97. Сравнение начального и относительного износа, высоты неровностей и глубины зазубрин на поверхности износа резцов в зависимости от подачи

○ — резцы без фаски; □ — резцы с фаской

Износ резцов Т30К4 без фаски и с фаской на различных подачах
(сталь 18ХНВА; $\alpha = 18^\circ$; $t = 0,25$ мм; $v = 200$ м/мин; $l_n = 2000$ м;
 $l = 10\,000$ м)

Подача s мм/об	Начальный радиальный износ в мк		Отно- шение $\frac{h'_n}{h_n}$ %	Относитель- ный износ в мк/мм		Отно- шение $\frac{h'_{o.l}}{h_{o.l}}$ %	Конечный радиальный износ в мк		Отно- шение $\frac{h'_r}{h_r}$ %
	без фаски h_n	с фас- кой h'_n		без фаски $h_{o.l}$	с фас- кой $h'_{o.l}$		без фаски h_r	с фас- кой h'_r	
0,10	16	7	44	2	1,06	53	32	15,5	48
0,15	9	4	44	1,81	1,25	69	23,5	14	59
0,20	9,5	6	63	2,06	1,0	48	26	14	54

машиноподелочных сталей на различных скоростях резания и подачах является важным средством повышения размерной стойкости инструмента.

4. Влияние ширины нулевой фаски на интенсивность радиального износа и период стойкости резца

Оптимальная ширина нулевой фаски на задней поверхности устанавливалась также при точении стали 1Х18Н9Т резцами Т15К6.

Такой оптимальной шириной фаски, обеспечивающей наименьшую величину относительного износа и максимальный период стойкости, оказалась фаска $f_3 = 0,10$ мм (табл. 25). Интенсивность размерного износа при этом уменьшилась примерно в два раза, а период стойкости повысился в полтора раза по сравнению с резцом без фаски. При $f_3 = 0,20 \div 0,30$ мм также наблюдалось снижение интенсивности размерного износа, но период стойкости при принятом критерии затупления ($h_3 = 0,50$ мм) остался таким же, как и для резца без фаски.

И здесь исследовалось влияние фаски на начальный радиальный износ, величину относительного износа и период стойкости при работе с различными скоростями резания и подачами (табл. 26). При работе на всех подачах в исследованном диапазоне их изменения резец с фаской дает в 2—4 раза меньшую величину начального износа, в 1,5—2 раза меньшую величину относительного износа и более высокий период стойкости по сравнению с резцом без фаски.

Лишь при работе на сравнительно низкой скорости резания 120 м/мин, соответствующей зоне адгезионного износа, резец с фаской показал более низкий период стойкости по сравнению с резцом без фаски.

Таблица 25

Износ резца Т15К6 и период его стойкости при различной ширине фаски

(сталь 1Х18Н9Т $l_n = 500$ мм; $v = 150$ м/мин; $s = 0,12$ мм/об; $t = 0,25$ мм; критерий затупления — $h_3 = 0,50$ мм; $\varphi = 60^\circ$; $\varphi_1 = 30^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $r = 0,3$ мм)

Ширина фаски f_3 мм	Начальный радиальный износ		Относительный линейный износ		Стойкость резца	
	h_n мк	%	$h_{o,l}$ мк/мм	%	T мин	%
0	12	100	15,3	100	16,7	100
0,10	5	41,5	8,5	55,5	25	150
0,15	4	33,3	11,5	75	23,3	140
0,20	5	41,5	11,5	75	16,7	100
0,30	5	41,5	9,5	62	16,7	100

Таблица 26

Износ резца Т15К6 без фаски и с фаской и период его стойкости

(сталь 1Х18Н9Т $t = 0,25$ мм; $l_n = 500$ мм; критерий затупления — $h_3 = 0,40$ мм; фаска $f_3 = 0,10$ мм)

Скорость резания v м/мин	Подача s мм/об	Начальный радиальный износ в мк		Отно- шение $\frac{h_n}{h_n}$ $\frac{h_n}{\%}$	Относитель- ный линейный износ в мк/10 ³ м		Отно- шение $\frac{h_{o.l}}{h_{o.l}}$ $\frac{h_{o.l}}{\%}$	Стойкость резца в мин		Отно- шение $\frac{T}{T}$ $\frac{T}{\%}$
		без фаски h_n	с фас- кой h_n		без фаски $h_{o.l}$	с фас- кой $h_{o.l}$		без фаски T	с фас- кой T'	
180	0,12	16	9	56	10,0	7,3	52	13,9	22,2	160
150	0,12	12	5	41,5	15,3	8,5	55,5	11,0	16,7	152
120	0,12	18	4	22	17,0	9	53	11,6	10,15	88
150	0,08	20	8	40	14	10,5	75	13,3	14,1	106
150	0,12	12	5	41,5	15,3	8,5	56,5	11,0	16,7	152
150	0,16	15	4	26,6	18	12	66	11,65	16,7	143

Снижение интенсивности износа резца с фаской А. Н. Резников [78] объясняет тем, что фаска шириной 0,10—0,15 мм повышает теплоотвод из инструмента в изделие.

5. Влияние фаски на чистоту обработанной поверхности

Наряду с размерной стойкостью резцов с фаской исследовалась также чистота обработанных поверхностей. Сравнение влияния нулевой фаски в зависимости от длины пути резания на радиальный износ и на чистоту поверхности при различных подачах и скоростях проводилось при точении стали 18ХНВА резцами Т30К4 с фаской и без фаски (рис. 98—100). Условия испытаний: $s=0,10$ мм/об; $t=0,25$ мм; $f_z=0,10$ мм. Глубина зазубрин, шаг которых равен подаче, измерялась на двойном микроскопе Линника.

Из графиков видно, что нулевая фаска на задней поверхности не только уменьшает радиальный износ резца, но и повышает чистоту обработанной поверхности на всей длине пути резания.

Причина этого становится ясной из наблюдения за поверхностью износа задней грани. Вид поверхностей износа на рис. 101 получен путем зарисовки с помощью отсчетного микроскопа МИР-1 и рисовального аппарата. Как видно, глубина зазубрин на поверхности износа вспомогательной задней грани, которая окончательно формирует профиль обработанной поверхности, у резцов с фаской значительно меньше, чем у резцов без фаски. Этот же результат получен и путем непосредственного измерения глубины зазубрин на поверхности износа резца (табл. 27). Как известно [29], [56], с появлением первых зазубрин на участке режущей кром-

Таблица 27

**Высота неровностей обработанной поверхности
и глубина зазубрин на поверхности износа задней грани
резцов с фаской и без фаски**
(сталь 18ХНВА, резец Т30К4; $t=0,25$ мм; $\alpha=18^\circ$; $l=10\,000$ м)

Скорость резания v м/мин	Подача s мм/об	Глубина зазубрин в мк		Отноше- ние H'_z/H_z %	Высота неровнос- тей в мк		Отноше- ние R'_z/R_z %
		резцы без фаски H_z	резцы с фаской H'_z		резцы без фаски R_z	резцы с фаской R'_z	
75	0,10	4,15	4,15	100	4,75	4,29	90
100	0,10	5,37	3,66	68	5,57	4,6	82
150	0,10	3,42	3,17	93	4,88	2,93	60
200	0,10	3,9	2,93	75	4,58	4,15	90
250	0,10	4,63	2,69	58	4,93	4,24	86
300	0,10	4,63	4,88	105	4,73	4,58	97
200	0,15	5,86	5,13	87	6,98	5,9	84
200	0,20	8,05	4,9	61	9,07	5,65	62

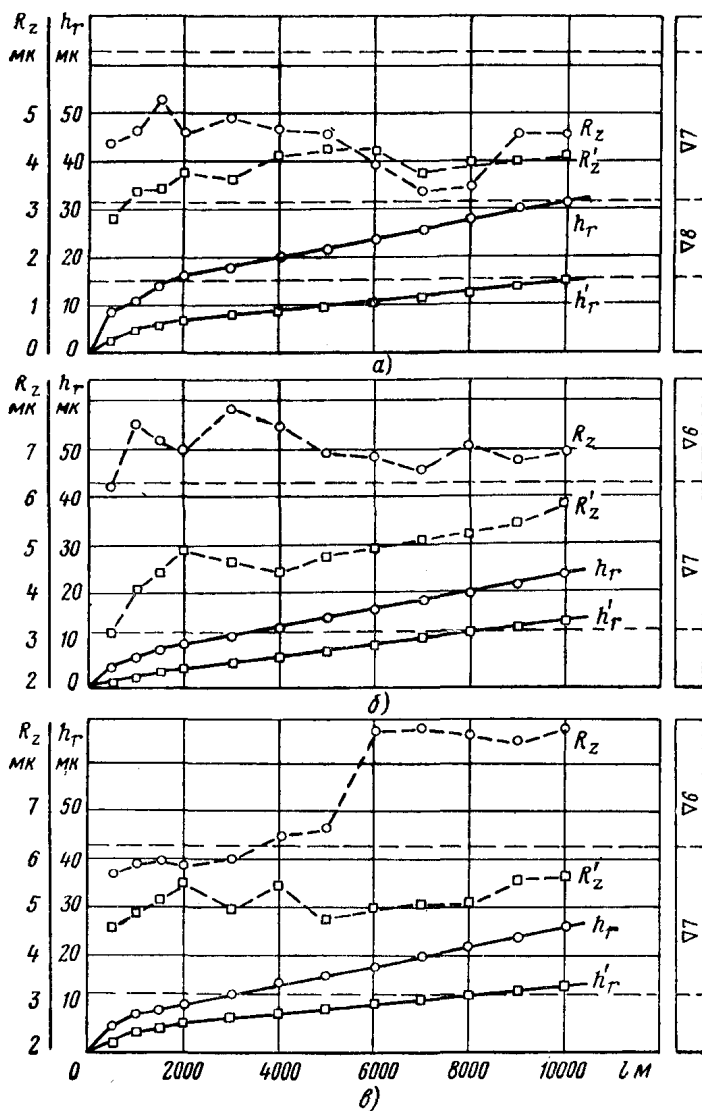


Рис. 98. Сравнение высоты неровностей и радиального износа Т30К4 в зависимости от длины пути резания при точении (сталь 18ХНВА, резец Т30К4):

$a-s=0,10$ мм/об; б- $s=0,15$ мм/об; в- $s=0,20$ мм/об;
 ○—резцы без фаски; □—резцы с фаской

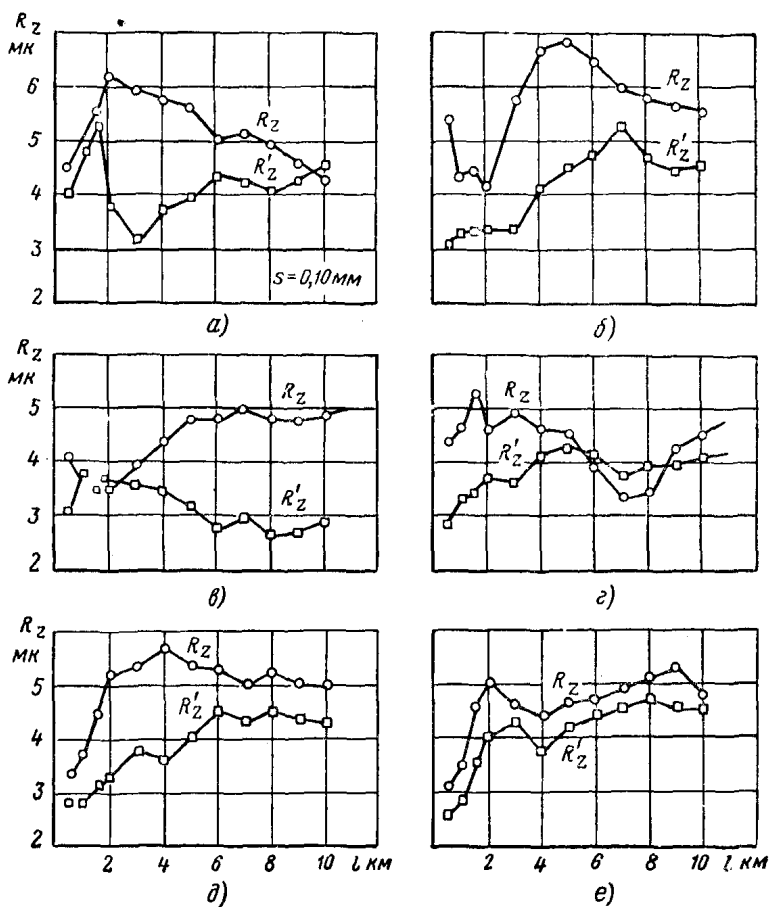


Рис. 99. Сравнение высоты неровностей обработанной поверхности в зависимости от длины пути резания при точении стали 18ХНВА при различных скоростях резания ($t=0,25$ мм ; $s=0,10$ мм/об):

а— $v=75$ м/мин ; б— $v=100$ м/мин ; в— $v=150$ м/мин ; г— $v=200$ м/мин ;
 д— $v=250$ м/мин ; е— $v=300$ м/мин ;
 ○—резцы без фаски; □—резцы с фаской

ки величина и форма остаточных неровностей на обработанной поверхности находятся в прямой зависимости от глубины и формы зазубрин. Для того чтобы показать, что здесь все дело именно в глубине зазубрин, достаточно рассмотреть зависимость ширины фаски износа резца по задней поверхности h_3 от длины пути резания для резцов без фаски и с фаской (рис. 102). В целом достаточно обосно-

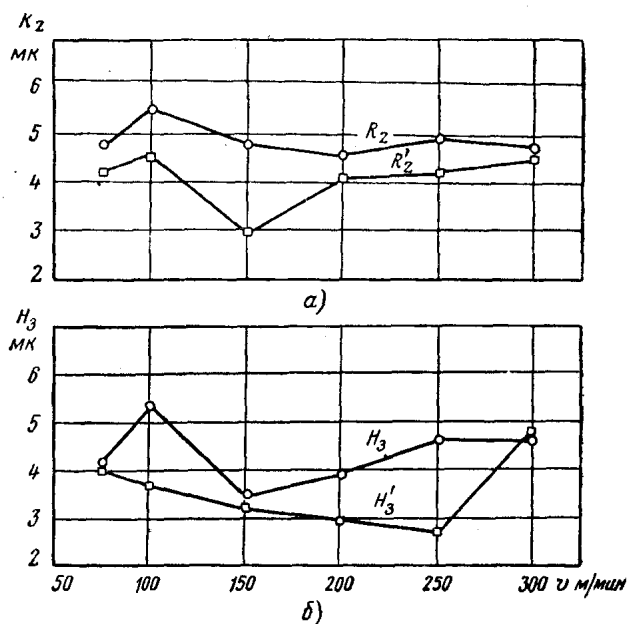


Рис. 100. Сравнение высоты неровностей обработанной поверхности и глубины зазубрин на поверхности износа задней грани в зависимости от скорости резания при точении стали 18ХНВА ($t=0,25$ мм; $s=0,10$ мм/об)

○—резцы без фаски; □—резцы с фаской

ванно можно считать, что с ростом h_3 высота неровностей возрастает (см. рис. 99). Однако, несмотря на то, что $h'_3 > h_3$, резец с фаской дает лучшую чистоту обработанной поверхности. Из этого вытекает, что глубина зазубрин на поверхности износа резца со стороны задних граней является главным фактором, определяющим высоту неровностей обработанной поверхности. А так как нулевая фаска замедляет образование зазубрин, то такой резец обеспечивает получение более чистых обработанных поверхностей. При работе резцом без фаски уже на подаче $0,15$ мм/об чистота поверхности получается в пределах 6-го класса, а 7-ой класс получается только при $s < 0,10$ мм/об. При работе же резцом с фаской на задней грани даже при подаче $0,20$ мм/об можно на всей длине пути резания надежно получать чистоту поверхности в пределах 7-го

класса. Величины отношений H'_3/H_3 и R'_2/R_2 минимальны в зоне оптимальных по относительному износу скоростей резания. Иными словами, эффективность фаски как средства повышения чистоты

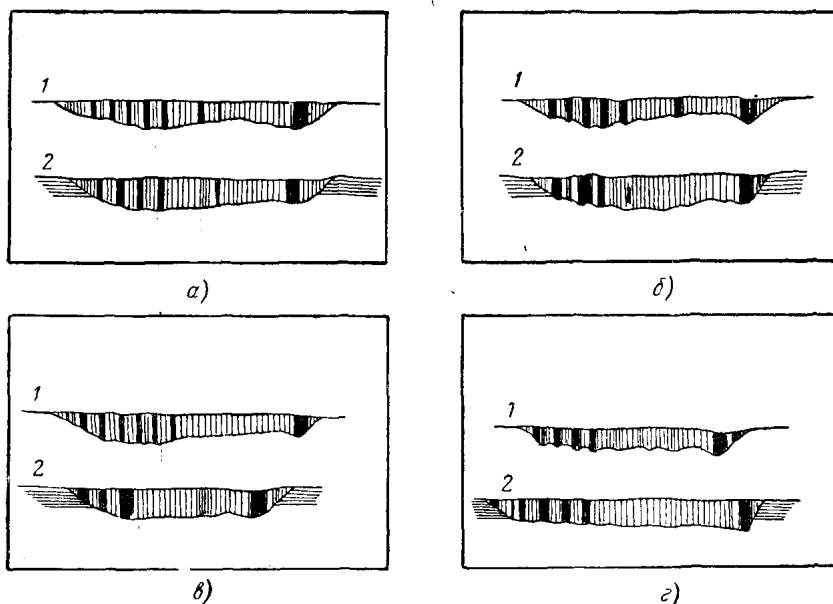


Рис. 101. Вид резцов Т30К4 по задней поверхности при точении стали 18ХНВА на различных скоростях резания:

а— $v=100$ м/мин; б— $v=150$ м/мин; в— $v=200$ м/мин; г— $v=250$ м/мин;
1—резец без фаски; 2—резец с фаской

обработки тем выше, чем ближе скорость резания к оптимальной. Таким образом, фаска на задней грани является не только важным средством повышения размерной стойкости резцов, но также средством повышения чистоты и производительности обработки, ибо при обеспечении заданной чистоты создается возможность работать на более высоких подачах [59].

6. Основные выводы

1. Для повышения размерной и общей стойкости резцов и чистоты обработки, что особенно важно в автоматизированном производстве, рекомендуется на резцах делать фаску с задним углом $\alpha=0$ вдоль всего режущего лезвия.

Фаска на задней грани укрепляет режущую кромку, замедляет образование зазубрин на поверхности износа, снижает удельное контактное давление на задней грани, снижает интенсивность радиального износа и высоту неровностей обработанной поверхности.

2. Как уменьшение, так и увеличение ширины фаски за пределы оптимальных значений приводит к росту интенсивности начального

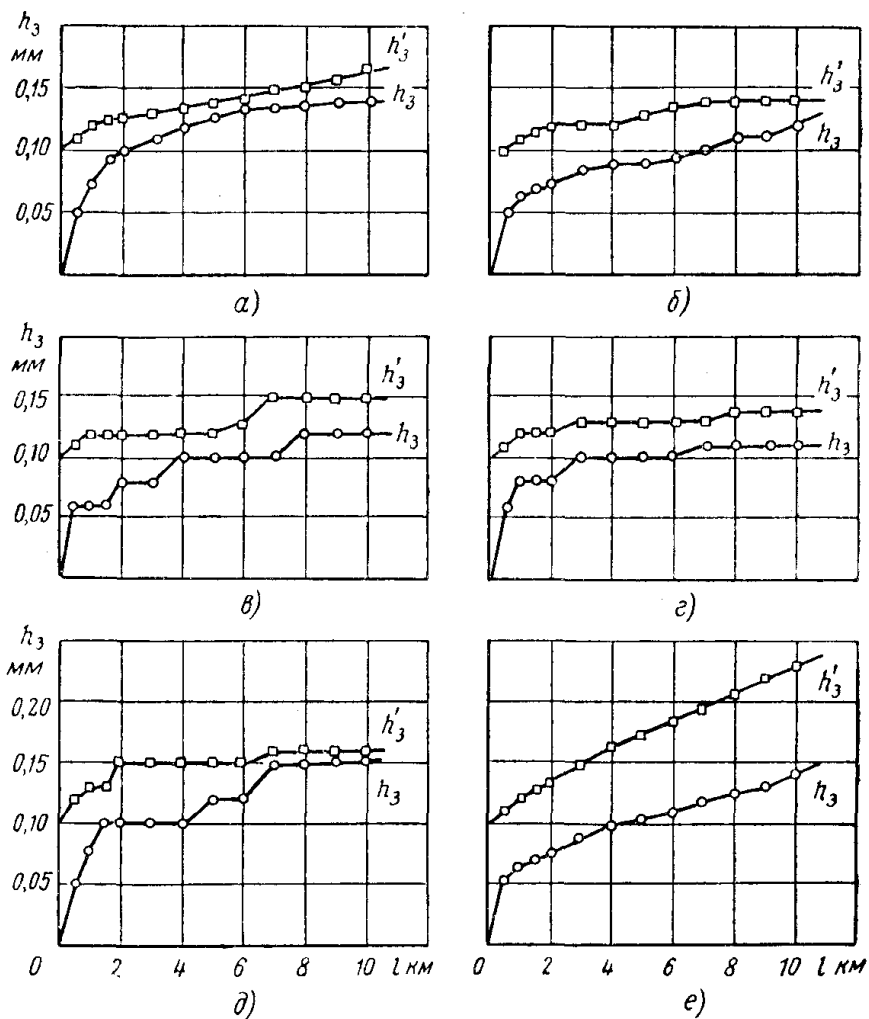


Рис. 102. Сравнение износа резцов Т30К4 по задней поверхности в зависимости от длины пути резания при точении стали 18ХНВА при различных скоростях резания:

а— $v=75$ м/мин; б— $v=100$ м/мин; в— $v=150$ м/мин; г— $v=200$ м/мин;
 д— $v=250$ м/мин; е— $v=300$ м/мин;
 ○ —резцы без фаски; □ —резцы с фаской

и относительного износа, снижению размерной стойкости и повышению высоты неровностей обработанной поверхности.

3. Чем ближе скорость резания лежит к оптимальной, тем в большей степени фаска повышает размерную стойкость и чистоту обработки и наоборот.

4. Как для резцов без фаски, так и для резцов с фаской главным фактором, определяющим высоту микронеровностей обработанной поверхности, является глубина зазубрин на поверхности износа резца со стороны задних поверхностей.

5. В тех случаях, когда фаска оказывает наибольшее влияние на снижение интенсивности радиального износа (при изменении ширины фаски, скорости резания и др.), она приводит также к наибольшему снижению и высоты неровностей обработанной поверхности и наоборот.

Широкое применение резцов с фаской по задней грани в промышленности будет способствовать повышению производительности труда и точности обработки и повышению экономической эффективности автоматизации обработки металлов резанием.



Глава VIII

РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС РАСТОЧНЫХ РЕЗЦОВ

1. Прибор для измерения радиального износа и температурной деформации расточных резцов

Отношение радиального износа к ширине фаски износа при различных сочетаниях t , s , v и строгом сохранении постоянства геометрии резца не остается постоянной величиной.

Следовательно, различного рода формулы для определения радиального износа, полученные на основе расчетов и геометрических построений, могут привести к погрешности в определении радиального износа, достигающей 100—200%. Поэтому радиальный износ расточных резцов, так же как и радиальный износ проходных резцов для наружного точения, должен определяться непосредственным измерением.

Для измерения радиального износа расточных резцов был создан прибор [68]. Прибор (рис. 103) состоит из корпуса 10, к которому винтами 11 прикреплены кронштейны 5, через которые проходит ось 9; вокруг оси может поворачиваться планка 17. К последней винтами 4 крепится втулка 8, в отверстии которой по скользящей посадке расположен толкатель 7. Втулка 8 с толкателем 7 может свободно перемещаться вдоль планки 17 и закрепляться в положении, соответствующем вылету расточного резца. Один конец толкателя 7 упирается в вершину резца, а другой — в измерительный наконечник ортотеста или миниметра 19.

Головка ортотеста закреплена винтом 12 в хомуте 13, который может перемещаться параллельно оси шпинделя станка по пазу планки 18 и фиксироваться в нужном положении гайкой 6. Планка 18, в свою очередь, может перемещаться вдоль оси прибора по пазу корпуса 10 и также фиксироваться в требуемом положении гайкой 6. Винт 16 и лыска на толкателе предотвращают поворот последнего и исключают тем самым влияние возможного биения торца толкателя на результаты измерения.

Прибор крепится на резцедержателе токарного станка с помощью гаек 1, накрунутых на болты 2 резцедержателя. После

закрепления резца и прибора на резцедержателе станка головку ортотеста настраивают на нуль и также закрепляют. Перед расточкой планку 17 поворачивают вверх. По окончании расточки резец выводят из отверстия и, опустив планку 17 до упора винта 15 в корпус 10, производят по шкале ортотеста отсчет N_1 , а затем, после

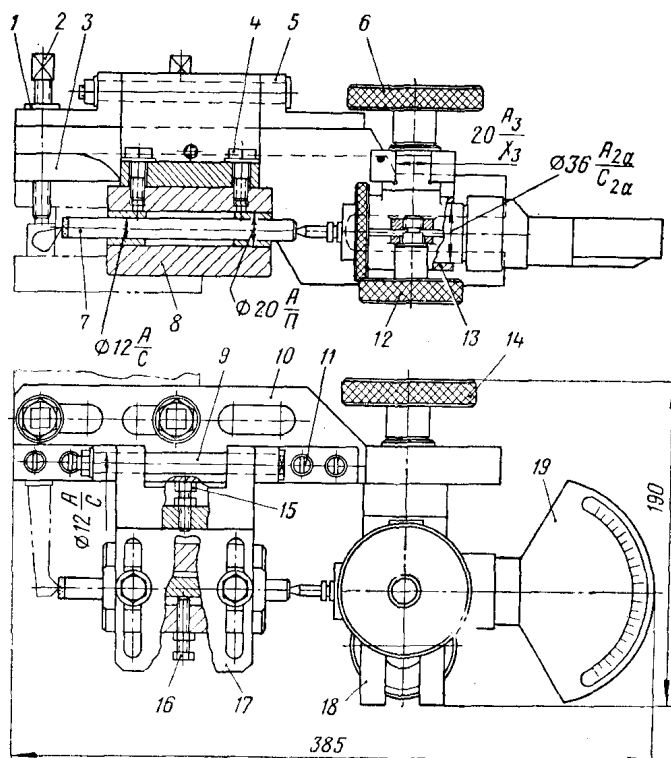


Рис. 103. Прибор для измерения радиального износа и температурной деформации расточных резцов

охлаждения резца, второй отсчет N_2 . Разность отсчетов $N_1 - N_2$ представляет собой температурное удлинение резца; отсчет N_2 — радиальный износ резца.

Длительная эксплуатация прибора показала его надежные эксплуатационные качества и простоту применения.

2. Влияние скорости резания и подачи на размерный износ расточного резца

Влияние скорости резания и подачи на размерный износ расточного резца исследовалось при растачивании стали 1Х18Н9Т. Образцы имели форму колец с наружным диаметром 50 мм и высотой 50 мм при внутреннем диаметре в пределах 20—24 мм.

Резцы, оснащенные твердым сплавом ВК6, имели следующую геометрию: $\gamma=10^\circ$; $\alpha=\alpha_1=15^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$; $\lambda=0$; $r=0,5$ мм. Режим резания: $t=0,30$ мм; $s=0,06\div 0,12$ мм/об; $v=15\div 138$ м/мин. Температура в зоне резания измерялась с помощью естественной термопары «резец—изделие». С целью снижения погрешностей измерения температуры резания (термоэлектродвижущая сила)

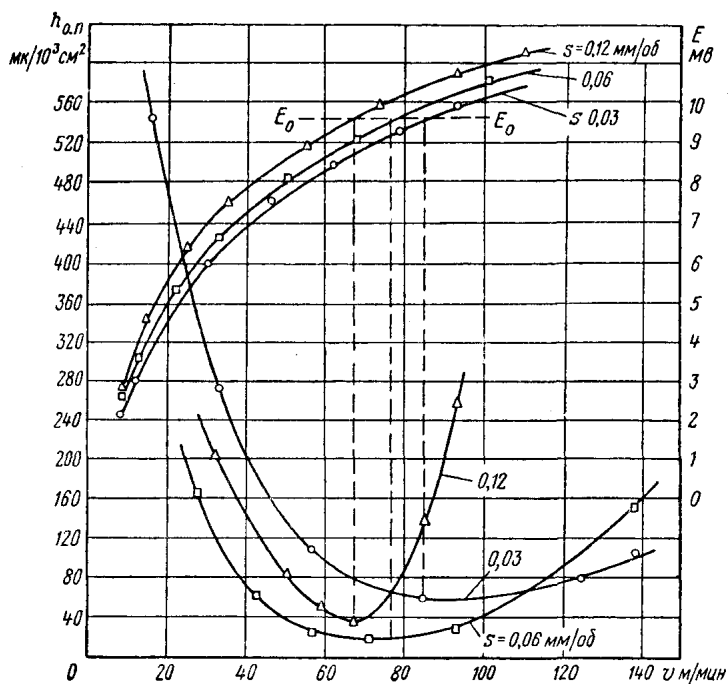


Рис. 104. Влияние скорости резания на величину т. э. д. с. и поверхностный относительный износ при растачивании.

Сталь 1Х18Н9Т, резец ВК6 ($d=20\text{--}24$ мм, $f=922$ н/мм, $t=0,30$ мм)

измерялись при обработке одной заготовки и одной и той же пластинкой твердого сплава. Исследования показали, что при растачивании стали 1Х18Н9Т [69], [70] и жаропрочного сплава ЭИ437А точки минимума кривых $h_{0,п}=f(v)$ (рис. 104—105) для разных подач наблюдаются при различных скоростях резания. Чем больше величина подачи, тем при меньшей скорости резания $h_{0,п}$ имеет минимальное значение.

Весьма примечательным является то, что так же как и при точении точкам минимума кривых $h_{0,п}=f(v)$, полученных при растачивании с различными подачами, соответствует одна и та же оптимальная температура резания.

Зависимость радиального износа от длины пути резания $h_r=f(l)$ так же как и при точении носит линейный характер (рис. 106). Следовательно, оптимальная скорость резания v_0 и величина оптималь-

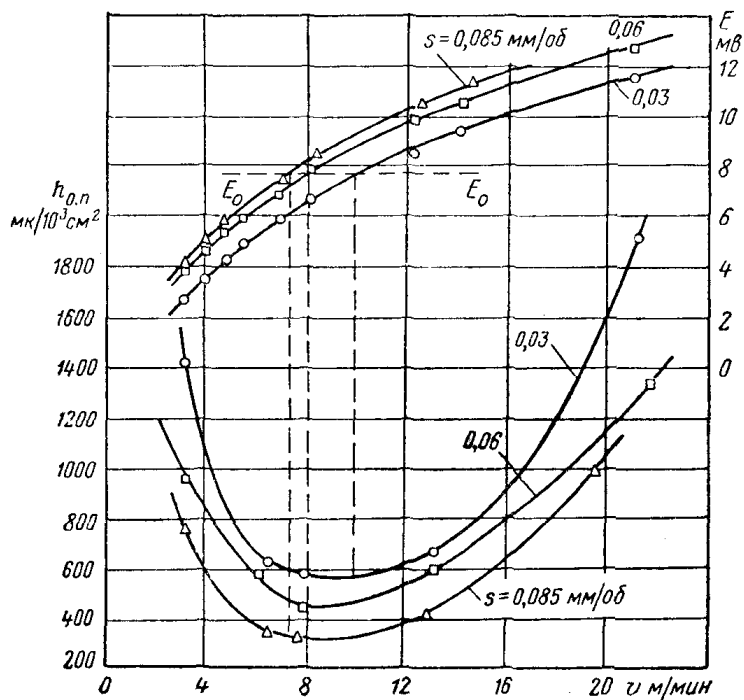


Рис. 105. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при растачивании.

Жаропрочный сплав ЭИ437А, резец ВК8 ($t=0.20$ мм, $d=13-15$ мм; $\gamma=0$, $\alpha=18^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\phi_1=10^\circ$, $r=0.2$ мм)

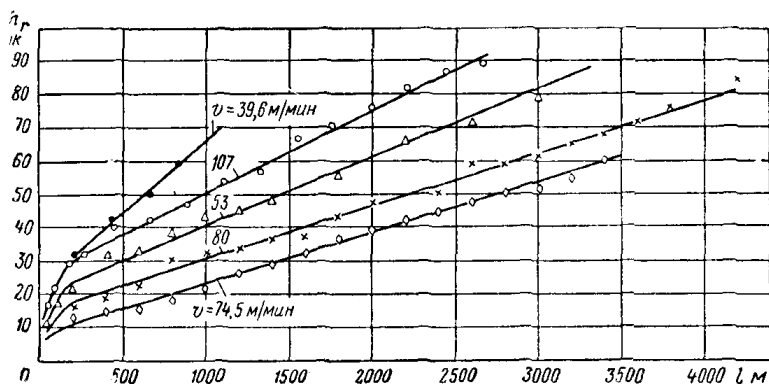


Рис. 106. Влияние длины пути резания на размерный износ при растачивании.

Сталь 1Х18Н9Т, резец ВК8 ($t=0.30$ мм, $s=0.06$ мм/об, $d=17$ мм)

ного поверхностного относительного износа $h_{o.п.o}$ не зависят от абсолютной величины радиального износа резца h_r , принимаемой в качестве критерия затупления.

Влияние скорости резания на величину $h_{o.п}$ резца ВК8 при растачивании стали 1Х18Н9Т при трех значениях h_r приведено на рис. 107. Каждому значению h_r соответствует одна и та же величина оптимальной скорости резания ($v_o = 74,5$ м/мин), а абсолютные величины $h_{o.п}$ при различных значениях практически совпадают.

Вместе с тем, каждому значению h_r соответствует свое значение скорости резания v_T (рис. 108). Например, для периода стойкости $T = 20$ мин получились следующие значения скорости резания v_T :

h_r в мк	40	60	80
v_{20} в м/мин	80	95	108

Независимость величин v_o и $h_{o.п}$ от критерия затупления позволяет резко сократить продолжительность опытов при установлении рациональных режимов резания при растачивании, так как здесь отпадает необходимость проведения стойкостных опытов до полного затупления инструмента.

3. Зависимость общей и размерной стойкости резца от диаметра расточки

Известно [96], что диаметр обработки оказывает значительное влияние на силы резания, особенно при малых сечениях среза. Уменьшение диаметра при расточке отверстий приводит к росту сил резания. Наиболее интенсивный рост сил наблюдается в области малых диаметров расточки.

Повышение усилий резания при уменьшении диаметра расточки связано с увеличением длины условной плоскости сдвига и повышением усадки стружки. Чем меньше диаметр расточки, тем (при $v = \text{const}$) больше усадка стружки и больше удельная работа стружкообразования и, следовательно, тем выше должна быть температура в зоне резания.

Изменение деформации срезаемого слоя и температуры резания при изменении диаметра расточки должно оказать влияние на стойкость [110] и интенсивность размерного износа резца. Экспериментальное исследование зависимости между диаметром растачиваемого отверстия и интенсивностью размерного износа резца проводилось на образцах из стали 1Х18Н9Т с внутренним диаметром 17; 26 и 37 мм. Режим резания: $t = 0,30$ мм; $s = 0,06$ мм/об; $v = 40 \div 164$ м/мин.

Продольная усадка стружки определялась путем измерения длины стружек, соответствующих одному обороту заготовки. За критерий затупления был принят $h_r = 50$ мк.

Влияние скорости резания на величину термоэлектродвижущей силы E , усадку стружки ξ и поверхностный относительный износ резца $h_{o.п}$ при растачивании отверстий различного диаметра характеризуют графики, приведенные на рис. 109, которые указывают на по-

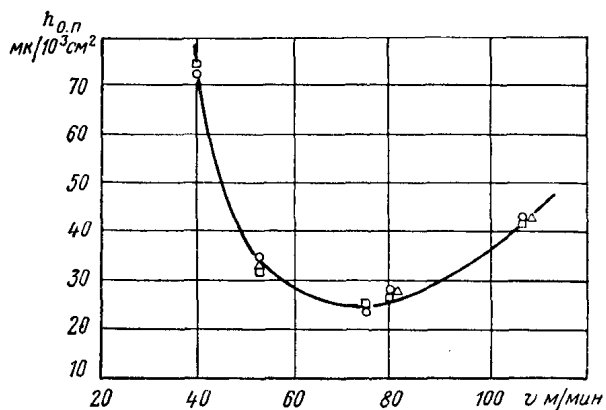


Рис. 107. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ расточного резца ВК8 при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления.

Сталь 1Х18Н9Т, $t=0,30$ мм, $s=0,06$ мм/об, $d=17$ мм;
 ○ — $h_r=40$ мкм; □ — $h_r=60$ мкм; △ — $h_r=80$ мкм.

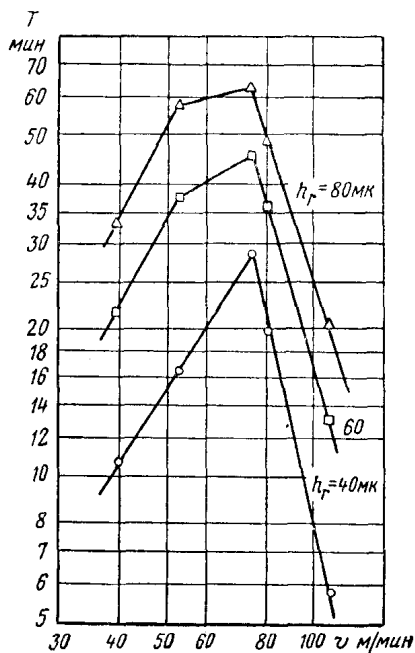


Рис. 108. Влияние скорости резания на период стойкости расточного резца ВК8 при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления.

Сталь 1Х18Н9Т; $t=0,30$ мм $s=0,06$ мм/об, $d=17$ мм

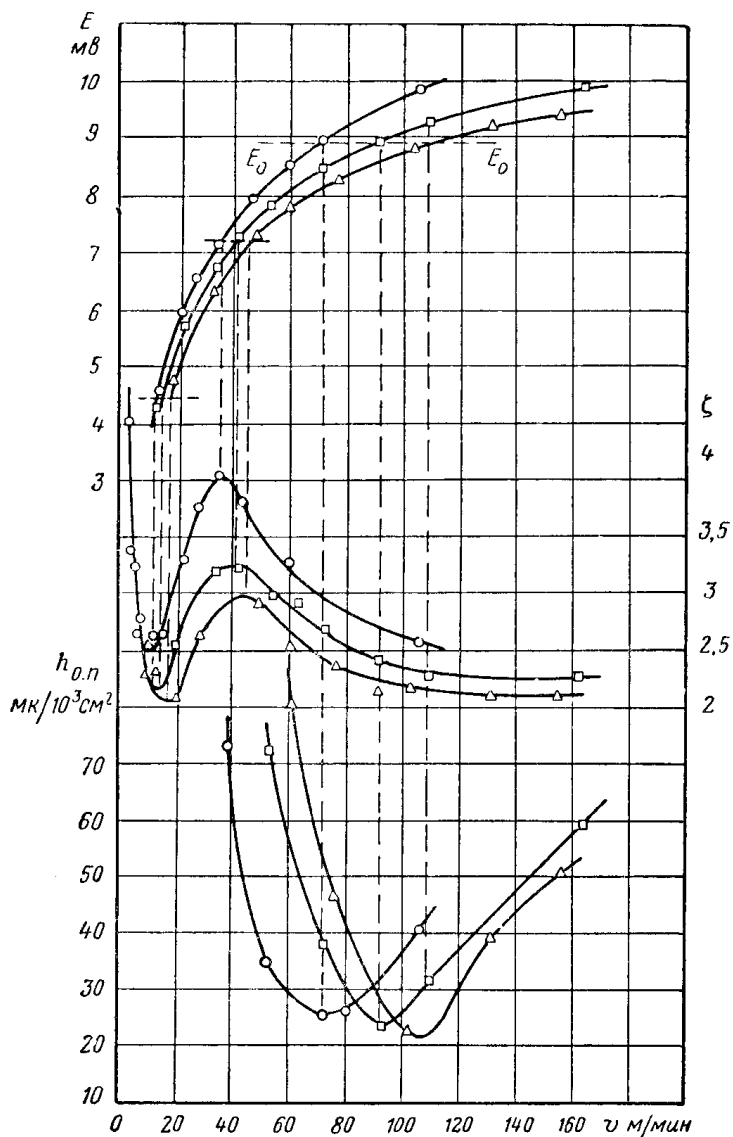


Рис. 109. Зависимость температуры в зоне резания (т. э. д. с.), усадки стружки и поверхностного относительного износа от скорости резания и диаметра расточки.

Сталь 1X18H9T, резец BK8; $t=0.30 \text{ мм}$; $s=0.06 \text{ мм/об.}$

○ — $d=17 \text{ мм}$; □ — $d=26 \text{ мм}$; △ — $d=37 \text{ мм}$

стоянство температуры резания при минимумах и максимумах усадки стружки и минимумах относительного износа для различных диаметров растачиваемого отверстия. Следовательно, максимальное развитие нароста и его вырождение определяется температурой резания [25], [69], [70].

Минимум интенсивности размерного износа при расточке отверстий различного диаметра наблюдается при различных оптимальных скоростях резания, но при постоянной оптимальной температуре θ_o .

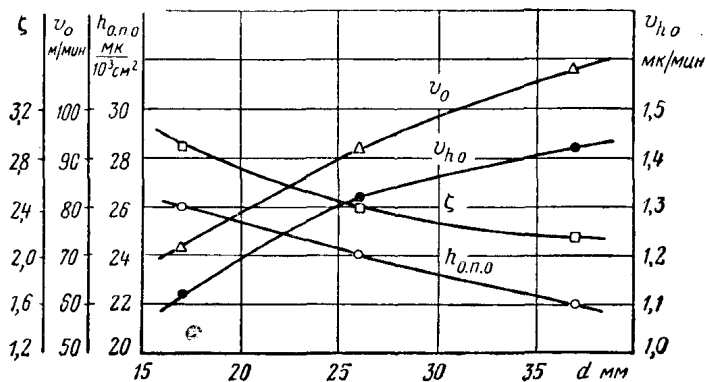


Рис. 110. Влияние диаметра растачиваемого отверстия на оптимальный поверхностный относительный износ, скорость размерного износа, оптимальную скорость резания и величину усадки стружки при постоянной оптимальной температуре резания

Установленное ранее положение о постоянстве оптимальной температуры резания для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{o.п.} = f(v)$, полученных при работе на различных подачах, подтверждено в данном исследовании при растачивании отверстий различного диаметра.

При сохранении $\theta_o = \text{const}$ с увеличением диаметра растачиваемого отверстия повышается оптимальная скорость резания, снижаются усадка стружки и оптимальный поверхностный относительный износ (рис. 110).

Взаимосвязь между скоростью резания, величиной поверхностного относительного износа и диаметром отверстия при растачивании стали 1Х18Н9Т резцами, оснащенными твердым сплавом ВК8, при принятом сечении среза и сохранении $\theta_o = \text{const}$ может быть выражена параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости:

$$v_o = 16,6 \cdot d^{0,52} \text{ м/мин}; \quad (57)$$

$$h_{o.п.о.} = \frac{48,8}{d^{0,22}} \text{ мкм/} 10^3 \text{ см}^2. \quad (58)$$

Для каждого диаметра растачиваемого отверстия по этим уравнениям можно определить оптимальную скорость резания и оптимальную величину поверхностного относительного износа. При работе на скоростях резания, удовлетворяющих уравнению (57), обеспечивается минимальная величина поверхностного относительного износа, определяемая по уравнению (58), максимальная размерная стойкость инструмента и точность обработки.

Повышение интенсивности износа резца при уменьшении диаметра растачиваемого отверстия и сохранении $\eta_o = \text{const}$, по-видимому, связано с увеличением степени деформации срезаемого слоя. Так, зависимость усадки стружки от диаметра растачиваемого отверстия при $\theta_o = \text{const}$ может быть выражена формулой

$$\zeta = \frac{9}{d^{0,40}}. \quad (59)$$

Зависимость между скоростью размерного износа v_h , периодом общей стойкости T , размерной стойкостью T_p и диаметром растачиваемого отверстия d при $\theta_o = \text{const}$ может быть выражена следующими формулами:

$$v_h = 0,486 \cdot d^{0,30} \text{ мк/мин}; \quad (60)$$

$$T = \frac{h_r}{v_h} = \frac{2,06 h_r}{d^{0,30}} \text{ мин}; \quad (61)$$

$$T_p = \frac{h_r}{h_{o.p.o}} = 205 h_r d^{0,22} \text{ см}^2. \quad (62)$$

При повышении диаметра расточки и $\theta_o = \text{const}$ период стойкости снижается (повышается скорость размерного износа), а размерная стойкость резца повышается. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что обработка отверстий большего диаметра при $\theta_o = \text{const}$ будет производиться на более высокой скорости резания и за меньший период стойкости резец обработает большую поверхность.

На рис. 110 приведены кривые $h_{o.p.o}$ и v_h , они являются более универсальными по сравнению с T_p и T характеристиками процесса резания (не зависят от величины h_r), хотя и менее привычны.

Исследования показали (рис. 111), что при работе на сравнительно низких скоростях резания ($v = 72 \text{ м/мин}$) повышение диаметра растачиваемого отверстия приводит к значительному повышению интенсивности размерного износа резца. Так, повышение диаметра растачиваемого отверстия от 17 до 37 мм привело к повышению поверхностного относительного износа почти в два раза (от 25 до 46 мк/10³ см²).

Это произошло потому, что температура резания при $v = 72 \text{ м/мин}$ для $d = 37 \text{ мм}$ оказалась ниже оптимальной.

В случае работы на средних скоростях резания ($v = 92 \text{ м/мин}$) при повышении диаметра растачиваемого отверстия поверхностный

относительный износ сначала снижается (так как снижается температура резания, которая превышает оптимальную температуру), а затем, достигнув минимума, начинает возрастать (так как температура резания перешла через оптимальное значение).

При $v=110$ м/мин при увеличении диаметра расточки $h_{o.п}$ монотонно снижается.

Из этого следует, что влияние диаметра растачиваемого отвер-

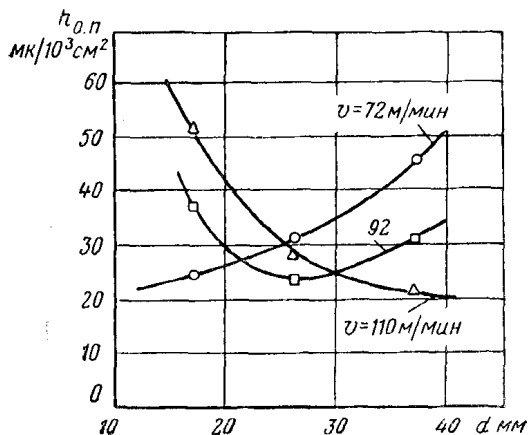


Рис. 111. Влияние диаметра растачиваемого отверстия на поверхностный относительный износ резца ВК8 ($t=0,30$ мм; $s=0,06$ мм/об)

стия на изменение относительного износа нельзя рассматривать без учета уровня применяемых скоростей, а следовательно, и температур резания. Повышение диаметра растачиваемого отверстия может приводить к монотонному повышению $h_{o.п}$, к экстремальной зависимости $h_{o.п}=f(d)$ и, наконец, монотонному снижению $h_{o.п}$. Характер функции $h_{o.п}=f(d)$ зависит от уровня скоростей резания и определяется снижением температуры резания, сопровождающим повышение диаметра расточки d .

Установление оптимальных скоростей резания для расточки отверстий различного диаметра является важным резервом повышения точности обработки, снижения расхода инструмента и повышения экономической эффективности автоматизации процессов обработки и внедрения групповых технологических процессов.

Обработка отверстий различного диаметра на постоянной скорости резания, являющейся оптимальной для какого-то одного диаметра, может привести к значительным потерям в размерной стойкости инструмента и производительности обработки. Так, например, если отверстие диаметром 37 мм растачивать на $v=72$ м/мин, оптимальной для отверстий диаметром 17 мм, то размерная стойкость инструмента снизится в 2,36 раза, а производительность обработки — в 1,5 раза по сравнению с работой на $v=108$ м/мин, оптимальной для диаметра отверстия 37 мм. Так как оптимальная скорость размерного износа при расточке отверстий различного диаметра больше экномической скорости размерного износа ($v_{h.o} > v_{h.o} = 1$ мк/мин), то скорости резания, являющиеся оптимальными по размерной стойкости расточного резца, одновременно являются оптимальными и по себестоимости обработки. Как снижение, так и повышение скоростей резания по сравнению со скоро-

стями, соответствующими точками минимума кривых $h_{0,п}=f(v)$, приводит к повышению себестоимости обработки.

Положение о постоянстве оптимальной температуры резания для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{0,п}=f(v)$, полученных при расточке отверстий различного диаметра, может быть использовано для ускоренного определения оптимальных скоростей резания при расточке отверстий любого диаметра.

Для этого из точки минимума на кривой $h_{0,п}=f(v)$ для диаметра отверстия d_1 восстанавливают перпендикуляр до пересечения с соответствующей кривой $E=f(v)$ и определяют величину оптимальной температуры резания (оптимальной т. э. д. с. E_0).

Семейство кривых $E=f(v)$, полученных при расточке отверстий различного диаметра, пересекается горизонтальной прямой $E_0—E_0$, соответствующей оптимальной температуре резания (т. э. д. с.) для диаметра отверстия d_1 (см. рис. 109).

Скорости резания, соответствующие абсциссам точек пересечения прямой $E_0—E_0$ с кривыми $E=f(v)$, и будут оптимальными для соответствующих диаметров расточки.

Абсолютные величины $h_{0,п,0}$ при работе на оптимальных скоростях резания для различных диаметров обработки находятся экспериментально.

4. Влияние жесткости расточного резца на интенсивность его размерного износа

Известно, что любые мероприятия по увеличению жесткости и виброустойчивости системы СПИД способствуют повышению производительности обработки, так как, повышая жесткость, можно повысить и режимы резания, не опасаясь возникновения вибраций [41], [42].

Следует вместе с тем отметить, что вопрос о влиянии жесткости и виброустойчивости технологической системы на интенсивность износа режущего инструмента является мало изученным [43].

Если в ряде работ содержатся некоторые данные о влиянии жесткости на скорость резания v_{60} , то данные о влиянии жесткости на уровень оптимальных скоростей резания v_0 полностью отсутствуют.

При растачивании отверстий малого диаметра жесткость технологической системы определяется главным образом жесткостью расточного резца. Были поставлены специальные опыты [70] по определению влияния жесткости расточного резца, оснащенного пластинкой твердого сплава ВК6, на v_0 и $h_{0,п,0}$ при растачивании отверстий диаметром 20—24 мм в деталях из стали 1Х18Н9Т. Жесткость резца изменялась в пределах от 400 до 2000 н/мм за счет изменения вылета резца. Жесткость остальных звеньев системы СПИД оставалась неизменной.

Анализ графика рис. 112 показывает, что при жесткости расточных резцов 1325 и 2000 н/мм $h_{0,п,0}=\text{const}$ во всем диапазоне скоростей резания. Такая же интенсивность размерного износа получает-

ся на скоростях резания 27—93 м/мин при жесткости 922 н/мм. Лишь при $v=138$ м/мин расточной резец с жесткостью 922 н/мм показывает более высокую интенсивность размерного износа, чем при жесткости 1325 и 2000 н/мм.

На самой низкой скорости резания (27 м/мин) все резцы с жесткостью от 400 до 2000 н/мм показывают одну и ту же интенсив-

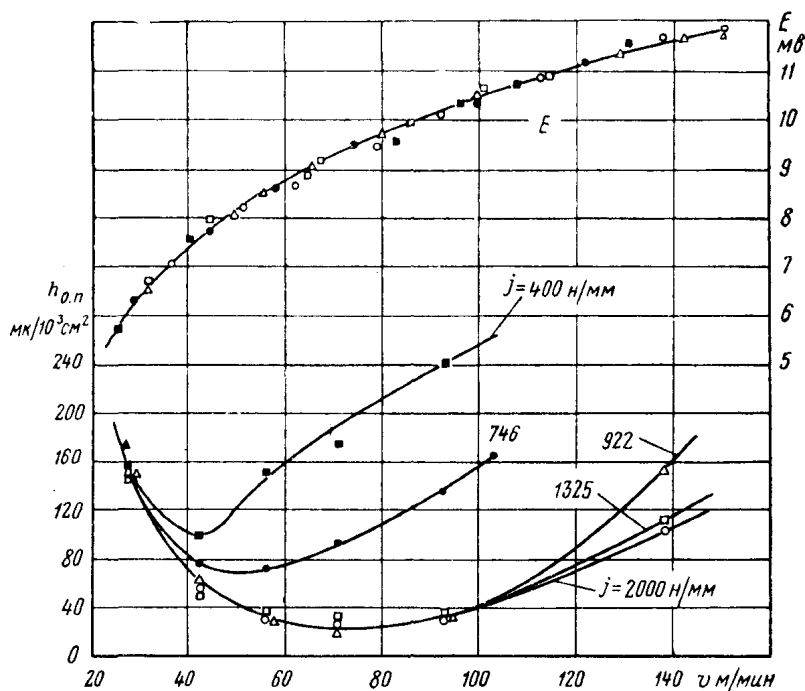


Рис. 112. Влияние скорости резания на величину термоэлектродвижущей силы и поверхностный относительный износ при различной жесткости расточного резца ВК6.

Сталь 1Х18Н9Т, $d=20-24$ мм; $t=0,30$ мм; $s=0,06$ мм/об

ность размерного износа (рис. 113), а на скоростях резания $v \geq 42$ м/мин интенсивность размерного износа расточных резцов с жесткостью 400 и 746 н/мм выше, чем резцов, жесткость которых $j \geq 922$ н/мм.

Жесткость расточного резца, после которой дальнейшее ее повышение не оказывает влияния на уровень v_0 и величину $v_{0,п.о.}$, назовем критической жесткостью j_k . Повышение жесткости инструмента выше критической, однако, является полезным тем, что при этом повышается точность обработки благодаря уменьшению упругих отжатию резца.

Применение расточных резцов с жесткостью ниже критической приводит к вибрациям резца, вызывающим повышение интенсивно-

сти размерного износа и снижение оптимальной скорости резания. При растачивании отверстий резцами с жесткостью 1325 и 2000 н/мм во всем диапазоне скоростей резания, с жесткостью 922 н/мм при скорости резания $v < 93$ м/мин, а также при работе с низкой скоростью резания ($v = 27$ м/мин) расточными резцами с любой жесткостью в исследованных пределах наблюдалось «спокойное» реза-

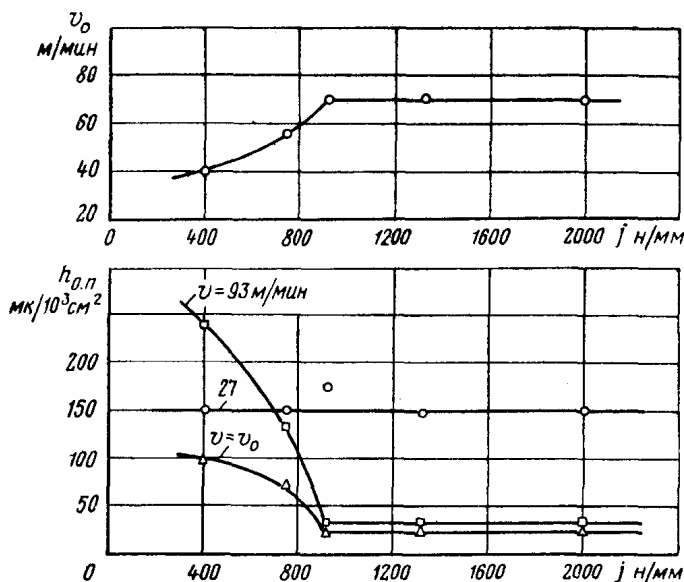


Рис. 113. Влияние жесткости расточного резца ВК6 на оптимальную скорость резания и поверхностный относительный износ.

Сталь 1Х18Н9Т; $t = 0,30$ мм, $s = 0,06$ мм/об, $d = 20-24$ мм

ние без видимых следов вибраций. Во всех остальных случаях на обработанной поверхности были видимы следы вибраций.

Так как изменение жесткости расточного резца на среднюю температуру контакта, измеренную методом естественной термопары, заметного влияния не оказывает (см. рис. 112), то уменьшение v_o и повышение величины $h_{o,п.0}$ при снижении жесткости расточного резца ниже критической следует отнести только за счет изменения амплитуды и частоты колебаний режущей кромки резца.

5. Влияние нулевой фаски на интенсивность размерного износа расточных резцов

Проблема повышения размерной стойкости расточных резцов является весьма актуальной, так как расточные резцы подвергаются более интенсивному износу по сравнению с проходными резцами для наружного точения. Ранее было установлено, что при наружном

точении различных материалов размерная стойкость резцов с фаской по задней поверхности вдоль всего режущего лезвия в 2 раза выше, чем резцов без фаски.

Специальные опыты, поставленные при растачивании заготовок из стали IX18H9T резцами ВК8 с фаской и без фаски, показывают, что и на расточных резцах фаска обеспечивает значительное повы-

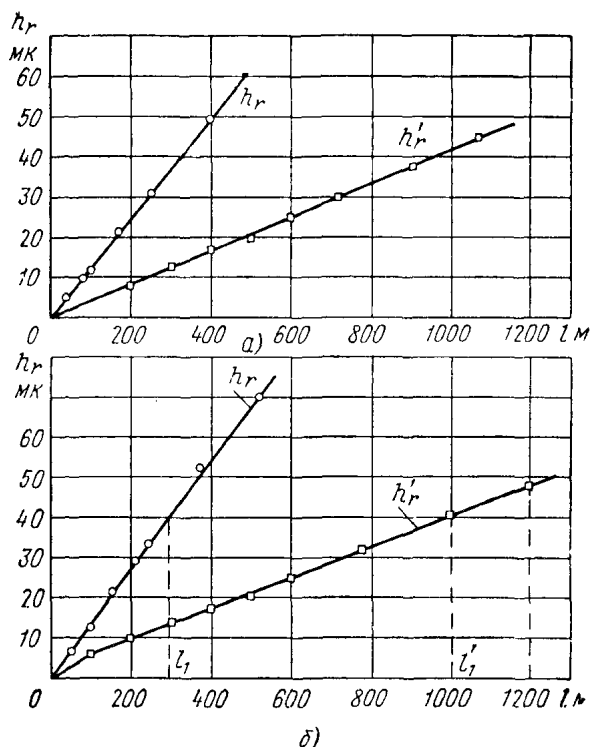


Рис. 114. Сравнение радиального износа в зависимости от длины пути резания при растачивании на различных скоростях.

Сталь IX18H9T, резцы ВК8, $t=0,25$ мм, $s=0,06$ мм/об.
а— $v=57$ м/мин; б— $v=42$ м/мин.
○—резцы без фаски; □—резцы с фаской

шение размерной стойкости (табл. 28). Так, при $t=0,25$ мм и $s=0,03 \div 0,085$ мм/об интенсивность размерного износа расточных резцов с фаской составляет в среднем лишь 28,7% от интенсивности размерного износа резцов без фаски, т. е. расточным резцом с фаской можно обработать в 3,5 раза большее число деталей без подналадки или замены инструмента, чем резцом без фаски (рис. 114).

Период стойкости расточных резцов с фаской так же в 2—4 раза выше периода стойкости расточных резцов без фаски. Таким образом, доводку фаски на расточных резцах, применяемых для чисто-

вой и тонкой расточки отверстий, следует признать совершенно обязательной операцией.

Таблица 28

Износ расточных резцов без фаски и с фаской

(сталь 1X18H9T; резец ВК8; $f_z=0,10$ мм; $\alpha_\phi=0$; $\alpha=\alpha_1=18^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $r=0,20$ мм; критерий затупления $h_s=0,30$ мм)

Режимы резания			Начальный радиальный износ в МК		Отношение $\frac{h'_n}{h_n}$ %	Поверхностный относительный износ в МК/10 ³ см ²		Отношение $\frac{h'_{o.п}}{h_{o.п}}$ %
t мм	s мм/об	v м/мин	без фаски h_n	с фаской h'_n		без фаски $h_{o.п}$	с фаской $h'_{o.п}$	
0,25	0,03	42	10	1	10	1260	386	30,6
0,25	0,06	42	12	6	50	140	38,2	27,2
0,25	0,085	42	12	4	33	141	40	28,4
0,25	0,06	57	12	4	33	127	42	33
0,50	0,06	36,6	32	18	56	615	410	66,5

6. Сравнение v_o и $h_{o.п.о}$ при точении и растачивании

Было установлено, что чем больше диаметр растачиваемого отверстия, тем меньше деформация срезаемого слоя, тем ниже температура в зоне резания и величина оптимального поверхностного относительного износа расточного резца и тем выше оптимальная скорость резания.

Анализ экспериментальных значений v_o и $h_{o.п.о}$ при точении и растачивании показал (табл. 29), что при переходе от растачивания к наружному точению происходит дальнейшее облегчение условий деформации срезаемого слоя, снижение температуры резания (при $v=\text{const}$), повышение оптимальной скорости резания и снижение величины $h_{o.п.о}$. Так, v_o при растачивании составляет от 25 до 91% от v_o при точении. Особенно большое снижение v_o при растачивании наблюдается при обработке жаропрочного сплава ЭИ437А (рис. 115). Установление скоростей резания, оптимальных по интенсивности размерного износа инструмента при обработке жаропрочных сплавов и других труднообрабатываемых материалов, весьма важно потому, что эти скорости являются одновременно и экономическими скоростями резания, при которых обеспечивается наименьшая себестоимость обработки.

На соотношение оптимальных скоростей резания при растачивании и точении влияет марка твердого сплава. Так, при обработке стали 1X18H9T оказалось, что меньшее снижение скоростей резания (на 9%) наблюдается при применении резцов ВК6 и значительно большее — (на 45—48%) для резцов ВК8.

Сравнение значений v_o , $h_{o.п.о}$, v_{h_o} , T_o
при точении и растачивании жаропрочных материалов

Обрабатываемый материал	Материал резца	s мм/об	Точение				Растачивание				Отношение		
			D мм	v_o м/мин	$h_{o.п.о}$ мк/10°с.м²	v_{h_o} мк/мин	d мм	v_o' м/мин	$h_{o.п.о}'$ мк/10°с.м²	v_{h_o}' мк/мин	$\frac{v_o'}{v_o}$	$\frac{h_{o.п.о}'}{h_{o.п.о}}$	$\frac{T_o'}{T_o} = \frac{v_{h_o}'}{v_{h_o}}$
1X18H9T	BK8	0,10	76	115	38	4,36	18	60	58	3,48	0,52	1,6	1,25
1X18H9T	BK8	0,17	70	87,5	11,4	1	18	48	48	2,3	0,55	4,2	0,43
1X18H9T	BK6	0,12	70	73,5	6,15	0,45	22	67	37,2	2,5	0,91	6,0	0,18
ЭИ437А	BK8	0,085	25	36,7	64,5	2,36	15	9	325	2,92	0,245	5,0	0,81
ЭИ437А	BK8	0,12	25	30	56,6	1,7	15	7,8	377	2,94	0,26	6,6	0,58

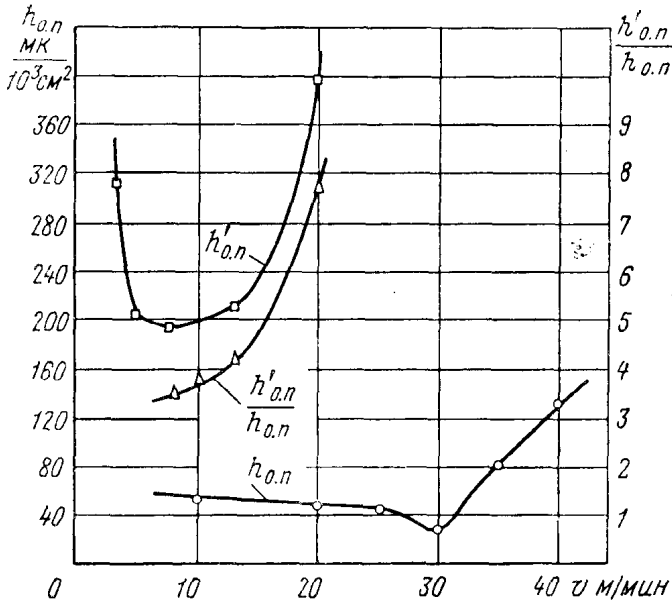


Рис. 115. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ при растачивании и точении.

Жаропрочный сплав ЭИ437А; резец BK8; $t=0,25$ мм; $s=0,12$ мм/об, $d=15$ мм.
○ — точение; □ — растачивание

Установлено также, что интенсивность размерного износа расточного резца при работе на оптимальной скорости резания в несколько раз выше интенсивности размерного износа проходного резца. Так как опыты по точению и растачиванию производились

резцами, имевшими задние углы соответственно 10 и 18°, то для возможности сопоставления значения $h_{0,п.0}$ при точении были умножены на коэффициент $k=1,95$ (табл. 30).

Таблица 30

Влияние заднего угла проходных резцов
на их поверхностный относительный износ; сталь 1X18H9T
($t=0,50$ мм; $s=0,20$ мм/об; $l_n=500$ м; $l=2000$ м;
 $\gamma=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $r=1$ мм; $\alpha=\alpha_1$)

Марка твердого сплава	Ско- рость резания м/мин	Поверхностный относительный износ в $\text{мк}/10^3 \text{ см}^2$ при задних углах резца в град				Отношение $\frac{h_{0,п18}}{h_{0,п10}}$
		6	10	14	18	
ВК4	139	4	5,66	10	10,65	1,88
ВК6	144	6,5	4,35	8,35	8,65	1,99

} 1,95

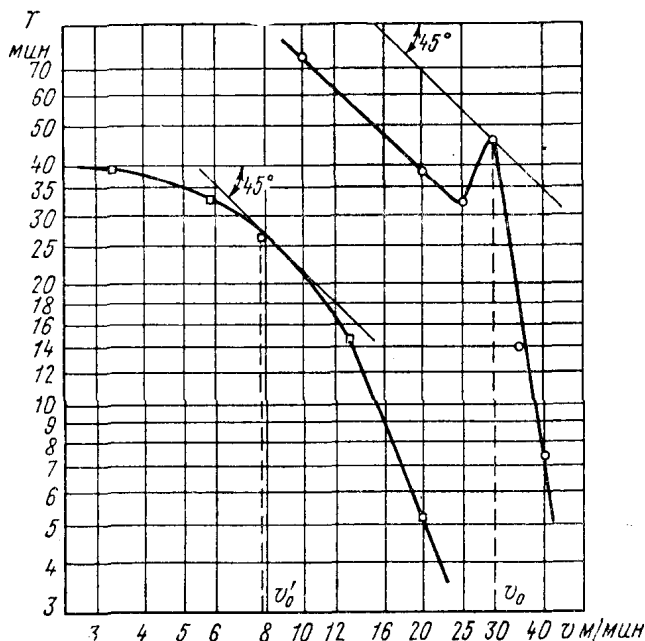


Рис. 116. Влияние скорости резания на период стойкости при точении и растачивании
Жаропрочный сплав ЭИ437А, резцы ВК8; $t=0,25$ мм, $s=0,12$ мм/об,
 $d=15$ мм; критерий затупления — $h_r=40$ мк;
○ — точение; □ — растачивание

Эта величина найдена из табл. 30 для стали 1X18H9T. С учетом указанной поправки на задний угол интенсивность размерного из-

носа расточных резцов при работе на оптимальных скоростях резания оказывается в 1,6—6,6 раза выше интенсивности размерного износа резцов при точении.

Интересно отметить (см. табл. 29), что оптимальный период стойкости расточного резца ВК8 при обработке жаропрочного сплава ЭИ437А составляет 58% от величины оптимального периода стойкости проходного резца (рис. 116), а оптимальный период стойкости расточного резца ВК8 при растачивании стали 1Х18Н9Т даже выше (в 1,25 раза) оптимального периода стойкости резца при точении. Вместе с тем размерная стойкость расточного резца, при работе на оптимальной скорости резания, определяемая величиной $h_{o,п.о.}$ для жаропрочного сплава ЭИ437 в 6,6 раза, а для стали 1Х18Н9Т — в 1,6 раза ниже размерной стойкости резца при точении. Следовательно, при сравнении размерной стойкости резцов при точении и растачивании по величине стойкости может создаваться искаженное представление об относительной размерной стойкости сравниваемых резцов.

7. Основные выводы

1. Положение о постоянстве оптимальной температуры резания для точек минимума кривых $h_{o,п}=f(v)$, полученных при работе на различных подачах, справедливо не только для точения, но и для растачивания.

2. Положение о постоянстве оптимальной температуры резания для всех экстремальных точек семейства кривых $h_{o,п}=f(v)$, полученных при расточке отверстий различного диаметра, может служить основой для оптимизации процессов растачивания и резкого сокращения объема экспериментальных работ, затрачиваемых на определение оптимальных режимов резания.

3. Режимы резания при растачивании отверстий необходимо назначать соответственно диаметру расточки, так как в противном случае будут допущены значительные потери в размерной стойкости инструмента и производительности обработки.

4. Уменьшение жесткости расточного резца ниже критической жесткости приводит к появлению вибраций резца и сопровождается снижением оптимальной скорости резания и повышением величины $h_{o,п.о.}$

5. Важным средством повышения размерной стойкости расточных резцов, применяемых для тонкого растачивания отверстий в деталях из жаропрочных материалов, является фаска с нулевым задним углом, выполненная вдоль всего режущего лезвия.

6. Эффективность фаски, как средства повышения размерной стойкости расточного резца тем выше, чем ближе находится выбранный режим работы к оптимальному режиму резания, при котором обеспечивается наименьшая интенсивность размерного износа инструмента.

7. Данные об оптимальных скоростях резания при точении жаропрочных материалов не могут быть использованы при растачивании тех же материалов без постановки специальных исследований. Введение какого-либо постоянного поправочного коэффициента на оптимальную скорость резания также не может дать удовлетворительных по точности результатов.

8. Повышение интенсивности размерного износа расточного резца по сравнению с проходным резцом колеблется в широких пределах (от 1,6 до 6,6) и также не может быть учтено каким-либо постоянным коэффициентом.

9. Вопрос о взаимосвязи между уровнями оптимальных скоростей резания и величинами оптимальных поверхностных относительных износов инструмента при точении и растачивании различных материалов имеет большое научное и практическое значение и требует постановки специальных исследований.



Глава IX

РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

1. Прибор для измерения размерного износа и температурной деформации торцовых фрез

Величина отношения размерного износа к ширине фаски износа на вершине зуба торцовой фрезы при работе с различными сочетаниями t , s_z , v и строгом сохранении постоянства геометрических параметров режущей части зуба фрезы так же, как при точении и растачивании не постоянна. Поэтому для получения точных данных о размерном износе его следует определять непосредственным измерением.

Для измерения размерного износа и температурной деформации торцовых фрез на горизонтально-фрезерных станках сконструирован и изготовлен универсальный прибор (рис. 117), состоящий из измерительного 1 и фиксирующего 2 узлов, установленных на общей штанге 6, несущей два прихвата 5, которые служат для крепления прибора к консоли станка.

Измерительный узел 1 состоит из откидной планки 9, шарнирно связанной с регулировочной плитой 8, которая крепится к опорной втулке 7. В пазу откидной планки 9 установлен хомутик 11, несущий головку миниметра, измерительный наконечник которого при замерах упирается в вершину зуба фрезы. Горизонтальное положение миниметра регулируется с помощью упорного угольника 10. Необходимое положение зуба фрезы при измерении размерного износа обеспечивается фиксатором 3, установленным на регулировочном кронштейне 4.

Перед измерением конический наконечник фиксатора вводится в коническое отверстие или в паз корпуса фрезы. Откидная планка 9 опускается в положение измерения и шкала миниметра настраивается на нуль. После работы делается первый отсчет N_1 , а после охлаждения зуба фрезы производится второй отсчет N_2 . Разность отсчетов $N_1 - N_2$ представляет собой температурное удлинение зуба, а отсчет N_2 — его размерный износ.

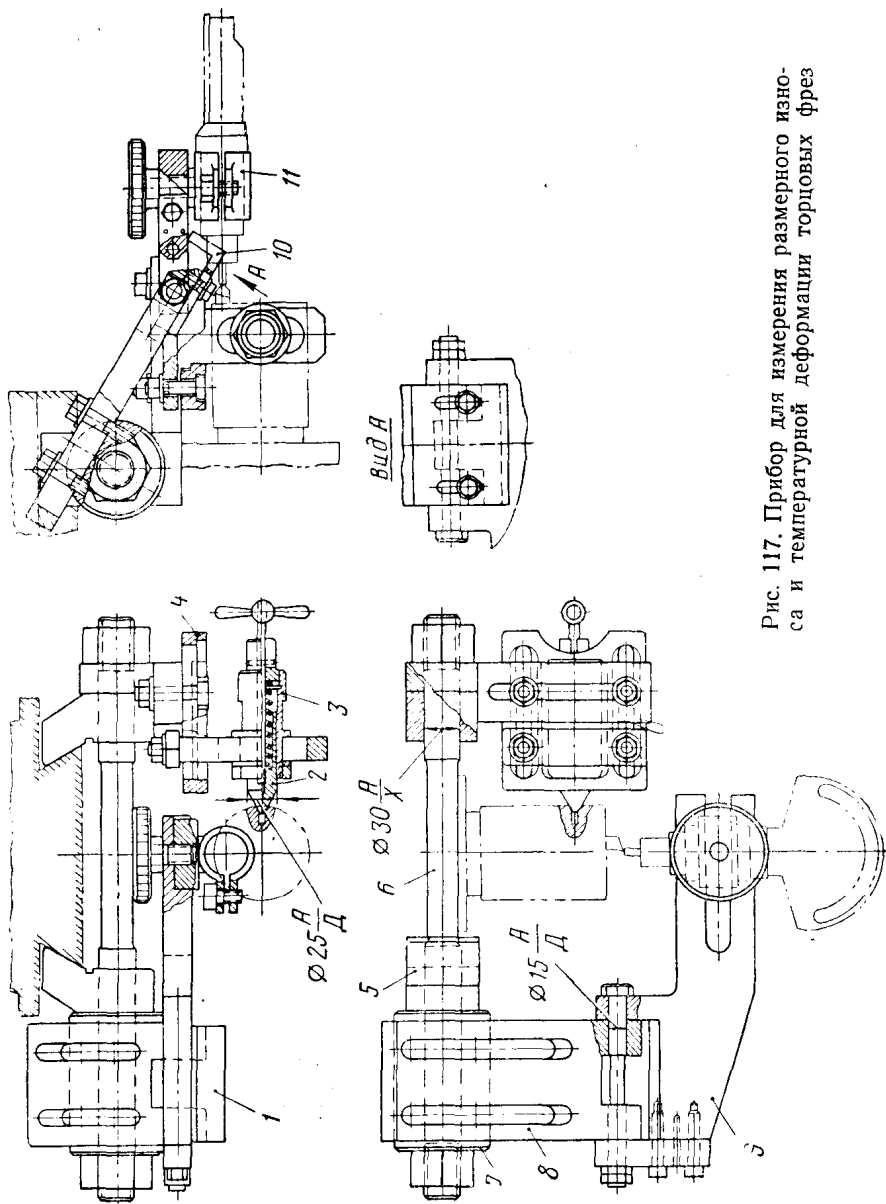


Рис. 117. Прибор для измерения размерного износа и температурной деформации торцовых фрез

Пазы, предусмотренные в несущих деталях узлов 1 и 2, допускают регулировку прибора на разные диаметры фрез и вылеты. Регулирование прибора по вылету фрезы в более широком диапазоне осуществляется путем перемещения консоли станка вместе с закрепленным прибором.

Достоинством прибора является непосредственный контакт измерительного наконечника миниметра с вершиной зуба фрезы. Прибор можно использовать для различных размеров фрез.

2. Влияние v и s_z на $h_{0,п}$, ζ и θ однозубых торцовых фрез

Влияние скорости резания и подачи на размерный износ однозубой торцовой фрезы исследовалось на фрезерных станках 6М82 и 6Н11 при фрезеровании образцов из стали 1Х18Н9Т*. Чтобы исключить влияние биения зубьев на закономерности размерного износа, применялись торцовые фрезерные головки с одним вставным зубом, оснащенным пластинкой ВК8 или Т15К10.

Резцы доводились до износа по задней поверхности, равного $h_z = 0,30 \div 1$ мм. Высота неровностей обработанной поверхности измерялась двойным микроскопом Линника непосредственно на станке.

Величина поверхностного относительного износа однозубой торцовой фрезы определялась по формуле

$$h_{0,п} = \frac{10^5 (h_r - h_n)}{(L - L_n) B} \text{ мк/} 10^3 \text{ см}^2, \quad (63)$$

где h_r — конечная или текущая величина размерного износа зуба фрезы в мк;

h_n — начальный размерный износ зуба фрезы в мк;

L — общая длина фрезеруемой поверхности в мм;

L_n — начальная длина фрезеруемой поверхности в мм;

B — ширина фрезеруемой поверхности в мм.

По результатам исследования построены графики (рис. 118, а), анализ которых показывает, что для всех подач с повышением скорости резания $h_{0,п}$ сначала снижается, а затем, достигнув минимума при некоторой оптимальной скорости резания, начинает возрастать.

Исследования показали также, что всем точкам минимума кривых $h_{0,п} = f(v)$, полученных при различных подачах, соответствует одна и та же оптимальная температура резания. Это положение о постоянстве оптимальной температуры резания имеет большое научное и практическое значение, так как указывает на общность физических явлений, обуславливающих износ инструмента при различных видах обработки (точение, растачивание, торцовое фрезерование), и позволяет резко сократить объем экспериментов, необходимых для отыскания оптимальных сочетаний s_z и v .

* Опыты проводили В. В. Кривошеев и Л. Н. Волгарев под руководством автора.

Повышение подачи от 0,05 до 0,21 мм/зуб при соблюдении постоянства оптимальной температуры резания (за счет соответствующего снижения скоростей резания) приводит к снижению величины оптимального поверхностного относительного износа и повышению размерной стойкости фрезы. Для указанного диапазона подач при фрезеровании стали 1Х18Н9Т однозубой фрезой ВК8 взаимосвязь между s_z , v_o и $h_{o.п.о}$ может быть выражена параметрическими уравнениями максимальной размерной стойкости

$$\left. \begin{aligned} v_o &= \frac{C_1}{s_z^{x_1}} = \frac{54,3}{s_z^{0,37}} \text{ м/мин;} \\ h_{o.п.о} &= \frac{C_2}{s_z^{x_2}} = \frac{37,6}{s_z^{0,62}} \text{ мк/} 10^3 \text{ см}^2. \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Так, при фрезеровании стали 1Х18Н9Т однозубой фрезой, оснащенной пластинкой твердого сплава Т5К10, для диапазона подач 0,05—0,33 мм/зуб

$$\left. \begin{aligned} v_o &= \frac{127,5}{s_z^{0,37}} \text{ м/мин;} \\ h_{o.п.о} &= \frac{11,2}{s_z^{0,56}} \text{ мк/} 10^3 \text{ см}^2. \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

Так же как и при точении, при различных сочетаниях s_z и v_o , удовлетворяющих указанным уравнениям, обеспечиваются постоянство оптимальной температуры резания, наименьшая величина $h_{o.п.о}$ и максимум размерной стойкости инструмента.

Рис. 118, б показывает, что при скорости резания выше оптимальной происходит стабилизация усадки стружки, причем при $v_o = \text{const}$ усадка стружки с повышением подачи снижается. Это, по-видимому, является одной из причин уменьшения величины $h_{o.п.о}$ при повышении подачи.

Следует отметить, что фрезы, оснащенные твердым сплавом Т5К10, имеют более высокие значения v_o и значительно меньшие величины $h_{o.п.о}$.

Для выбора оптимальных режимов чистового торцового фрезерования стали 1Х18Н9Т фрезами, оснащенными пластинками твердого сплава ВК8 и Т5К10, разработана номограмма (рис. 119).

Исходя из заданной высоты неровностей или класса чистоты обработанной поверхности по линии R_z , выбирают s_z , для которой по линии v_o устанавливают оптимальную скорость резания и по диаметру фрезы D определяют число оборотов станка.

Некоторыми источниками рекомендуются при фрезеровании стали 1Х18Н9Т торцовыми фрезами ВК8 режимы резания, соответствующие левым ветвям кривых $h_{o.п} = f(v)$. Применение таких режимов вызовет повышенный износ инструмента и снижение произ-

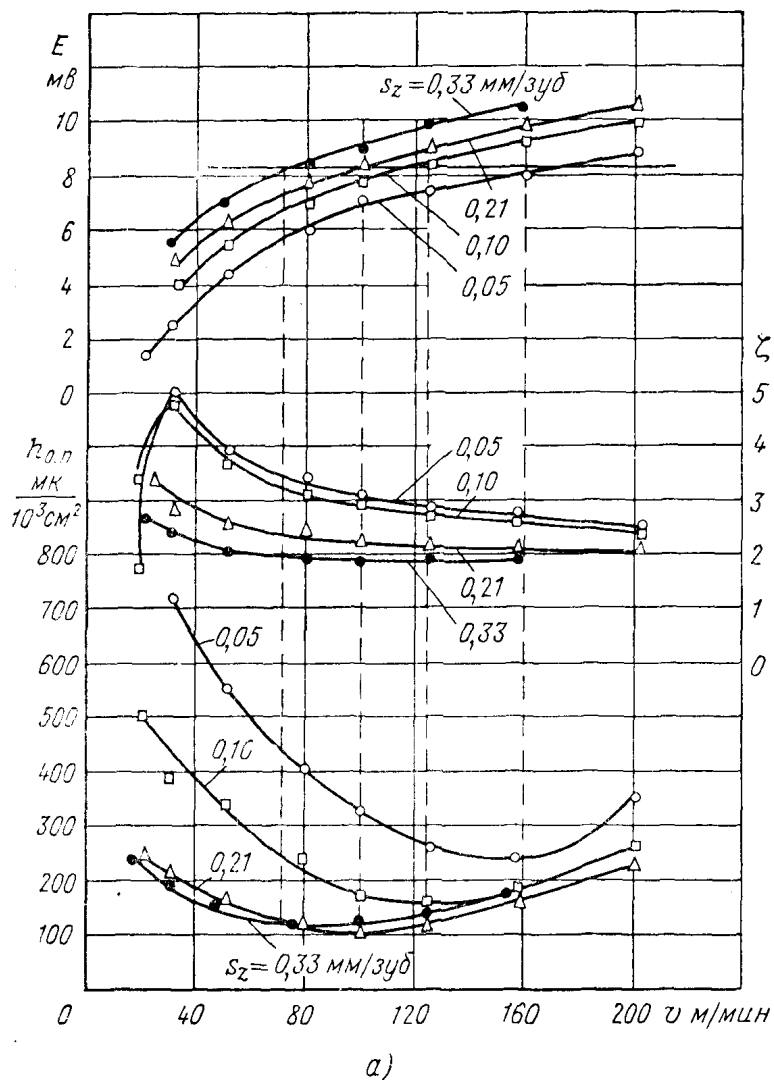
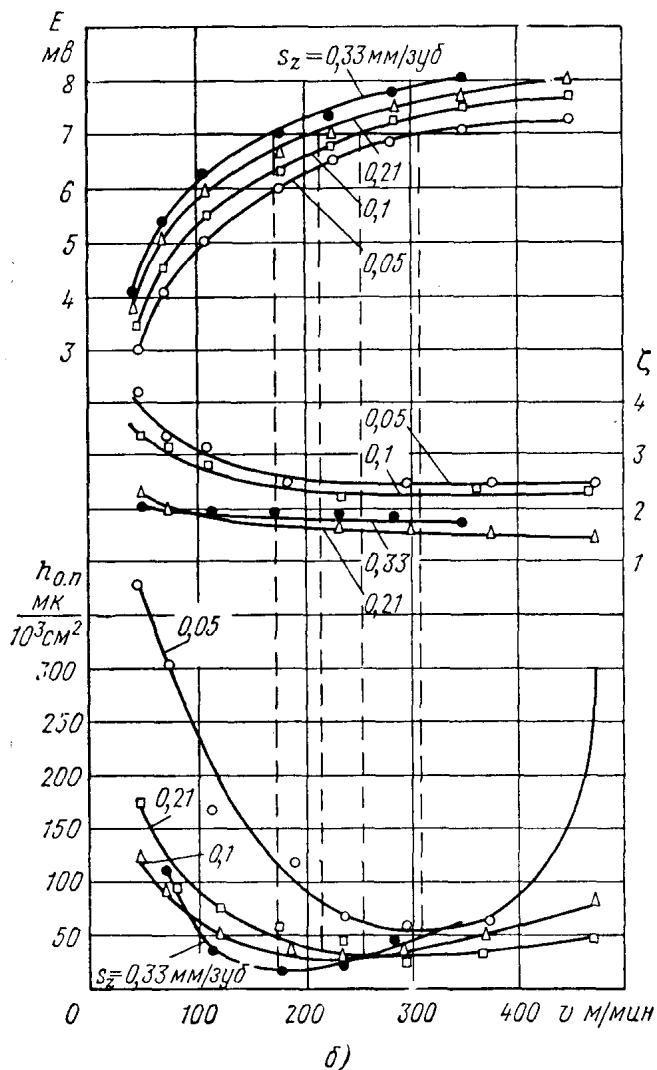


Рис. 118. Влияние скорости резания на температуру резания
износ однозубой

Сталь 1Х18Н9Т; $B=34$ мм, $t=0,50$ мм, s_z
 $\alpha=\alpha=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=10^\circ$, $\lambda=+10^\circ$, $r=1$ мм):



(т. э. д. с.), усадку стружки и поверхностный относительный торцовый фрезы.

$=0,01-0,33 \text{ мм}$, $D=40 \text{ мм}$; $\gamma=10^\circ$,
 a —фреза ВК8; δ —фреза Т5К10

водительности обработки по сравнению с оптимальными режимами, установленными по предлагаемой номограмме.

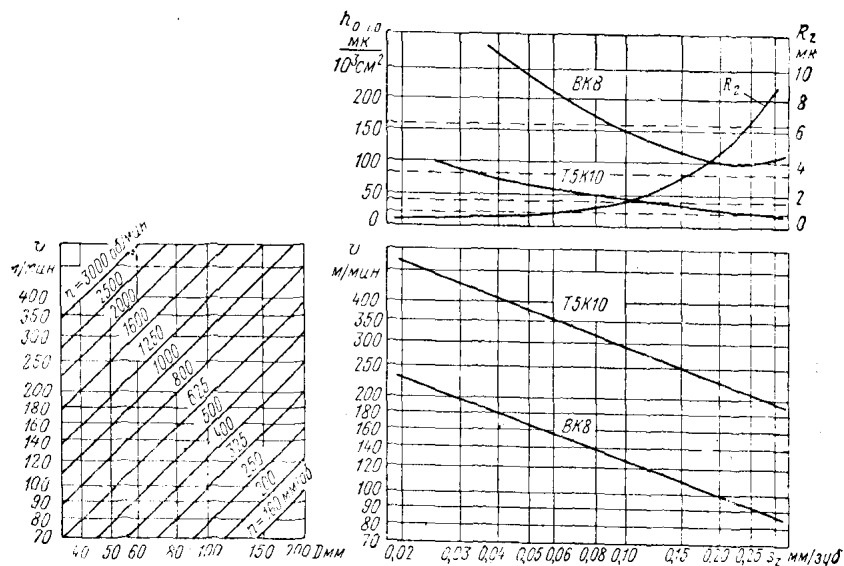


Рис. 119. Номограмма для определения подач и оптимальных скоростей резания при торцовом симметричном фрезеровании стали 1X18H9T однозубыми фрезами, оснащенными пластинками твердого сплава BK8 и T5K10 ($t=0,50$ мм, $D/B=1,2$, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi_1=10^\circ$, $\gamma=\gamma_1=10^\circ$, $r=1$ мм)

3. Получение зависимости $h_{0.п}=f(v)$ при торцовом фрезеровании на основе сокращенных испытаний

Ранее было показано, что при точении и растачивании зависимость $h_{0.п}=f(v)$ может быть определена на основе сравнительно кратковременных испытаний без доведения резца до полного затупления.

Так как зависимость размерного износа зуба фрезы от пути резания $h_r=f(l)$ носит линейный характер (рис. 120), то и при торцовом фрезеровании зависимость $h_{0.п}=f(v)$ также может быть получена на основе сокращенных испытаний.

Каждому значению размерного износа, принимаемому в качестве критерия затупления, соответствует одна и та же величина оптимальной скорости резания, а кривые $h_{0.п}=f(v)$, полученные с учетом разных значений h_r , практически могут быть совмещены (рис. 121).

Следовательно, при фрезеровании v_0 и $h_{0.п.0}$, как характеристики обрабатываемости, также имеют преимущество перед скоростью резания v_T . Как и следовало ожидать, точки минимума на кривых

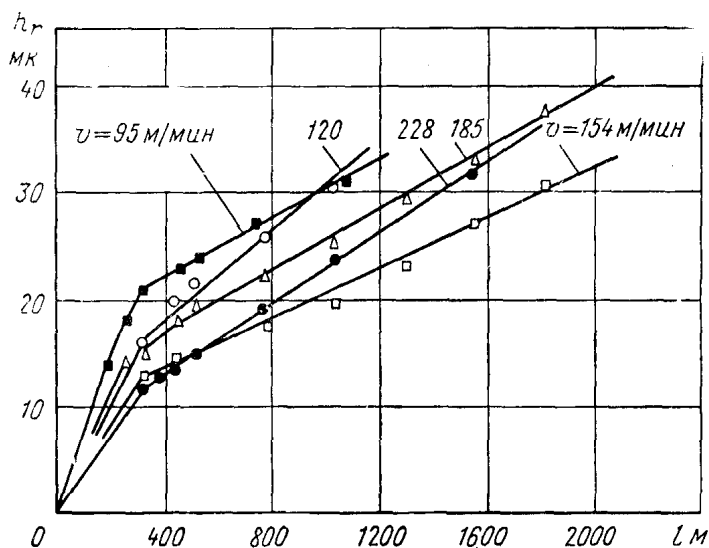


Рис. 120. Влияние длины пути резания на размерный износ зуба торцевой фрезы Т15К6 при фрезеровании стали 40Х ($t=0,25$ мм; $s_z=10$ мм/зуб, $D=100$ мм; $B=50$ мм)

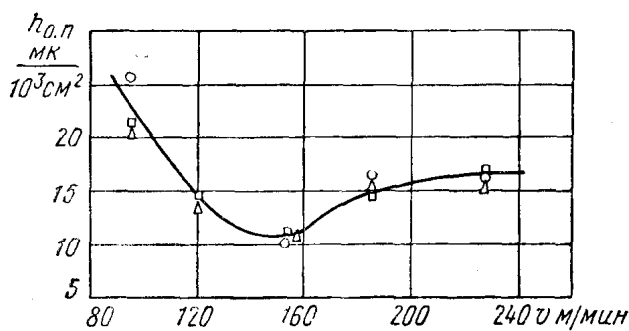


Рис. 121. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ фрезы Т15К6 при различных величинах радиального износа, принимаемых в качестве критерия затупления.

Сталь 40Х; $t=0,25$ мм, $s_z=0,10$ мм/зуб, $D=100$ мм, $B=50$ мм, $t_H=325$ м)

○ — $h_r=20$ мк; □ — $h_r=25$ мк; △ — $h_r=30$ мк

$h_{0,п}=f(v)$ и $R_z=f(v)$ при торцовом фрезеровании наблюдаются при одной и той же оптимальной скорости резания (рис. 122).

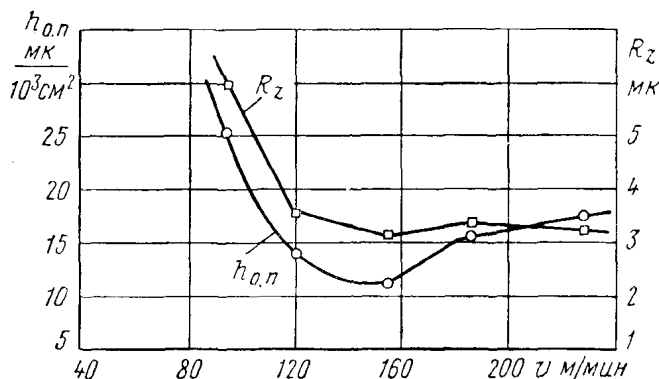


Рис. 122. Влияние скорости резания на интенсивность размерного износа однозубой фрезы Т15К6 и высоту неровностей обработанной поверхности при торцовом фрезеровании стали 40Х.

$D=100$ мм; $B=50$ мм; $s_z=0,10$ мм/зуб; $t=0,25$ мм; $\gamma=0$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=10^\circ$, $\lambda=0$, $r=1$ мм

4. Способ повышения размерной стойкости торцовых фрез

Исследования показали, что нулевая фаска по задней поверхности зуба фрезы вдоль всего режущего лезвия значительно повышает

Таблица 31

Начальный и поверхностный относительный износ зуба торцовой фрезы без фаски и с фаской

(сталь 40Х; твердый сплав Т15К6; $f_a=0,15$ мм; $a_f=0$; $D=100$ мм; $B=50$ мм; $\gamma=0$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $\lambda=0$; $r=1$ мм)

Режимы резания			Начальный размерный износ в мк		Отношение $\frac{h'_н}{h_н}$ %	Поверхностный относительный износ в мк/10 ³ см ²		Отношение $\frac{h'_{0,п}}{h_{0,п}}$ %
t мм	s_z мм/зуб	v м/мин	без фаски $h_н$	с фаской $h'_н$		без фаски $h_{0,п}$	с фаской $h'_{0,п}$	
0,25	0,10	95	9	4,0	44,5	25,5	9,5	37,3
0,25	0,10	120	8,5	4,5	53	13,5	6,5	48
0,25	0,10	154	8,5	4	47	11	5,2	47
0,25	0,10	185	12	2,5	21	16	8	50
0,25	0,22	120	9	1,5	16,7	8	4	50
0,25	0,33	120	13	6,5	50	16	4,9	32,6
0,50	0,33	120	11	4,5	4,1	15,6	6,65	42,6
1,0	0,33	120	10	5	50	15,3	7,15	50

размерную стойкость (табл. 31). Интенсивность размерного износа зуба без фаски в зоне нормального износа в 2—3 раза выше, чем зуба фрезы с фаской.

Преимущества торцовых фрез с фаской проявляются при работе с различными значениями v , s_z и t (рис. 123). Торцевой фрезой

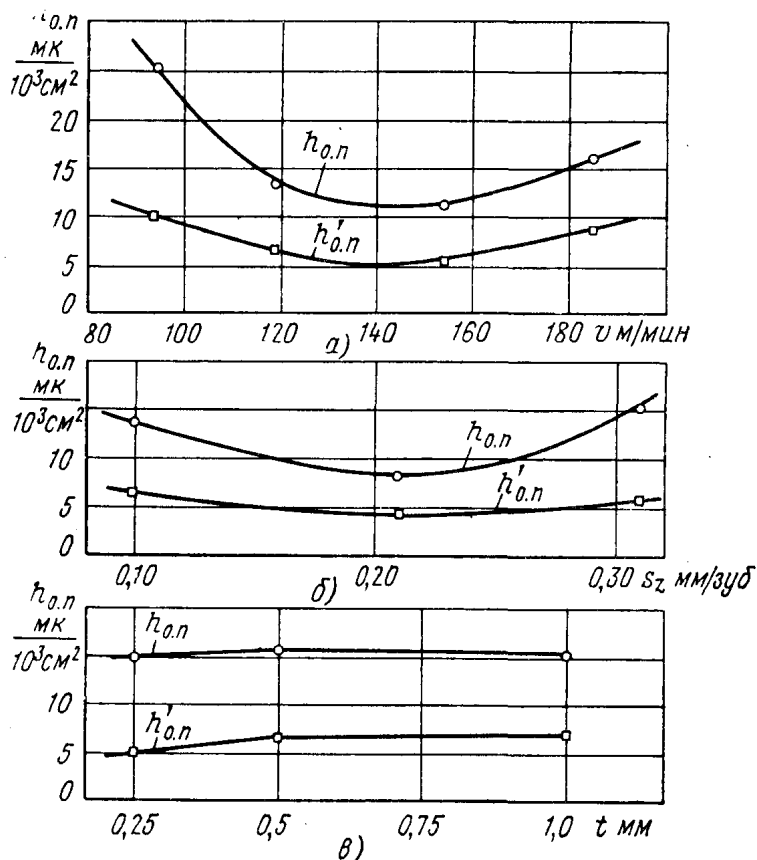


Рис. 123. Сравнение поверхностного относительного износа зуба торцевой фрезы Т15К6 в зависимости:

а—от скорости резания ($t=0,25$ мм; $s_z=0,10$ мм/зуб); б—от подачи; ($t=0,25$ мм; $v=119$ м/мин); в—от глубины резания; ($s_z=0,31$ мм/зуб; $v=119$ м/мин). Сталь 40Х; $D=100$ мм; $B=50$ мм, $f_s=0,15$ мм
 О—зубья без фаски; □—зубья с фаской

с фаской можно обработать в 2—3 раза большее число деталей без подналадки инструмента, чем торцевой фрезой без фаски, и с более высокой чистотой обработанной поверхности.

Период стойкости торцовых фрез с фаской в 1,5—2 раза выше периода стойкости фрез без фаски. Выкрашивание режущего лез-

вия, характерное для торцовых фрез, оснащенных пластинками твердого сплава, при наличии фаски наблюдается значительно реже [75].

5. Сравнение величин v_o и $h_{o,п.о}$ при точении и торцовом фрезеровании

Как было показано, при точении, растачивании и торцовом фрезеровании на различных подачах минимум интенсивности размерного износа наблюдается при одной и той же оптимальной температуре резания. При повышении и снижении температуры резания от оптимальной интенсивность износа инструмента повышается.

В случае непрерывного резания, наблюдаемого при точении и растачивании, быстро устанавливается определенный тепловой режим работы режущего лезвия, и с течением времени температура резания существенных изменений не претерпевает [21], [77], [80]. При торцовом фрезеровании резание является прерывистым. Циклическое охлаждение режущей кромки при холостом пробеге зуба фрезы приводит к снижению средней температуры резания по сравнению с точением. Следовательно, для достижения оптимальной температуры резания, дающей минимальную интенсивность износа зуба фрезы, фрезерование должно вестись на более высокой оптимальной скорости резания, чем при точении.

Таблица 32

Оптимальные скорости резания и величины
оптимального поверхностного относительного износа
при точении и торцовом фрезеровании
($t=0,50$ мм; $\gamma=10^\circ$; $\alpha=\alpha_1=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=10^\circ$; $r=1$ мм)

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	s мм/об мм/зуб	Точение		Торцовое фрезерование		Отношение		Оптимальная скорость размерного износа в мм/мин		Отношение оптимальных периодов стойкости
			v_o м/мин	$h_{o,п.о}$ мм/10 ³ см ²	v_o м/мин	$h_{o,п.о}$ мм/10 ³ см ²	$\frac{v_o''}{v_o}$	$\frac{h_{o,п.о}''}{h_{o,п.о}}$	при точении v_{ho}	при фрезеровании v_{ho}	
1Х18Н9Т	ВК8	0,10	115	18,5	125	161	1,08	8,7	2,12	20,2	0,105
		0,20	80	3,2	100	96	1,25	30	0,256	9,6	0,027
		0,30	64	2,3	80	129	1,25	56	0,148	10,3	0,014
	Т5К10	0,10	151	2,23	292	40	1,94	18	0,336	11,7	0,028
		0,20	136	1,47	231	27,6	1,70	18,6	0,20	6,4	0,031
		0,30	128	1,15	198	22	1,55	19,1	0,148	4,35	0,034
30ХГСА	Т15К6	0,30	85	1,15	154	4,25	1,81	3,7	0,092	0,65	0,141

Действительно, опыты показывают (табл. 32), что оптимальная скорость резания при фрезеровании выше оптимальной скорости резания при точении в 1,08—1,94 раза, причем меньшие значения относятся к инструментам, оснащенным пластинками твердого сплава ВК8, большие — к инструментам, оснащенным пластинками сплава Т5К10 и Т15К6.

При торцовом фрезеровании по сравнению с точением следует ожидать более высокую интенсивность размерного износа инструмента в силу циклического охлаждения режущей кромки при холостом пробеге [27], ударного характера врезания режущей кромки в обрабатываемый материал, непостоянства температуры резания во время рабочего хода зуба фрезы, повышения сил резания от начала до полного врезания [46].

Анализ осциллограмм температуры резания во время рабочего хода зуба фрезы показывает на непостоянство температуры. Так как зависимость $h_{o,п} = f(v)$ имеет точку минимума при оптимальной температуре резания, то при работе на оптимальной скорости резания зуб фрезы будет иметь наименьшую интенсивность износа лишь на некоторой части рабочего хода. В момент врезания зуба фрезы температура резания ниже оптимальной и при некотором положении зуба фрезы температура резания переходит через оптимальное значение. Отклонение температуры резания в любую сторону от оптимальной приводит к повышению интенсивности износа. Можно предполагать, что зафиксированное в момент полного врезания резца при точении образца с лыской (прерывистое резание) повышение сил резания против их среднего значения также связано с температурным фактором [46].

Анализ значений $h_{o,п.о}$ при точении и торцовом фрезеровании показывает, что интенсивность износа зуба фрезы в 3,7—56 раза выше интенсивности износа резца.

Отношение $h_{o,п}''/h_{o,п}$ при изменении скорости резания также изменяется (рис. 124), имея максимум при v_o , являющейся оптимальной для точения, и минимум (в исследованном диапазоне скоростей резания) при v_o'' , являющейся оптимальной для фрезерования.

Интересно отметить, что фактор прерывистости сильнее сказывается на снижении T_o , чем на повышении $h_{o,п.о}$. Указанное явление объясняется более высокими оптимальными скоростями резания при фрезеровании.

Действительно, величина оптимального периода стойкости однозубой фрезы составляет всего от 1,40 до 14,1% от величины оптимального периода стойкости резца [27], причем за стойкость торцовой фрезы принималось лишь «чистое» время резания.

Анализ наших экспериментальных данных по точению и торцовому фрезерованию не подтверждает благоприятного влияния на стойкость «отдыха» зуба при выходе его из зоны резания, о котором говорится в ряде работ. Несмотря на то, что $v_o'' > v_o$, скорость резания v_T для торцового фрезерования ниже соответствующей скоро-

сти для точения. Так, при обработке стали 30ХГСА на режиме: $t=0,50$ мм; $s=0,30$ мм/об (мм/зуб) получились следующие значения скоростей резания v_0 и v_T

	v_0 м/мин	v_{30} м/мин	v_{20} м/мин	v_{15} м/мин
Точение	85	150	170	190
Торцовое фрезерование	154	80	110	168

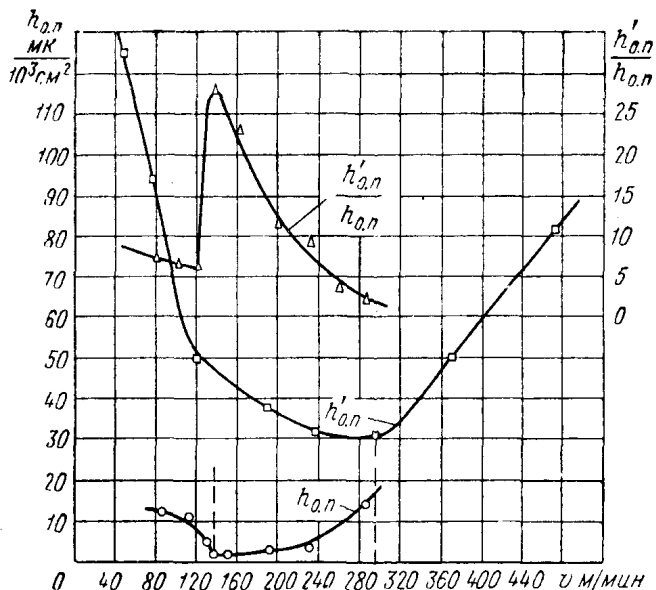


Рис. 124. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ фрезы $h'_{0,п}$ и резца $h_{0,п}$ из Т5К10 и на величину их отношения при обработке стали 1Х18Н9Т ($t=0,50$ мм, $s=0,20$ мм/об (мм/зуб); $B=68$ мм, $D=90$ мм)

Такое соотношение скоростей резания v_0 и v_T для точения и фрезерования (как и вообще для непрерывного и прерывистого резания) подтверждается данными обработки 1Х18Н9Т (рис. 125—126), где кривая стойкости для фрезерования на графике $T=f(v)$ расположена ниже соответствующей кривой для точения.

Величины отношений v''_0/v_0 и $h''_{0,п.0}/h_{0,п.0}$ различны для разных подач, различных обрабатываемых материалов и марок твердого сплава. По величине относительной стойкости при непрерывном и прерывистом точении жаропрочного сплава ЭИ437 различные марки быстрорежущей стали расположились в различной последовательности. Следовательно, не представляется возможным для прерывистого резания дать какую-то общую поправку на оптимальную скорость резания и величину оптимального поверхностного

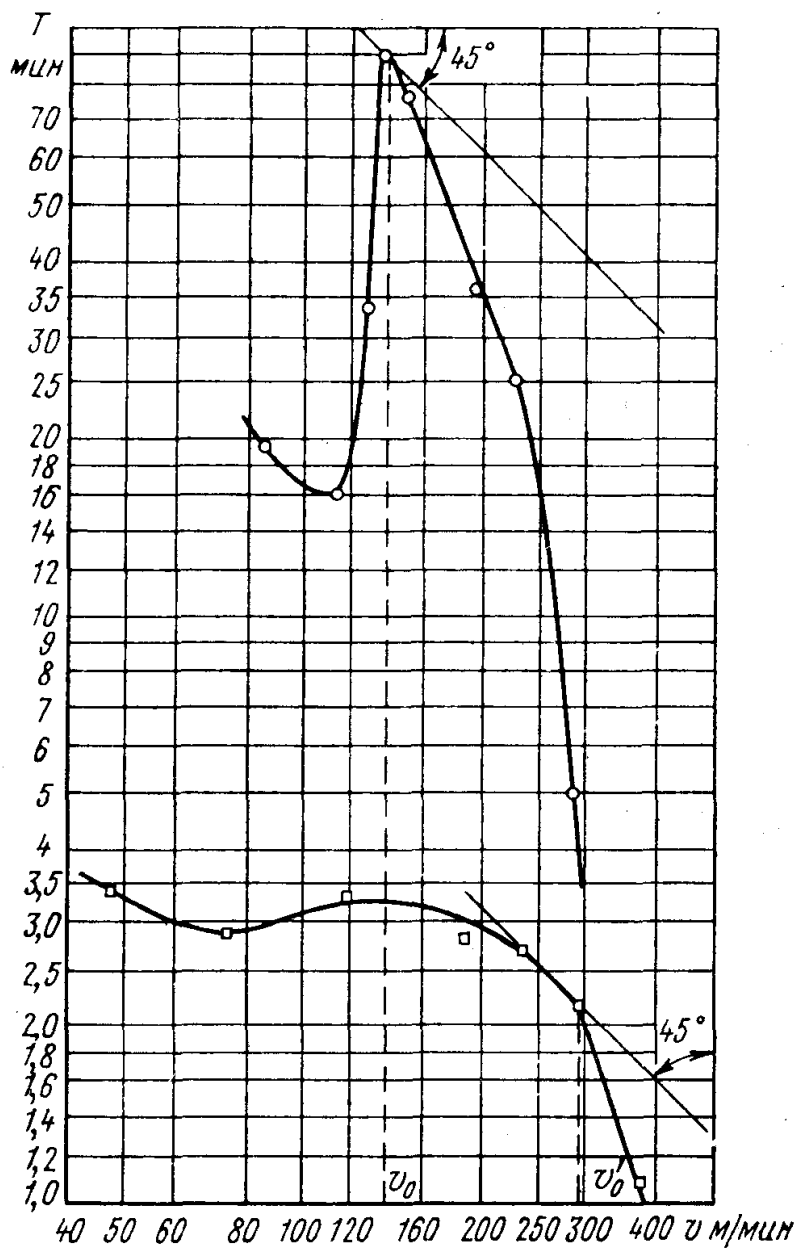


Рис. 125. Влияние скорости резания на период стойкости резца и фрезы из Т5К10 при обработке стали 1Х18Н9Т ($t=0,50$ мм, $s=0,20$ мм/об (мм/зуб); $B=68$ мм, $D=90$ мм; критерий затупления $h_r=40$ мк)

○ —точение; □—фрезерование

относительного износа. Величины v_0'' и $h_{0.п.0}''$ пока могут находиться только экспериментальным путем.

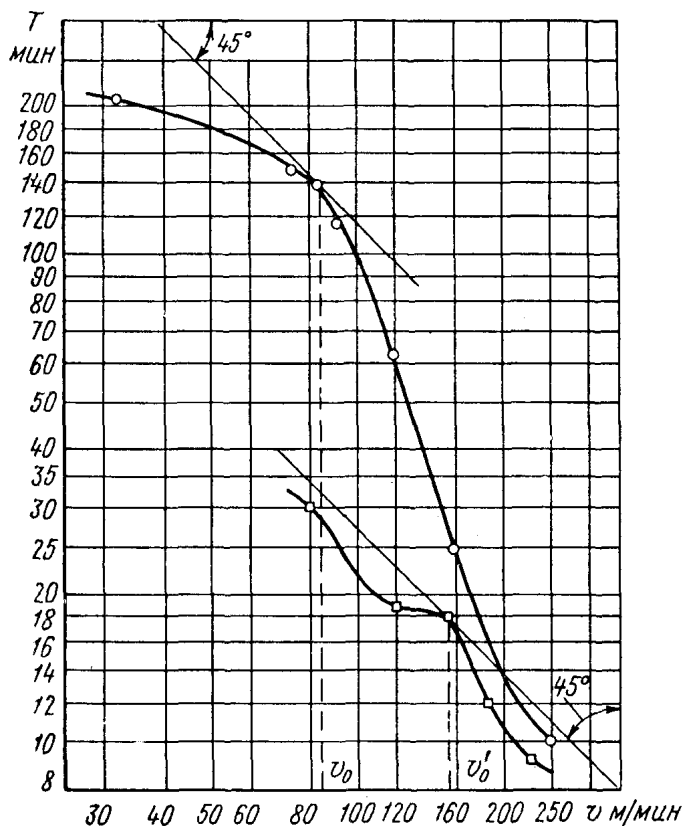


Рис. 126. Влияние скорости резания на период стойкости резца и фрезы из Т15К6 при обработке стали 30ХГСА

($t=0,50$ мм, $s=0,30$ мм/об (мм/зуб); $B=50$, $D=100$ мм; $\varphi=60^\circ$, $\varphi_1=30^\circ$, $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $\gamma=10^\circ$; критерий затупления $h_f=40$ мк)

○ — точение; □ — фрезерование

Интересно отметить, что левые ветви кривых $h_{0.п}=f(v)$ и $h_{0.п}''=f(v)$ для точения и фрезерования являются монотонными (см. рис. 124), тогда как кривые $T=f(v)$ для того же диапазона скоростей резания не являются монотонными.

6. Основные выводы

1. При торцовом фрезеровании сталей зависимость $h_{0.п}=f(v)$ также носит экстремальный характер. В точках минимума кривых $h_{0.п}=f(v)$, полученных при работе на различных s_z , соблюдается постоянство оптимальной температуры резания.

2. Повышение подачи на зуб фрезы при сохранении постоянства оптимальной температуры резания (за счет соответствующего снижения скоростей резания) приводит к снижению величины $h_{o.п.o}$ и повышению размерной стойкости фрезы.

3. Зависимость размерного износа зуба фрезы, оснащенного пластинкой твердого сплава, от пути резания $h_r=f(l)$ носит линейный характер. Это позволяет устанавливать зависимость $h_{o.п}=f(v)$ и находить величины v_o и $h_{o.п.o}$ на основе сокращенных испытаний без доведения инструмента до полного затупления.

4. Скорости резания при фрезеровании, являющиеся оптимальными по интенсивности размерного износа зуба фрезы, оптимальны и по чистоте обработанной поверхности.

5. Фаска, выполненная вдоль всего режущего лезвия зуба фрезы с задним углом, равным нулю, является таким же эффективным средством повышения размерной стойкости инструмента, как при точении и растачивании.

6. Данные об оптимальных скоростях резания или относительном износе, полученные при точении, не могут быть использованы при торцовом фрезеровании тех же материалов с помощью каких-либо постоянных коэффициентов.

7. Оптимальные скорости резания при фрезеровании жаропрочных материалов являются также и экономическими скоростями резания, при которых обеспечивается наименьшая себестоимость обработки и максимум производительности общественного труда.

Работа на оптимальных скоростях при фрезеровании является более эффективной по сравнению с работой на скоростях резания v_T .



Глава X

ВЗАИМОСВЯЗЬ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА С ФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Интенсивность износа режущего инструмента определяет производительность, точность и себестоимость обработки деталей машин. Износ инструмента в большой степени зависит от трения между поверхностями инструмента и обрабатываемым металлом.

Трение всегда сопровождает износ; оно является единственной «нормальной» причиной износа и потери инструментом его режущих свойств, а общие закономерности трения и износа взаимодействующей пары материалов инструмента и обрабатываемой детали составляют научную основу всех тех эмпирических зависимостей, которые используются при назначении режимов резания [15].

Трение при резании является одним из важных факторов, влияющих на силы резания, износ инструментов, состояние поверхностного слоя [45]. Процесс внешнего трения зависит от физико-механических свойств материалов, находящихся в контакте, и от шероховатости контактных поверхностей [28].

Возникая непосредственно в процессе резания и воздействуя на его явления, трение само зависит от режимов резания, создающих специфические условия для протекания трения, характеризующиеся высокими давлениями в зоне трения, широким диапазоном изменения скоростей и температур, отсутствием окисных пленок на трущихся поверхностях и т. д. [84].

Поэтому проблема стойкости режущих инструментов должна решаться на базе теории внешнего трения материалов, теории пластических деформаций и закономерностей металловедения [44].

Важную роль для установления закономерностей износа играет изучение вопроса о контактных давлениях на передней и задней поверхностях режущего инструмента и факторах, от которых они зависят. Кроме того, на интенсивность износа инструмента большое влияние оказывают пластические и упругие деформации обрабатываемого материала в процессе резания.

Большинство явлений, сопровождающих процесс резания, тесно связаны друг с другом и правильное понимание природы этих явлений невозможно без учета их взаимных связей [25].

Без комплексного исследования влияния режимов и других условий резания на интенсивность износа инструмента, а также на физические характеристики процесса резания, невозможно объяснить характер функций $h_{0,п}=f(v)$ и $h_{0,п}=f(s)$. Изучение характера указанных функций имеет большое значение для создания теории изнашивания режущих инструментов, предвидения практических результатов процесса резания и выбора оптимальных сочетаний параметров и скоростей резания с учетом конкретных требований и условий ведения процесса обработки резанием.

1. Влияние скорости резания на силы и коэффициенты трения на поверхностях инструмента

Многочисленными исследованиями установлено, что одним из главных факторов интенсивности износа инструмента является скорость резания. Поэтому необходимо прежде всего выяснить характер влияния скорости резания на силы и коэффициент трения на поверхностях инструмента.

Наука о трении в настоящее время еще не располагает математическим методом определения зависимости коэффициента трения одновременно от давления, скорости и других факторов, участвующих в процессе резания. Поэтому указанные зависимости приходится устанавливать экспериментальным путем.

Изучением процесса трения при резании металлов стали заниматься сравнительно недавно и этому вопросу посвящено небольшое число исследований, в ходе которых установлено, что коэффициент трения между стальной стружкой и передней поверхностью инструмента при увеличении скорости резания переходит через некий максимум [38], [84], что можно объяснить уменьшением времени контакта стружки с передней поверхностью резца и уменьшением возможности создания адсорбированных пленок и окислов на поверхностях трения [83].

При резании на обычных скоростях с повышением скорости резания происходит повышение температуры на поверхностях инструмента. Возрастание силы трения на передней грани резца будет происходить с повышением скорости резания лишь до определенной величины. Снижение силы трения при дальнейшем повышении скорости резания некоторые исследователи [84] объясняют уменьшением прочности контактного слоя стружки под влиянием возрастающей температуры.

Скорость резания может оказать существенное влияние на силу трения не только как температурный, но и как скоростной фактор, т. е. как скорость деформации. Это имеет особенно существенное значение при резании легкоплавких металлов, для которых с повышением скорости деформации возрастают все характеристики проч-

ности [48]. Как температурный фактор повышение скорости резания снижает прочность контактного слоя стружки и стремится уменьшить силу трения.

Скорость трения как скоростной фактор, повышая упрочнение контактного слоя стружки, должна увеличивать силу трения [84], и в зависимости от того, какой из названных факторов будет оказывать более активное влияние, сила трения на передней грани резца будет увеличиваться, или уменьшаться, или оставаться неизменной.

Главным фактором, оказывающим влияние на коэффициент трения, все же является температура на поверхностях трения. Коэффициент трения при резании сталей и чугунов, изменяясь в широких пределах, зависит непосредственно не от скорости резания и толщины среза, а от температуры в зоне контакта стружки с передней гранью инструмента. Скорость же резания и толщина среза влияют на коэффициент трения лишь постольку, поскольку их изменение изменяет температуру в зоне трения. Это заключение не относится к области очень низких скоростей резания ($v < 1$ м/мин) [84].

Это влияние скорости резания на средний коэффициент трения стружки с передней поверхностью связывается также с влиянием окружающей среды на коэффициент внешнего трения, температуры на сопротивление контактного слоя стружки и площади контакта на удельные нормальные нагрузки на передней поверхности.

Зависимость среднего коэффициента трения от скорости резания по Н. Н. Зореву характеризуется горбообразной кривой, максимум которой при резании стали соответствует температуре около 300°C [25].

При перемещении стружки по передней грани резца наблюдается процесс внешнего трения на участке контакта, удаленном от режущей кромки, и процесс пластического сдвига контактного слоя стружки на участке контакта, непосредственно примыкающем к режущей кромке.

Существование двух различных контактных процессов на передней грани обуславливает двойственную природу касательной силы на контактной поверхности стружки и среднего коэффициента трения. Данные о закономерностях коэффициента внешнего трения, по мнению Н. Н. Зорева, не могут использоваться для объяснения наблюдаемых при резании закономерностей изменения среднего коэффициента трения.

В работе [25] также приводятся данные о снижении коэффициента трения μ' по задней поверхности с повышением скорости резания, особенно интенсивном в диапазоне скоростей резания 10—60 м/мин; при дальнейшем повышении скорости резания коэффициент μ' почти не изменяется.

По мнению И. С. Губкина [19], в зависимости от физико-химического состояния контактных поверхностей и теплофизических свойств металла могут быть два случая изменения коэффициента контактного трения в зависимости от скорости деформации:

а) с повышением скорости коэффициент трения вначале увеличивается и, достигнув максимума при некоторой скорости, затем уменьшается;

б) повышение скорости деформации приводит к непрерывному уменьшению коэффициента контактного трения.

Горбообразный характер кривой коэффициента трения в зависимости от скорости резания И. С. Губкин связывает с наростом. Первый случай, по мнению И. С. Губкина, характерен для железных сплавов, при резании которых образуется нарост, а второй случай характерен для меди, при резании которой нарост обычно не образуется.

Нарост, образующийся при резании металлов, часто является результатом «схватывания» [48]. Термины — адгезия, слипание, холодная сварка, перенос металлов, заедание, схватывание отражают, по мнению В. Д. Кузнецова [48], одно и то же явление, заключающееся в том, что один металл прочно прилипает к другому металлу даже в холодном состоянии. При повышении температуры это прилипание обычно увеличивается.

Для возникновения сцепления необходимо, во-первых, достаточное сближение поверхностей, чтобы начали действовать атомные силы, и, во-вторых, чтобы путем пластической деформации была удалена поверхностная пленка, состоящая из окислов и наклепанного металла, и чтобы произошло соприкосновение чистых металлов [2].

При изменении скорости резания изменяются температура трущихся поверхностей и другие условия, необходимые для возникновения схватывания. А так как самый интенсивный износ обусловлен именно наростами, то объяснение характера изменения сил трения и интенсивности износа при изменении скорости резания может быть дано только на основе изучения характера изменения закономерностей наростообразования и схватывания [48].

2. О взаимосвязи коэффициента трения с интенсивностью износа образцов из различных инструментальных материалов в условиях трения

Опыты показали, что в зоне малых скоростей трения или скольжения ($v < 25$ м/мин) величина коэффициента трения μ образцов из Р18, ВК8, Т15К6, Т30К4 и Т60К6 при сухом трении по стали 45 с увеличением скорости также несколько возрастает и достигает максимума при $v = 25\text{—}30$ м/мин. При дальнейшем увеличении скорости скольжения коэффициент трения уменьшается и, достигнув минимума при некотором значении v , снова начинает возрастать (рис. 127).

При трении образцов из твердого сплава Т15К6 по стали аустенитного класса с различными нормальными удельными давлениями также обнаружена такая скорость скольжения, при которой наблю-

дается минимум коэффициента трения (рис. 128). С повышением нормального удельного давления коэффициент трения снижается.

По данным работы [15] всем инструментальным материалам свойственна общая закономерность изменения износостойкости B

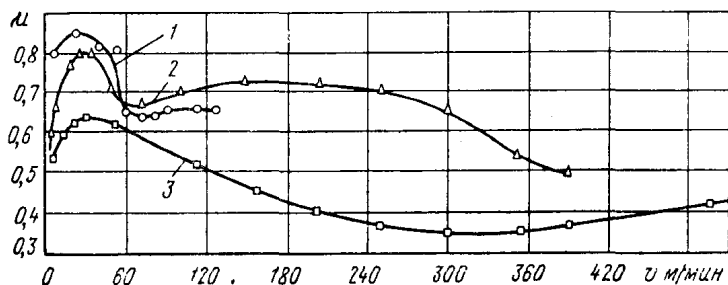


Рис. 127. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при сухом трении по стали 45 (Г. И. Грановский), Нормальное удельное давление $p=98,1 \text{ н/мм}^2$, площадь трения $0,75-3,0 \text{ мм}^2$:

1—P18; 2—BK8; 3—T15K6; T30K4, T60K6

с изменением скорости трения v . С увеличением скорости трения скольжения их износостойкость сначала уменьшается и достигает минимума при $10-20 \text{ м/мин}$, затем увеличивается, достигая максимального значения при определенной скорости, различной для раз-

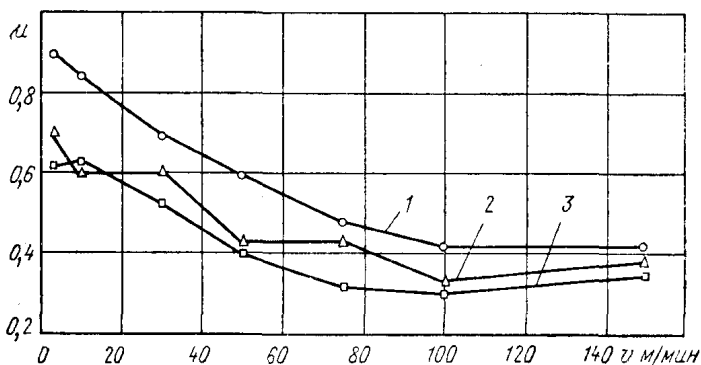


Рис. 128. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при сухом трении сплава T15K6 по стали аустенитного класса (Г. И. Грановский).

Площадь трения $0,75-3,0 \text{ мм}^2$:

1— $p=98,1 \text{ н/мм}^2$; 2— $p=295 \text{ н/мм}^2$; 3— $p=392 \text{ н/мм}^2$

личных марок исследованных материалов. Дальнейшее увеличение скорости скольжения приводит к снижению износостойкости (рис. 129). Сравнение рис. 127 и 129 показывает, что максимум

износостойкости и минимум коэффициента трения наблюдаются при различных скоростях трения.

Сводный график изменения износостойкости B , коэффициента трения μ и температуры трения θ° от скорости сухого трения v образцов из твердых сплавов Т15К6 и Т30К4 по стали 45 приведен на рис. 130 [15], откуда можно прийти к заключению об отсутствии непосредственной и однозначной функциональной связи между указанными параметрами.

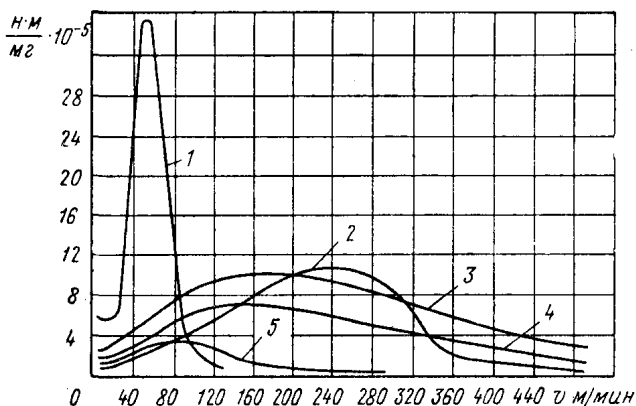


Рис. 129. Влияние скорости скольжения на износостойкость образцов при сухом трении по стали 45 (Г. И. Грановский). Нормальное удельное давление $p=98,1$ н/мм²; площадь трения 0,75—3,0 мм²:

1—Т14К8; 2—Т15К6; 3—Т60К6; 4—Т30К4; 5—ВК8

Необходимо, однако, принять во внимание, что при исследовании износостойкости и процесса трения трудно создать на специальной лабораторной установке те же условия трения и износа, какие наблюдаются в процессе резания.

Так, для образцов из титанокобальтовых твердых сплавов максимум износостойкости при испытании на трение наблюдается при $v=140\div 240$ м/мин, которым соответствуют температуры 160—210° С. Оптимальная же температура контакта при резании, которой соответствует минимальная интенсивность износа твердосплавных инструментов, находится в пределах 725—1000° С. В то же время, как известно, температура является одним из главных факторов, влияющих на коэффициент трения.

По-видимому, такое различие в оптимальных температурах трения и резания и является одной из причин того, что максимум износостойкости для твердого сплава Т15К6 наблюдается при более высокой скорости (и температуре) трения по сравнению с максимумом износостойкости для твердых сплавов Т30К4 и Т60К6, содержащих больший процент карбидов титана (см. рис. 129), тогда как

опыты по резанию углеродистых сталей показывают (рис. 131), что оптимальная скорость резания тем выше, чем больший процент карбидов титана содержит в своем составе твердый сплав [34].

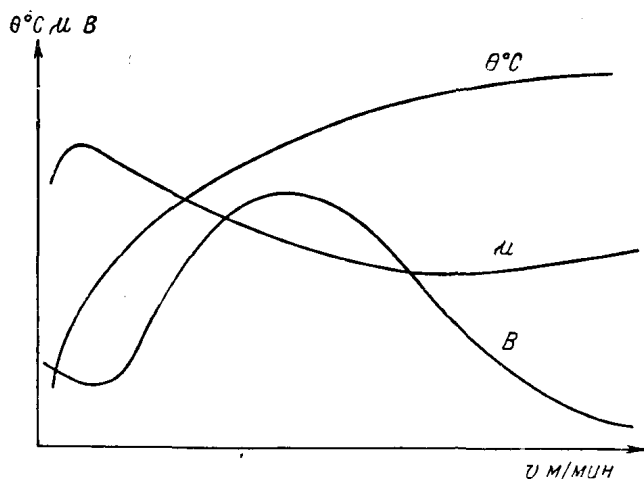


Рис. 130. Сводный график изменения износостойкости, коэффициента трения и температуры от скорости скольжения (Г. И. Грановский)

Точно так же исследования Б. И. Костецкого* показали, что минимум интенсивности износа образцов из твердого сплава по ста-

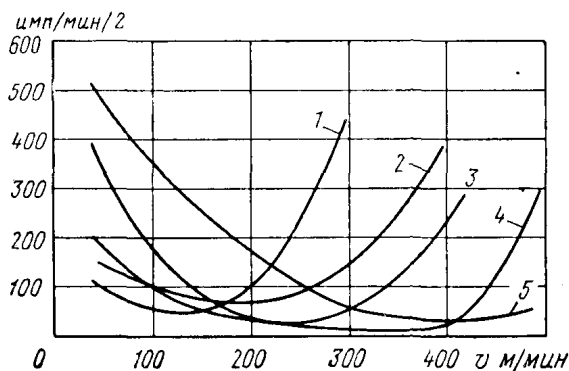


Рис. 131. Зависимость износа твердосплавных резцов от скорости резания при точении стали 50 (Н. Ф. Казаков) ($t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об):

1—Т5К10; 2—Т14К8; 3—Т15К6; 4—Т30К4; 5—Т60К6

ли 20 и закаленной стали 45 наблюдается при одной и той же скорости скольжения $v=105$ м/мин (рис. 132, 133), тогда как в опытах по

* Сб. «Трение и износ при резании металлов», Машгиз, 1955.

резанию стали 20 и закаленной стали 45 оптимальные скорости отличаются между собой более чем в 10 раз, а интенсивность износа резца почти в 30 раз.

Коэффициент трения по задней грани при резании сталей различной твердости будет также различным. Так, повышении твердости стали 40ХНМ от HRC 20 до HRC 46 привело к снижению коэффициента трения от 0,60 до 0,25, т. е. в 2,4 раза [25].

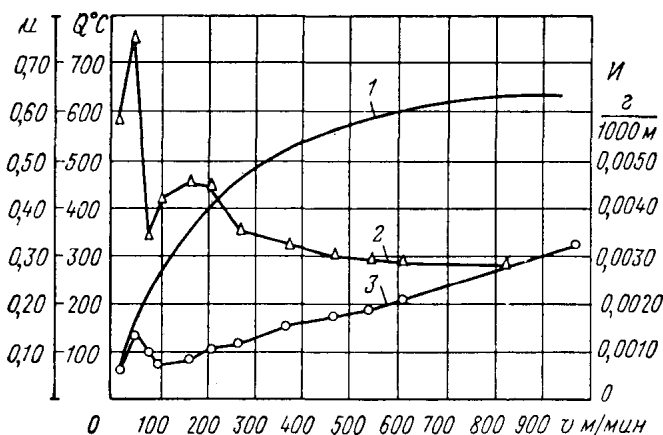


Рис. 132. Зависимость величины износа, коэффициента трения и температуры от скорости скольжения при трении сплава Ti5K6 по стали 20 (Б. И. Костецкий):

1—температура; 2—коэффициент трения; 3—температура износа в $^{\circ}C/1000 м$

Таким образом, опыты по трению твердосплавных образцов хотя и представляют некоторый интерес, но так как условия трения на моделирующей установке резко отличаются от условий работы режущих инструментов, то в такой же степени полученные зависимости износа и коэффициента трения далеки от аналогичных зависимостей при резании металлов. Исследованию характера и роли трения в процессе износа инструмента при обработке жаропрочных и тугоплавких сплавов посвящена работа [86].

На основании исследований авторами были сделаны следующие выводы:

1. Истирающие свойства жаропрочных сплавов соответствуют их обрабатываемости резанием и в значительной степени определяют ее. Чем выше истирающая способность сплава, тем хуже его обрабатываемость.

2. Сравнительная износостойкость инструментальных материалов при трении с жаропрочными сплавами соответствует их относительной стойкости при обработке сплавов резанием.

3. Температура трения и интенсивность износа образца прежде всего зависят от скорости трения, а затем от нормального удельного давления.

4. Отсутствие непосредственной связи между коэффициентом трения и износом инструментального материала при трении с жаропрочными сплавами не позволяет использовать значения коэффициента трения в качестве показателя истирающих свойств сплавов или износостойкости инструментальных материалов.

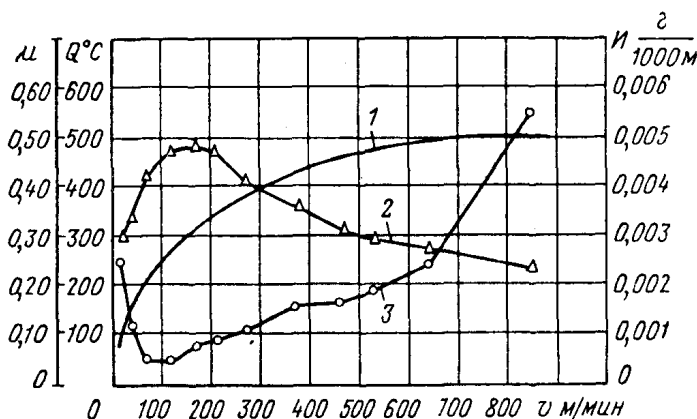


Рис. 133. Зависимость величины износа, коэффициента трения и температуры от скорости скольжения при трении сплава Т15К6 по закаленной стали 45 (НВ 600) (Б. И. Костецкий):

1—температура; 2—коэффициент трения; 3—температура износа в $\text{г}/1000\text{ м}$

5. Изменение скорости трения в диапазоне скоростей, применяемых при резании жаропрочных сплавов, не оказывает заметного влияния на коэффициент трения между жаропрочным сплавом и инструментальным материалом; с увеличением нормального удельного давления коэффициент трения падает.

6. Все способы воздействия на инструмент и на условия резания, уменьшающие трение и схватывание между обрабатываемым сплавом и инструментальным материалом, должны способствовать значительному повышению стойкости инструмента при обработке жаропрочных сплавов резанием.

3. Некоторые элементы механики стружкообразования и определение коэффициента трения при резании металлов

Режущий инструмент находится в контакте с обрабатываемым материалом как по передней, так и по задней поверхностям, благодаря чему на поверхностях инструмента возникают нормальные силы и силы трения.

Между силой стружкообразования R , касательной силой на передней поверхности F и нормальной силой на передней поверхности N существуют зависимости (рис. 134)

$$F = R \sin \theta; \quad (66)$$

$$N = R \cos \theta, \quad (67)$$

где $\mu = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} \theta$ — средний коэффициент трения стружки с передней поверхностью;
 θ — угол трения.

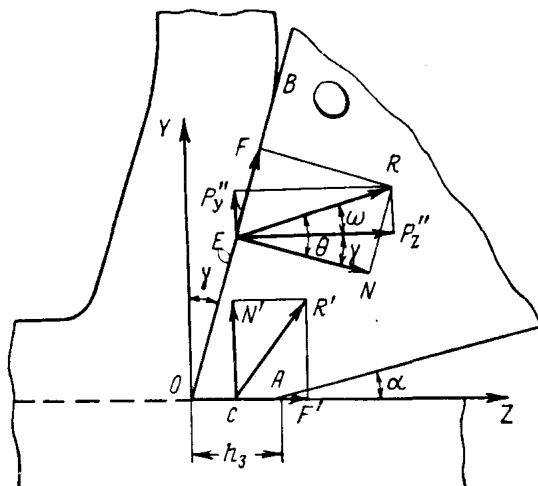


Рис. 134. Схема сил действующих на переднюю и заднюю поверхности инструмента

Между силой R и ее проекциями на оси Y и Z существуют зависимости

$$P_y'' = R \sin \omega; \quad (68)$$

$$P_z'' = R \cos \omega, \quad (69)$$

где ω — угол действия, т. е. угол направления равнодействующей R сил на передней грани резца относительно линии среза.

Так как

$$\omega = \theta - \gamma, \quad (70)$$

то

$$\mu = \operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} (\omega + \gamma). \quad (71)$$

При помощи динамометра измеряются силы P_z и P_y (или P_z , P_y и P_x при несвободном резании).

В свою очередь

$$P_y = P_y'' + P_y' = P_y'' + N' = R \sin \omega + N'; \quad (72)$$

$$P_z = P_z'' + P_z' = P_z'' + F' = R \cos \omega + F'. \quad (73)$$

Из выражений (72) и (73) получаем

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{P_y - N'}{P_z - F'}. \quad (74)$$

Следовательно, формула для определения среднего коэффициента трения стружки с передней поверхностью может быть получена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu = \operatorname{tg}(\omega + \gamma) &= \frac{\operatorname{tg} \omega + \operatorname{tg} \gamma}{1 - \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \gamma} = \frac{\frac{P_y - N'}{P_z - F'} + \operatorname{tg} \gamma}{1 - \frac{P_y - N'}{P_z - F'} \operatorname{tg} \gamma} = \\ &= \frac{(P_y - N') + (P_z - F') \operatorname{tg} \gamma}{(P_z - F') - (P_y - N') \operatorname{tg} \gamma} = \frac{P_y'' + P_z'' \operatorname{tg} \gamma}{P_z'' - P_y'' \operatorname{tg} \gamma}. \end{aligned} \quad (75)$$

При несвободном резании вместо сил P_y , P_y' и P_y'' должны быть поставлены их равнодействующие

$$P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2};$$

$$P'_{xy} = \sqrt{(P'_x)^2 + (P'_y)^2};$$

$$P''_{xy} = \sqrt{(P''_x)^2 + (P''_y)^2}.$$

Следует заметить, что силы P_{xy} , P'_{xy} и P''_{xy} не лежат точно в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке, а отклоняются на некоторый угол ψ_1 от перпендикуляра в сторону составляющей P_y [25], [84]. Угол ψ_1 тем меньше, чем больше отношение t/s и отношение длины рабочей части главной режущей кромки к радиусу сопряжения задних граней.

Отклонение силы P_{xy} от перпендикуляра к главной режущей кромке вносит некоторые ошибки в определение нормальной силы на задней грани, коэффициента трения на задней грани и среднего коэффициента трения стружки с передней поверхностью резца. Эти ошибки незначительны и для упрощения расчетов вполне допустимо их не учитывать [84].

Средний коэффициент трения стружки с передней поверхностью при продольном точении может быть подсчитан по формуле

$$\mu = \frac{(P_{xy} - P'_{xy}) + (P_z - P'_z) \operatorname{tg} \gamma}{(P_z - P'_z) - (P_{xy} - P'_{xy}) \operatorname{tg} \gamma} = \frac{P''_{xy} + P''_z \operatorname{tg} \gamma}{P''_z - P''_{xy} \operatorname{tg} \gamma}. \quad (76)$$

Из формул (75) и (76) следует, что для определения μ необходимо из сил, замеренных динамометром, исключить силы на задней грани резца F' и N' .

Из нескольких методов определения сил на задней грани нами был использован один, основанный на сравнении сил резания при различных износах задней поверхности [25].

При сохранении всех условий резания постоянными и увеличении ширины фаски износа задней поверхности процесс стружкообразования не изменится. Возрастание сил резания ΔP_x , ΔP_y и ΔP_z при увеличении износа резца по задней поверхности h_3 произойдет только благодаря увеличению сил, действующих на заднюю поверхность, так как сила R , действующая на переднюю грань, остается неизменной. Следовательно, приращения сил ΔP_x , ΔP_y и ΔP_z равны приращениям соответствующих сил, действующих на задней поверхности $\Delta P'_x$, $\Delta P'_y$ и $\Delta P'_z$, т. е.

$$\Delta P'_x = \Delta P_x;$$

$$\Delta P'_y = \Delta P_y;$$

$$\Delta P'_z = \Delta P_z.$$

Величины ΔP_x , ΔP_y и ΔP_z определяются как разности показаний динамометра при двух различных значениях ширины фаски износа h_3 .

Так как при обработке различных материалов соблюдается примерно пропорциональная зависимость между шириной фаски износа h_3 и силами P_x , P_y и P_z (рис. 135), то, зная приращение износа Δh_3 , можно определить и сами силы, действующие на задней поверхности при различных значениях h_3 :

$$P'_x = \Delta P_x \frac{h_3}{\Delta h_3};$$

$$P'_y = \Delta P_y \frac{h_3}{\Delta h_3};$$

$$P'_z = \Delta P_z \frac{h_3}{\Delta h_3}.$$

При наличии экспериментальных кривых, выражающих зависимость сил резания от износа задней поверхности, силы на задней поверхности можно определить графически, что и сделано на рис. 135. Например, при ширине фаски износа $h_3 = 0,30$ мм для стали 40ХНМА получились следующие значения сил на задней грани: $P'_x = 140$ н, $P'_y = 210$ н, $P'_z = 15$ н. Силы и коэффициент трения на задней грани в большой степени зависят от свойств обрабатываемых материалов (табл. 33).

Заметим, что при использовании указанного метода с увеличением h_3 необходимо следить за постоянством усадки стружки, что

может быть обеспечено, если периодически подправлять переднюю грань резца, сохраняя тем самым постоянство фактического переднего угла и условий стружкообразования.

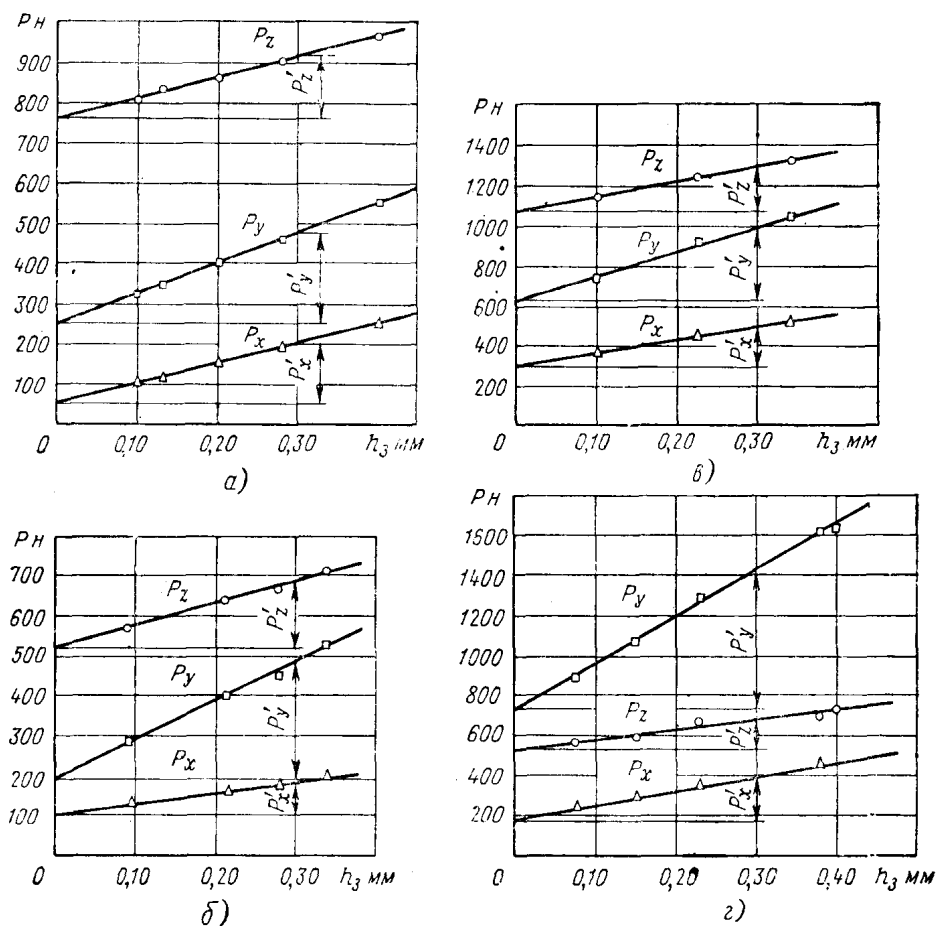


Рис. 135. Влияние ширины фаски износа по задней поверхности на проекции сил резания при точении:

а—сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,30$ мм/об, $v=150$ м/мин; $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$; $r=1$ мм;
 б—сталь 1Х18Н9Т, резец Т14К8; $t=1$ мм; $s=0,20$ мм/об; $v=140$ м/мин; $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$; $r=1$ мм;
 в—сплав ЭИ437А; резец ВК8; $\gamma=10^\circ$; $\phi=45^\circ$; $r=1$ мм; $t=0,50$ мм; $s=0,30$ мм/об;
 $v=30$ м/мин

г—закаленная сталь ЭХ12М HRC 58—59; резец Т15К6; $\gamma_{\text{прод}}=-18^\circ$; $\gamma_{\text{попер}}=0$;
 $\phi=\phi_1=15^\circ$; $r=0$; $t=0,50$ мм; $s=0,16$ мм/об; $v=15$ м/мин.

Удельная работа стружкообразования Q_c может быть подсчитана по формуле

$$Q_c = \frac{P_z''}{ab} = \frac{P_z''}{ts}. \quad (77)$$

Силы и коэффициенты трения при точении различных материалов
($h_3=0,30$ мм)

Обрабатываемый материал	Материал резца	γ°	φ°	Режим резания				Q_F Н/мм ²	q_N Н/мм ²	q_F Н/мм ²	μ	q'_N Н/мм ²	q'_F Н/мм ²	μ'	$R_{оп}$ мк/10 ³ см ²
				$r, мм$	$t, мм$	$S, мм/об$	$v, м/мин$								
40ХНМА	T14K8	10	45	1	1	0,3	150	2485	824	446	0,54	417	242	0,58	1,5
1Х18Н9Т	T14K8	10	45	1	1	0,2	140	2550	940	559	0,635	486	257	0,53	1,9
ЭИ654	BK6	10	45	1	1	0,15	75	3590	873	604	0,69	950	232	0,243	60
ЭИ437А	BK8	10	45	1	0,5	0,30	30	7060	1650	1530	0,93	950	505	0,53	10
ЭХ12М (HRC 58—59)	T15K6	—18	15	0	0,5	0,16	15	6620	3290	2450	0,745	1150	218	0,19	28
ЭХ12М (HRC 62)	T15K6	—25	15	0	0,25	0,20	17	8830	6280	3660	0,584	2200	321	0,146	36

Площадь контакта стружки $f_k = bc$.

Зная нормальное давление и площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, можно подсчитать среднее удельное нормальное давление на передней грани

$$q_N = \frac{P_z'' \cos \gamma - P_{xy}'' \sin \gamma}{bc} \quad (78)$$

Средний коэффициент трения можно рассматривать как отношение удельной касательной нагрузки q_F к удельному нормальному давлению q_N на передней грани

$$\mu = \frac{q_F}{q_N},$$

откуда средняя удельная касательная нагрузка на передней грани будет

$$q_F = \mu q_N \quad (79)$$

По закону Кулона—Амонтона сила трения на задней грани пропорциональна нормальной силе N' , т. е.

$$F' = \mu' N',$$

откуда коэффициент трения на задней грани

$$\mu' = \frac{F'}{N'} = \frac{P_z'}{P_{xy}'} \quad (80)$$

Для определения среднего удельного нормального и касательного давления на задней поверхности резца (q'_N и q'_F) необходимо знать площадь фаски износа задней поверхности f_3 .

Будучи пропорциональной ширине фаски износа h_3 , она может быть определена с помощью инструментального микроскопа или рисовального аппарата. Если известна величина h_3 , от f_3 может быть выражена как произведение суммарной длины рабочих участков режущей кромки на ширину фаски износа задней поверхности [25], [26], т. е.

$$f_3 = h_3 \left(\frac{t}{\sin \varphi} + r \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + s \right). \quad (81)$$

Значения q'_N и q'_F могут быть подсчитаны по уравнениям

$$q'_N = \frac{P'_{xy}}{f_3}; \quad (82)$$

$$q'_F = \frac{P'_z}{f_3}. \quad (83)$$

Коэффициент трения по задней грани может быть выражен через отношение удельных контактных нагрузок в зоне трения

$$\mu' = \frac{q'_F}{q'_N}. \quad (84)$$

4. Влияние скорости резания на контактные явления на передней поверхности инструмента

Процессы, протекающие на передней грани резца, оказывают большое влияние на усилия резания, интенсивность износа режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Ниже рассматривается влияние скорости резания на некоторые характеристики процессов, наблюдаемых на передней поверхности инструмента.

Исследовалось влияние скорости резания на удельное нормальное давление q_N и на удельную касательную нагрузку q_F , средний коэффициент трения стружки с передней поверхностью μ , усадку стружки ξ , ширину контакта стружки с передней поверхностью s и удельную работу стружкообразования Q_c (рис. 136—138).

Приведенные экспериментальные данные показывают, что в диапазоне скоростей резания, характерном для эксплуатации твердосплавного инструмента, усадка стружки и ширина контакта стружки с передней поверхностью резца с повышением скорости резания снижаются. Наиболее интенсивное снижение усадки стружки и ширины контакта наблюдается в зоне относительно низких и средних скоростей резания. При работе с относительно высокими скоростями резания значения ξ и s стабилизируются, а в ряде случаев при достижении некоторой скорости резания начинают возрастать. Стабилизацию усадки стружки при работе на высоких скоро-

стях резания или точки минимума на кривых $\zeta=f(v)$ и $P_z=f(v)$ наблюдали также и другие исследователи.

Удельная работа стружкообразования Q_c с повышением скорости резания при точении стали 40ХНМА и стали 1Х18Н9Т уменьшается примерно в равной степени.

Удельное нормальное давление на передней поверхности q_N при точении стали 40ХНМА резцом Т14К8 и стали 1Х18Н9Т резцом Т30К4 с повышением скорости резания сначала возрастает, а затем, достигнув максимума при некоторой скорости резания, начинает снижаться.

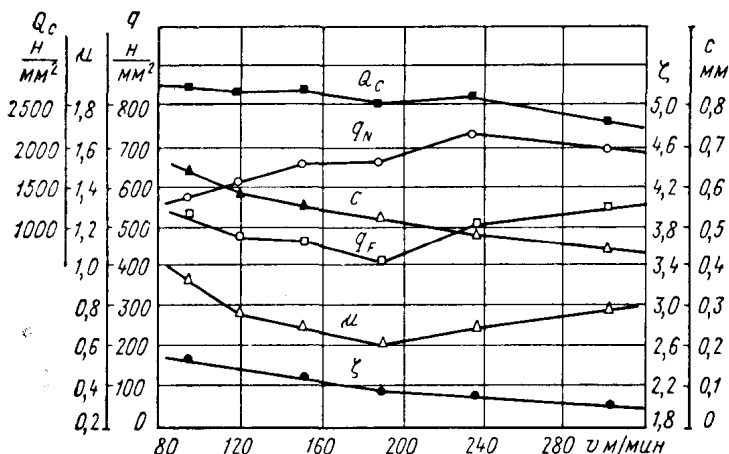


Рис. 136. Влияние скорости резания на q_N , q_F , μ , ζ , s и Q_c

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,21$ мм/об; $\gamma=10^\circ$; $\phi=45^\circ$; $r=1$ мм

Рост q_N указывает на повышение сопротивления материала пластической деформации вследствие увеличения скорости деформирования и упрочнения обрабатываемого материала в процессе деформирования.

Следует отметить, что удельные нормальные давления в разных точках зоны контакта стружки с передней поверхностью не постоянны. Закон изменения удельных нормальных давлений удалось установить лишь с появлением составных резцов и поляризационно-оптического метода. Они максимальны у режущей кромки и равны нулю в точке отрыва стружки от передней поверхности.

При постоянстве нормальной силы на передней грани снижение ширины контакта стружки приводит к повышению q_N . Так как ширина контакта стружки с передней поверхностью при повышении скорости резания здесь снижается, то некоторое снижение величины q_N при работе на высоких скоростях резания связано со снижением силы N [25].

Н. Н. Зорев [25] показал, что влияние всех условий резания на процесс стружкообразования и его характеристики связано с изме-

нением среднего коэффициента трения μ и может быть вскрыто только путем установления влияния этих условий на величину μ .

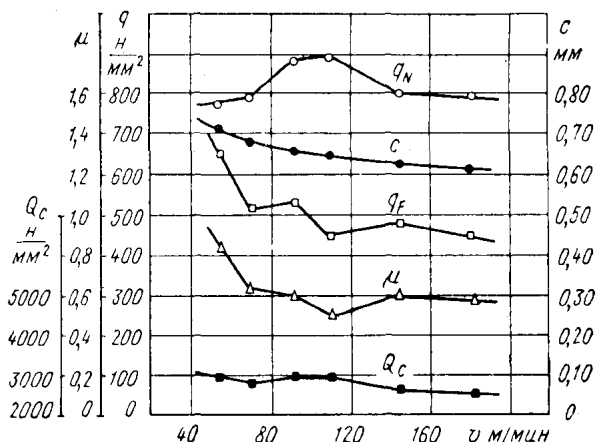


Рис. 137. Влияние скорости резания на q_N , q_F , μ , c и Q_c .

Сталь 1X18H9T, резец Т30К4; $t=0,50$ мм, $s=0,30$ мм/об

Средний коэффициент трения зависит от коэффициента внешнего трения на части контакта стружки с передней поверхностью инструмента, сопротивления сдвигу контактного слоя стружки, площади контакта и удельной контактной нагрузки на передней поверхности.

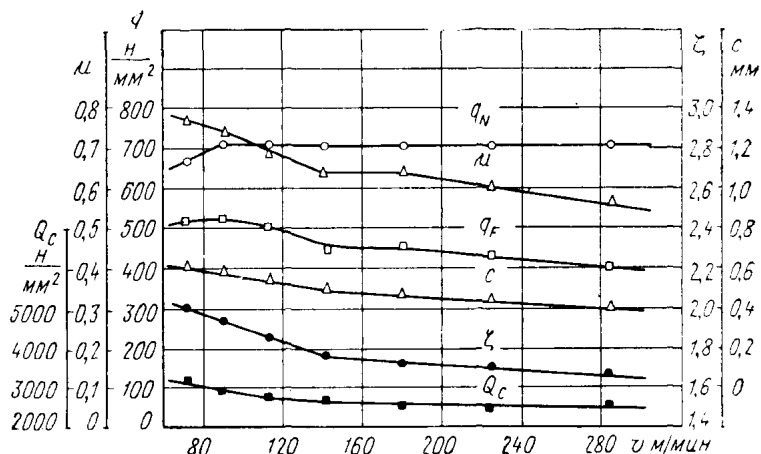


Рис. 138. Влияние скорости резания на q_N , q_F , μ , ζ , c и Q_c .

Сталь 1X18H9T, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об

При повышении скорости резания повышается температура в зоне контакта, изменяется скорость сдвига в нижнем слое стружки и время для «отдыха» этого слоя, уменьшается время контакта стружки с передней поверхностью инструмента, изменяется «доля» зоны застоя в общей зоне контакта. Все это делает зависимость среднего коэффициента трения от скорости резания весьма сложной.

В настоящее время нет возможности установить точные количественные зависимости между различными факторами процесса резания и средним коэффициентом трения. Установление подобного

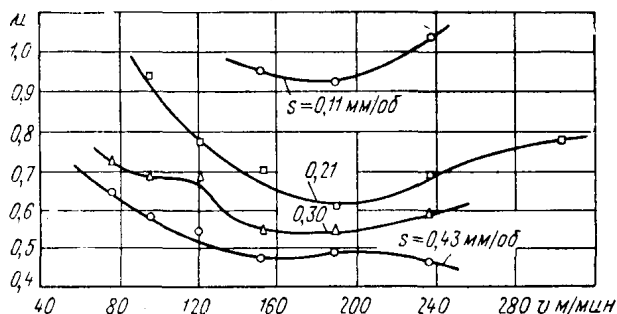


Рис. 139. Влияние скорости резания на μ .

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм; $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$

рода зависимостей потребовало бы учета многочисленных внутренних связей процесса резания. Величину среднего коэффициента трения μ определяют экспериментальными методами.

Данные о влиянии скорости резания на величину μ приведены на рис. 136—139. Рис. 138 показывает, что величина μ при повышении скорости резания в пределах от 70 до 280 м/мин монотонно снижается. Анализ экспериментальных данных в ряде работ [25], [45], [80], [84] также показывает, что в зоне скоростей резания, характерных для твердосплавного инструмента, величина μ с повышением скорости резания в большинстве случаев снижается.

Рис. 136, 137 и 139 показывают, что зависимость $\mu=f(v)$ при некоторой скорости резания имеет точку минимума. Характерно, что чем выше подача, тем меньше величина μ и тем ниже скорость резания, при которой наблюдается минимум величины μ . Точки минимума на кривых $\mu=f(v)$ в ряде случаев были получены также и другими исследователями.

Следовательно, при благоприятном сочетании многочисленных факторов, действующих на величину μ , при некоторых скоростях резания могут наблюдаться ее минимальные значения. Можно полагать, что минимум коэффициента трения при сравнительно высоких скоростях резания связан с образованием окисных пленок на поверхностях контакта, с температурными фазовыми превращения-

ми обрабатываемых материалов, при которых изменяется состояние поверхности, и с началом заметного проявления диффузионных процессов между трущимися поверхностями.

5. Влияние скорости резания на контактные явления на задней поверхности инструмента

Изучение контактных явлений, наблюдаемых на задней поверхности инструмента в процессе резания, представляет большой интерес для объяснения закономерностей интенсивности износа инструмента и образования поверхностного слоя детали. На задней поверхности действует нормальная сила и сила трения. Нормальное давление на задней поверхности является результатом сопротивле-

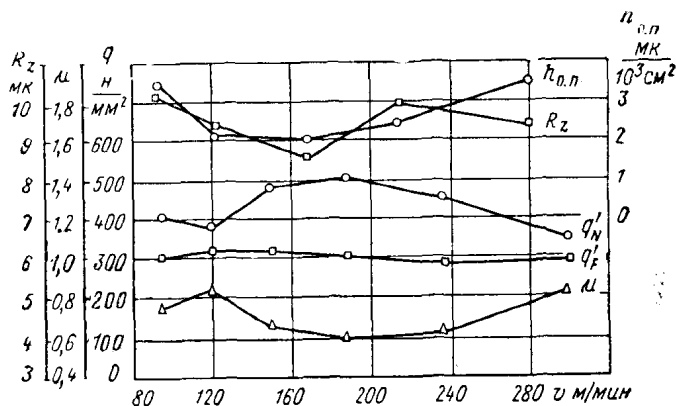


Рис. 140. Влияние скорости резания на q'_N , q'_F , μ , $h_{0.0.1}$ и R_z .

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,21$ мм/об

ния обрабатываемого материала внедрению поверхности площадки контакта и зависит от предела текучести поверхностного слоя обрабатываемого материала, ширины контакта, кривизны краев фаски износа, коэффициента трения по задней поверхности [25].

Зависимость $q'_N = f(v)$ при точении стали 40ХНМА носит немо-
нотонный характер (рис. 140).

Такой же характер зависимости усилия, действующего на заднюю грань со стороны обработанной поверхности, получен в работе [3]. При точении стали 1Х18Н9Т повышение скорости резания приводит к монотонному повышению величины q'_N (рис. 141 и 142).

Опыты показывают, что изменение скорости резания на изменение удельной касательной нагрузки на задней поверхности существенного влияния не оказывает.

Коэффициент трения на задней поверхности μ' при повышении скорости резания или монотонно снижается (рис. 142) или кривая

$\mu' = f(v)$ имеет точку минимума при некоторой скорости резания (см. рис. 140—141). Возрастание коэффициента трения в зоне высоких скоростей резания ($v \geq 320$ м/мин) отмечается и в других работах [21].

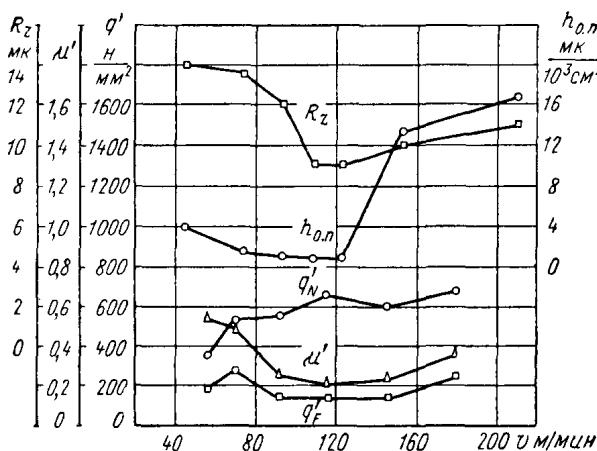


Рис. 141. Влияние скорости резания на q'_N , q'_F , μ' , $h_{0,п}$ и R_z .

Сталь 1Х18Н9Т, резец Т30К4; $t=0,50$ мм, $s=0,30$ мм/об

Однако изменение коэффициента трения μ' при изменении скоростей резания в диапазоне, характерном для эксплуатации твердосплавного инструмента, является несущественным. Характерно, что

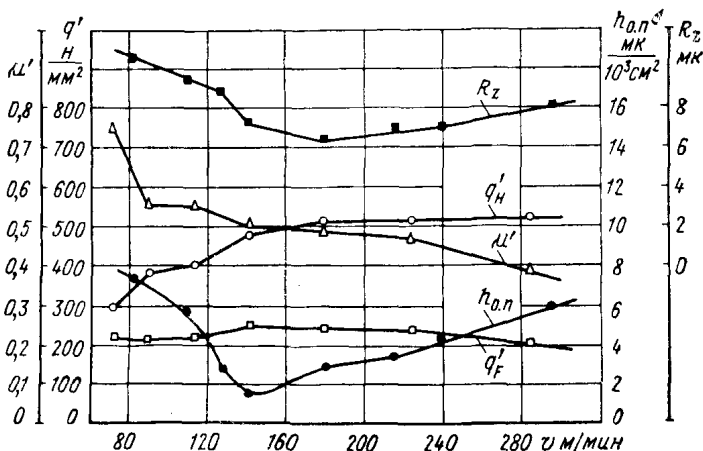


Рис. 142. Влияние скорости резания на q'_N , q'_F , μ' , $h_{0,п}$ и R_z .

Сталь 1Х18Н9Т, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,20$ мм/об

во всех рассмотренных случаях повышение скорости резания до оптимальной величины приводит к снижению коэффициента трения на задней поверхности μ' , повышению удельной нормальной нагрузки q'_N , снижению высоты неровностей обработанной поверхности R_z , к снижению интенсивности износа инструмента.

6. Влияние подачи на контактные явления процесса резания

Ранее нами было установлено, что при работе на сравнительно низких скоростях резания, соответствующих так называемому адгезионному износу режущего инструмента, повышение подачи всегда приводит к монотонному снижению поверхностного относительного износа инструмента.

Исследования показывают (рис. 143), что при работе на низкой скорости резания повышение подачи приводит к росту q'_N , снижению q'_F и резкому снижению μ' . Снижение величин q'_F и μ' действует в сторону снижения интенсивности износа инструмента.

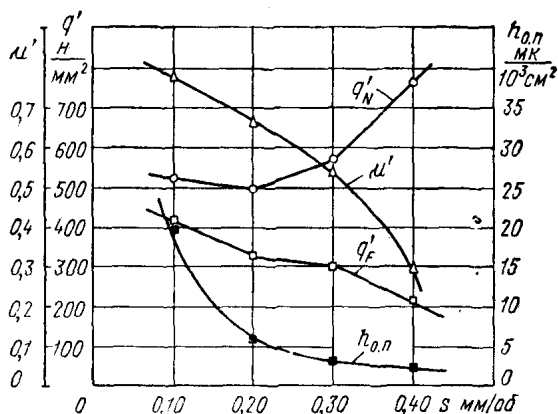


Рис. 143. Влияние подачи на q'_N , q'_F , μ' , $h_{0,п}$ и $h_{0,п}$.

Сталь 1Х18Н9Т; резец Т30К4; $t=0,50$ мм, $v=56$ м/мин

При работе на сравнительно высокой скорости резания (рис. 144) повышение подачи приводит к снижению q'_N и q'_F и повышению μ' . Величина поверхностного относительного износа при работе на низкой и высокой скоростях резания при повышении подачи изменяется аналогично изменению коэффициента трения по задней поверхности.

В случае сохранения постоянства оптимальной температуры резания повышение подачи приводит к снижению усадки стружки, удельной работы стружкообразования, удельной касательной нагрузки на передней поверхности и среднего коэффициента трения по передней поверхности (рис. 145). Следовательно, установленное

ранее Н. Н. Зоревым [25], а также Шоу и др. [111] положение о том, что равным температурам не соответствуют равные средние коэффициенты трения и усадки стружки, оказалось справедливым также применительно и к оптимальной температуре резания.

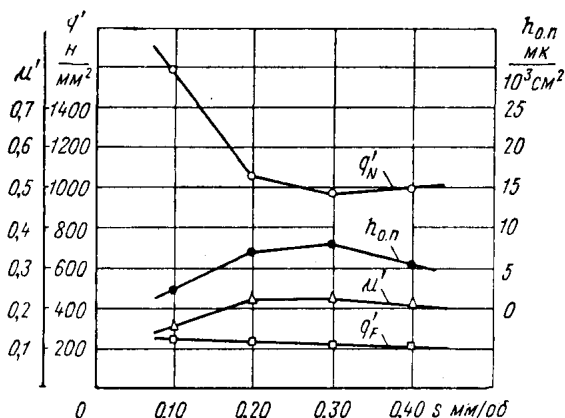


Рис. 144. Влияние подачи на q'_N , q'_F , μ' , $h_{0.п}$ и $h_{0.л}$.

Сталь 1X18H9T; резец Т30К4; $t=0.5$ мм; $v=145$ м/мин

Удельная нормальная и касательная нагрузка на задней поверхности при повышении подачи (при $\theta_o = \text{const}$) снижаются, а коэффициент трения и величина линейного относительного износа остаются без изменений (рис. 146). Естественно, что величина поверхностного относительного износа при этом также снижается.

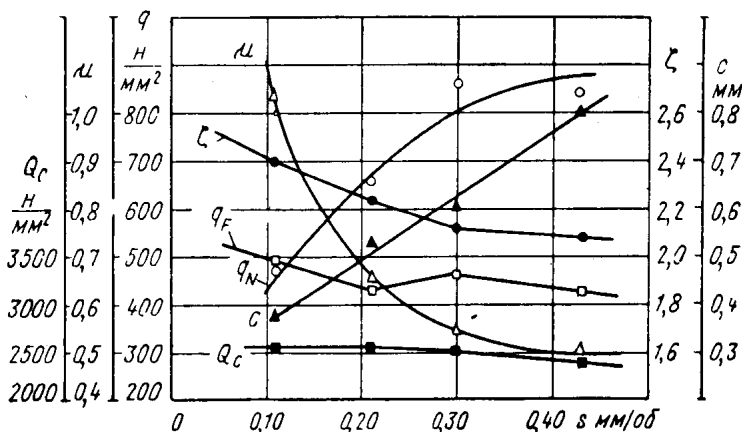


Рис. 145. Влияние подачи на q_N , q_F , μ , ξ , c и Q_c при $\theta_o = \text{const}$.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм; $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$, $r=1$ мм

Анализ приведенных данных показывает, что между μ' и $h_{o,п}$ существует корреляционная взаимосвязь. Когда изменение скорости резания или подачи приводит к снижению μ' , то интенсивность износа инструмента при этом обычно также снижается. Но коэффициент трения является нечувствительной характеристикой интенсивности износа, и взаимосвязь между величинами μ' и $h_{o,п}$ может

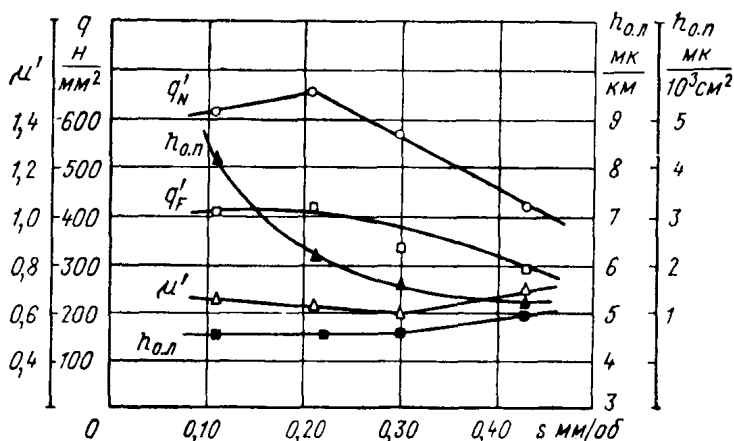


Рис. 146. Влияние подачи на q'_N , q'_F , μ' , $h_{o,п}$ и $h_{o,п}$ при $\theta_o^\circ = \text{const.}$

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм; $\gamma=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $r=1$ мм

наблюдаться лишь в пределах заданной пары: обрабатываемый материал — материал инструмента.

Однако между различными трущимися парами по величинам μ' и $h_{o,п}$ не существует даже корреляционной связи, что видно из табл. 33.

Например, при обработке закаленных сталей наблюдаются более низкие значения μ' , но обработка закаленных сталей сопровождается во много раз более высокой интенсивностью износа инструмента по сравнению с незакаленными сталями.

7. Пластическая деформация поверхностного и срезаемого слоя

Важнейшим критерием правильности выбора условий резания (режим резания, геометрия инструмента и др.) является качество получаемых при обработке поверхностей, так как качество поверхности в значительной мере определяет эксплуатационные свойства деталей и срок службы машин. Важными характеристиками качества поверхностного слоя детали и характеристиками пластической деформации металла, происходящей при резании, являются глубина и степень наклепа обработанной поверхности.

В большинстве исследований наклеп обработанной поверхности рассматривался в отрыве от процесса трения на поверхностях инструмента и без учета явлений, происходящих в зоне образования стружки. Не было и попыток увязать глубину наклепа и микротвердость поверхностного слоя с интенсивностью износа режущего инструмента и его размерной стойкостью. В то же время исследования пластической деформации срезаемого слоя и поверхностного слоя детали имеют большое значение для познания закономерностей интенсивности износа инструмента и раскрытия физической сущности явлений, обуславливающих существование так называемой оптимальной температуры резания.

Наиболее обобщенными характеристиками пластической деформации являются наклеп поверхностного слоя детали и микротвердость прирезцової стороны стружки H_3 . Главным фактором, влияющим на указанные характеристики пластической деформации, является скорость резания.

Механизм влияния скорости резания на наклеп поверхностного слоя достаточно сложен, и пути этого влияния достаточно многообразны.

1. Скорость резания определяет скорость деформации поверхностного слоя. Известно [107], что с повышением скорости деформации происходит рост предела прочности и предела текучести стали, причем предел текучести растет быстрее предела прочности. С повышением предела текучести, а следовательно, с понижением пластичности обрабатываемого материала степень и глубина наклепанного слоя уменьшаются [99]. Таким образом, повышение скорости резания как скоростной фактор действует в сторону уменьшения наклепа. Но скорость резания оказывает непосредственное влияние также и на деформацию срезаемого слоя [25]. Так, при свободном резании стали 30X ($b=5$ мм; $a=0,149$ мм; $\gamma=10^\circ$) усадка стружки при скорости резания 0,6 м/мин составляет 4,2 против 2,2 при скорости резания 140 м/мин, хотя при работе на указанных скоростях нарост отсутствует и наблюдаются почти одинаковые средние значения μ .

2. Скорость резания определяет продолжительность контакта задней поверхности резца с изделием.

Можно полагать, что снижение скорости резания, увеличивающее продолжительность контакта, создает лучшие условия для наиболее полной деформации поверхностного слоя, тогда как при большой скорости резания поверхность детали проходит через зону контакта, не получив того наклепа, который она могла бы получить при малой скорости резания.

3. Скорость резания влияет на значения q'_N , q'_F и μ' . Повышение величин q'_N , q'_F и μ' , очевидно, способствует повышению наклепа, так как при отсутствии контактных нагрузок и трения на задней поверхности не может быть наклепа обработанной поверхности.

Трение обусловлено в первую очередь силами адгезии на участках реального контакта резца и детали. При соприкосновении поверхности контактируются своими выступающими участками и давление на этих участках становится достаточным для пластического течения и непосредственного контакта чистых поверхностей. В таких участках наблюдается холодное сваривание. Чем сильнее развивается явление схватывания или сваривания, тем больше коэффициент трения, тем больше наклепываемая поверхностный слой [28], [44].

Повышенному трению соответствует более высокий градиент скоростей перемещения отдельных слоев. Разные скорости движения отдельных слоев **возможны** только при их относительном скольжении, сопровождающемся деформацией зерен металла и преодолением сил внутреннего трения [72]. Чем больше градиент скоростей, тем больше наклеп обработанной поверхности.

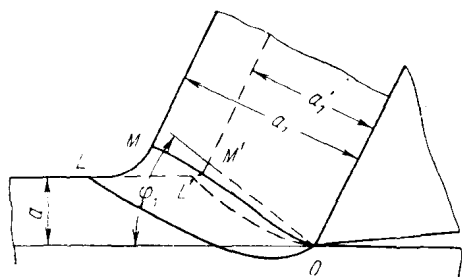


Рис. 147. Схема влияния скорости деформации на ширину и расположение зоны стружкообразования (Н. Н. Зорев)

4. Скорость резания определяет положение начальной границы зоны стружкообразования (пластической зоны) относительно линии среза.

По искажению координатной сетки, нанесенной на боковой стороне срезаемого слоя, В. А. Кривоухов [47] установил, что начальная граница пластической зоны от вершины резца уходит под линию среза и лишь на значительном расстоянии от вершины резца пересекает ее.

Анализ корней стружек, снятых при различных скоростях резания, показывает, что при повышении скорости резания до некоторой величины происходит сужение пластической зоны [25] и значительное смещение начальной границы (из положения OL в положение OL'), что действует в сторону уменьшения наклепа (рис. 147). Таким образом, процесс образования поверхностного слоя детали зависит от условий стружкообразования и контактных процессов на передней поверхности.

5. Скорость резания влияет на степень развития нароста или застойной зоны и характер обтекания и подмятия металла из зоны стружкообразования в сторону задней грани. В некотором диапазоне скоростей резания на передней грани резца появляется нарост, который увеличивает действительный радиус скругления режущей кромки и тем самым способствует повышению наклепа.

6. Скорость резания определяет температуру резания и влияет на изменение интенсивности процесса разупрочнения. При пластическом деформировании в поверхностных слоях металла одновре-

менно протекают два процесса — наклеп и разупрочнение. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. При повышении скорости резания происходит рост температуры резания, что способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению наклепа.

7. Скорость резания способствует самозакаливанию поверхностного слоя и наклепу при фазовом превращении, вследствие его разогрева до температур, превышающих температуру критической точки AC_3 .

8. Скорость резания влияет на величину отношения скорости деформации поверхностного слоя к скорости процесса рекристаллизации (разупрочнения). Разупрочнение происходит с некоторой конечной скоростью, которая зависит от температуры и степени деформации. Если скорость деформации превосходит скорость рекристаллизации, то будет наблюдаться явление частичного наклепа металла, несмотря на то, что деформация будет производиться при температуре, превышающей температуру рекристаллизации [97].

Таким образом, наклеп, наблюдаемый на обработанной поверхности детали, определяется совокупным действием рассмотренных факторов.

При повышении скорости резания (в диапазоне скоростей, характерных для эксплуатации твердосплавного инструмента) факторы 1, 2, 4, 5, 6 действуют в сторону снижения наклепа, а факторы 7 и 8 — в сторону повышения наклепа. Фактор 3 при повышении скорости резания до оптимальной величины снижает величину наклепа, а при дальнейшем повышении скорости резания в ряде случаев повышает.

Действие факторов 3, 4, 5 главным образом проявляется в диапазоне относительно низких и средних скоростей резания. Следовательно, при повышении скорости резания в указанном диапазоне скоростей следует ожидать наибольшего уменьшения микротвердости обработанной поверхности и глубины наклепанного слоя h_c .

При дальнейшем повышении скорости резания число факторов, действующих в сторону уменьшения наклепа, снижается и начинает сказываться действие факторов, которые способствуют повышению наклепа.

Следовательно, микротвердость обработанной поверхности и глубина наклепа при повышении скорости резания в диапазоне относительно высоких скоростей резания могут оставаться примерно постоянными или даже повышаться.

Характер влияния скорости резания на микротвердость прирезцовой стороны стружки, по-видимому, будет примерно таким же. Опыты Лейензеттера подтверждают, что влияние скорости резания на глубину наклепа и усадку стружки является однозначным.

В настоящее время невозможно представить влияние скорости резания на наклеп обработанной поверхности в аналитической форме. Зависимости $H=f(v)$ и $h_c=f(v)$ определяются эксперименталь-

ными методами. В наших опытах глубина наклепа определялась измерением микротвердости слоев, залегающих на разных горизонтах, методом косых срезов. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду 0,5 и 1 н. Фактический угол косого среза на разных образцах находился в пределах от $1^{\circ}15'$ до $2^{\circ}56'$. Экспериментальные точки определялись как среднее из трех значений твердостей на одной и той же глубине.

Опыты проводились при точении стали 40ХНМА резцом Т14К8 при $t=1$ мм; $s=0,21$ мм/об; $v=60\div300$ м/мин.

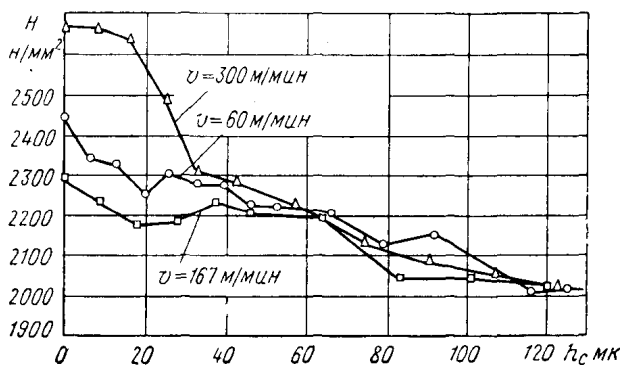


Рис. 148. Микротвердость слоев, различно удаленных от поверхности.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,21$ мм/об

Из зависимостей $H=f(v)$ и $h_c=f(v)$ (рис. 148—149) следует, что при повышении скорости резания от 60 до $v_0=167$ м/мин микротвердость обработанной поверхности и глубина наклепа снижаются, а при дальнейшем увеличении скорости резания — повышаются.

Это повышение связано с ростом μ' (фактор 3), с явлением неполной закалки поверхностного слоя (фактор 7) и с изменением величины отношения скорости деформации поверхностного слоя к скорости процесса разупрочнения (фактор 8).

Следует отметить, что точки минимума на кривых $H=f(v)$ и $h_c=f(v)$ наблюдали и другие исследователи [8], [99].

Небольшой провал кривых $H=f(h_c)$ для слоев, залегающих на глубине 20—30 мк, по-видимому, связан с частичным разупрочнением. Это предположение базируется на анализе температурного поля подрезцово́й зоны и данных о температуре рекристаллизации.

Совместное рассмотрение кривых $H=f(v)$ и $H_3=f(v)$ показывает, что между значениями микротвердости поверхностного слоя детали и прирезцовой стороны стружки существует тесная взаимосвязь. Точки минимума на указанных кривых наблюдаются при

одной и той же скорости резания. Наличие взаимосвязи между H и H_3 было установлено также в работе [72].

Следует отметить, что чем выше подача, тем ниже скорость резания, при которой наблюдается минимум микротвердости прирез-

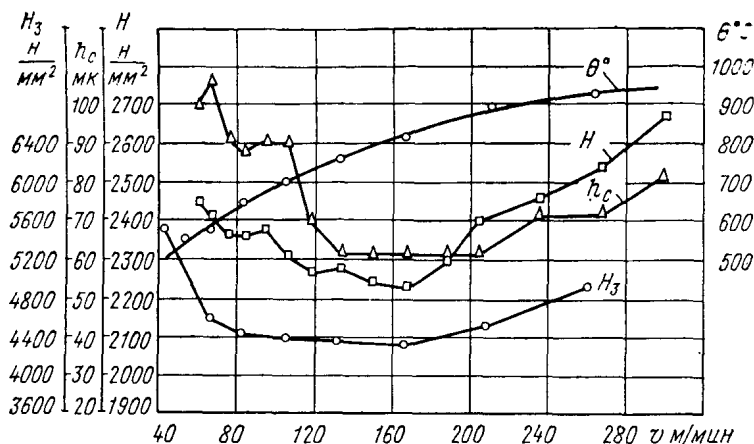


Рис. 149. Влияние скорости резания на θ° , H , h_c и H_3 .

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0,21$ мм/об

цовой стороны стружки (рис. 150). Температура резания, соответствующая точкам минимума кривых $H_3=f(v)$, для разных подач является примерно постоянной и близкой к оптимальной температуре, при которой наблюдается минимальная интенсивность раз-
мерного износа резца.

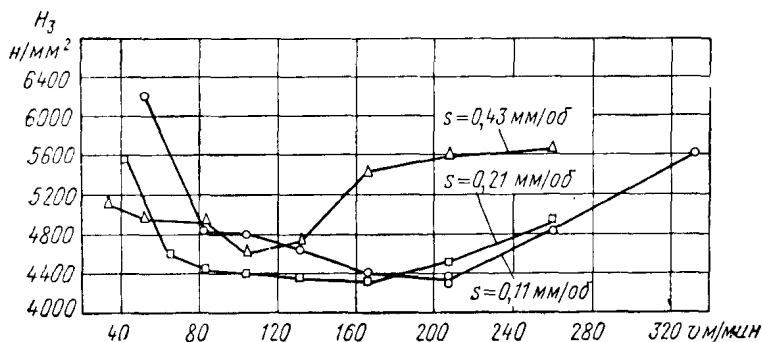


Рис. 150. Влияние скорости резания на микротвердость прирезцовой стороны стружки при точении стали 40ХНМА резцом Т14К8 ($t=1$ мм)

Точки минимума на кривых $H_3=f(v)$ отмечаются и в других исследованиях [33], [52], [72].

Характерно, что при точении стали ЭИ736 стабилизация микротвердости прирезцовой стороны стружки, или точки минимума на кривых $H_3=f(v)$, для разных подач наблюдается при различных скоростях резания, которым соответствует $\theta_0 = \text{const}$ (рис. 151).

Работами [72] и [84] установлено, что микротвердость прирезцовой стороны стружки H_3 характеризует касательные напряжения, наблюдаемые в процессе резания, и что минимуму H_3 соответствует минимум касательных напряжений в зоне образования стружки.

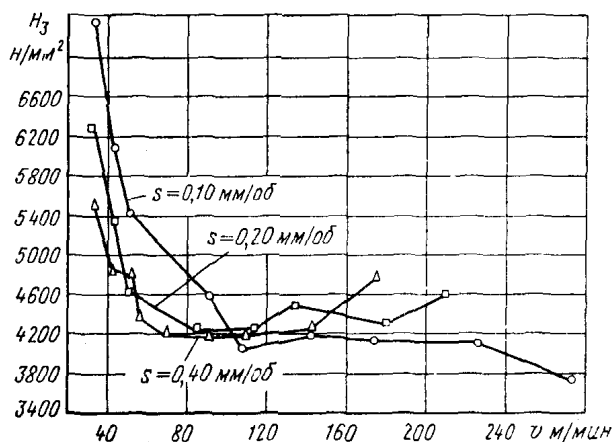


Рис. 151. Влияние скорости резания на микротвердость прирезцовой стороны стружки при точении стали ЭИ736 резцом Т14К8 ($t=1$ мм)

Как известно, во время рекристаллизации освобождается и выделяется в форме тепла скрытая энергия наклепа. По данным С. С. Штейнберга [97] для железа выделение тепла происходит при температуре около 550° . А. М. Даниелян установил, что при точении стали 40Х ($t=1,5$ мм; $s=0,12$ мм/об) с повышением скорости резания при прочих равных условиях температура стружки сначала повышается, а затем, начиная со скорости резания $v \approx 300$ м/мин, начинает снижаться. Аналогичное явление установлено Г. М. Яковлевым [100] при фрезеровании сталей 20Х, 40Х, У10. Подобное снижение температуры стружки при высокой скорости названные авторы объясняют уменьшением объема пластической деформации стружки из-за явления синеломкости, которое при ударном нагружении проявляется при температуре $500-600^\circ$ С. Наши же опыты показывают (рис. 149—150), что при высоких скоростях резания наблюдается даже некоторый рост объема пластической деформации, о чем свидетельствует повышение величин H , h_c и H_3 . Максимум температуры стружки, по нашему мнению, связан с выделением тепла за счет частичной рекристаллизации. Средняя темпе-

ратура стружки при этом составляет 530—540° С, что вполне удовлетворительно согласуется с величиной температуры, при которой в обрабатываемом материале происходит выделение тепла за счет рекристаллизации.

Можно предположить, что минимум микротвердости стружки и минимум касательных напряжений в зоне образования стружки наблюдаются при работе с такими скоростями резания, при которых стружка приобретает среднюю температуру, равную температуре рекристаллизации. Эта температура находится внутри интервала температур, соответствующих наименьшей ударной вязкости.

8. О взаимосвязи между интенсивностью износа инструмента и основными факторами процесса резания

Многочисленными опытами, рассмотренными в предыдущих главах, было установлено, что зависимость $h_{0.п} = f(v)$ при обработке углеродистых, легированных и закаленных сталей, а также жаропрочных сталей и сплавов твердосплавными инструментами носит экстремальный характер. Это позволяет разделить причины износа инструмента на две различные группы, действующие при изменении скорости резания в прямопротивоположных направлениях (рис. 152).

При скорости резания выше оптимальной повышается интенсивность износа инструмента, что соответствует общепринятой стойкостной зависимости

$$v = \frac{C_v}{T^m}.$$

Повышение интенсивности износа при повышении скорости и температуры резания против их оптимальных значений происходит в силу действия следующих основных факторов:

1) усиления диффузионных процессов между обрабатываемым и инструментальными материалами;

2) удаления инструментального материала из зон контакта (передняя грань — стружка, задняя грань — поверхность резания) вследствие пластического течения тончайших контактных слоев инструмента, получивших пластичность под действием высоких температур;

3) ослабления защитного действия образующейся на поверхностях контакта пленки окисла;

4) повышения шероховатости контактных поверхностей инструмента и улучшения условий для механического зацепления неровностей и их разрушения.

Наличие диффузионного взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами при высоких температурах контакта установлено рядом исследований [52], [34], [109], [113].

Повышение скорости резания и температуры контактных поверхностей приводит к повышению коэффициента диффузии, часто зависящего от температуры в соответствии с законом:

$$D = D_0 e^{\frac{H''}{RT}}, \quad (85)$$

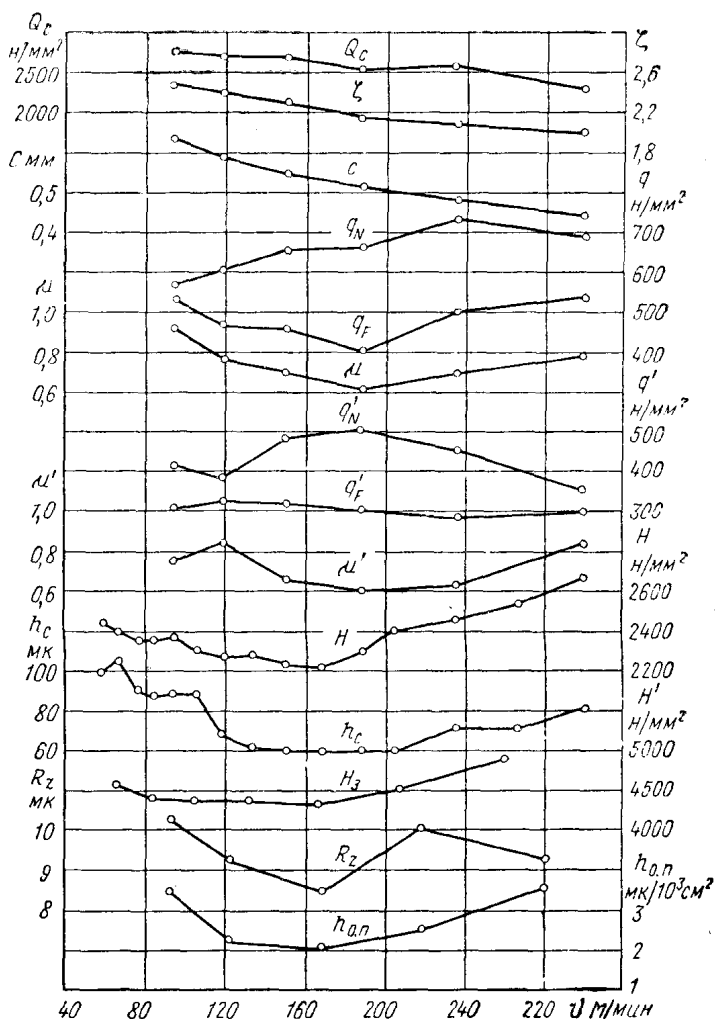


Рис. 152. Влияние скорости резания на основные характеристики процесса резания.

Сталь 40ХНМА, резец Т14К8; $t=1$ мм, $s=0.21$ мм/об, $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$,
 $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $r=1$ мм

где D — коэффициент диффузии в $см^2/сек$;

D_0 — предэкспоненциальный множитель, который формально равен коэффициенту диффузии при температуре, равной бесконечности;

H'' — теплота разрыхления или энергия активации для данного процесса, отнесенная к моллю твердого раствора;

R — газовая постоянная;

T — температура в $^{\circ}\text{K}$.

Экспериментальные значения [18] коэффициента диффузии вольфрама в сталь следующие:

t $^{\circ}\text{C}$	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
$D_w \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{сек}$	0,4	0,9	3,8	6	13	7,5	15	17	44	190	230	360

Из формулы (85) и приведенных экспериментальных данных следует, что повышение температуры оказывает очень сильное влияние на интенсивность диффузионных процессов. По данным отдельных исследователей [100], повышение температуры на 100°C увеличивает скорость диффузии примерно в 1024 раза по сравнению с ее исходной величиной. Расчеты показывают, что при высоких температурах контакта расчетная масса продиффундировавшего вещества оказывается близкой к массе изношенного объема твердого сплава [52]. Следовательно, повышение скорости и температуры резания против их оптимальных значений для данной пары твердый сплав — обрабатываемый материал приводит к повышению диффузионного износа, который в ряде случаев может оказать существенное влияние на суммарный износ режущего инструмента. Следует отметить, что в настоящее время еще нет возможности достаточно уверенно рассчитывать интенсивность износа инструмента на основе диффузионных процессов, так как многие данные по диффузии в металлах являются ненадежными [39].

Износ твердосплавных инструментов при высоких скоростях резания может происходить как результат удаления инструментального материала из зон контакта вследствие пластического течения контактных слоев. Структурные превращения, которые вызываются растворением карбидного каркаса в кобальтовой связке при высоких температурах контакта [34], по-видимому, способствуют пластическому течению тонких слоев инструментального материала и своеобразному «намазыванию» кобальтовой составляющей на поверхность изделия и стружки.

Рядом исследований [34], [44], [100] установлено, что на поверхностях контакта образуются пленки окисла толщиной от 10 до $150\text{\AA}$.

Вопрос о скорости образования первичной пленки окисла, несмотря на его актуальность, еще недостаточно изучен. По данным Таммана достаточно $0,05 \text{ сек}$ для образования слоя окисла толщиной $14\text{\AA}$ при температуре 15°C . Скорость химических процессов зависит от температуры. Поэтому при высоких температурах и ювенильной поверхности скорость окисления будет значительно выше. По данным В. И. Архарова образование пленки окисла толщиной в несколько ангстрем осуществляется практически мгновенно. Громадная степень пластического деформирования поверхностей, образующихся при резании металлов, безусловно ускоряет про-

цесс окисления и протекание других химических реакций. Известно, например, что скорость диффузии в разрушаемый металл увеличивается в 10^6 раз. Скорость образования пленки окисла соизмерима со скоростью нагрева; нагрев же до 1000°C в 10^{-6} сек является обычным явлением для зоны микровывлечений контакта.

Пленки окислов оказывают значительное влияние на интенсивность износа трущихся поверхностей. В случае прочного соединения с телом они могут уменьшить интенсивность износа. При слабом соединении с поверхностью и непрерывном разрушении они могут усиливать трение и износ трущихся поверхностей [44]. Убедительным доказательством

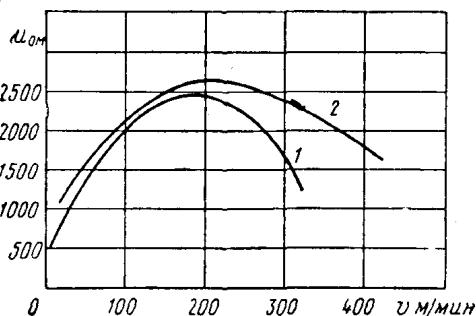


Рис. 153. Влияние скорости резания на омическое сопротивление зоны скользящего контакта (Г. М. Яковлев)

Сталь 30, резцы Т15К6:
1—точение ($t=2$ мм, $s=0,30$ мм/об, $\gamma=10^\circ$); 2—
фрезерование ($t=1$ мм, $s_z=0,30$ мм/зуб)

омического сопротивления (рис. 153), что автор объясняет образованием пленки окисла, которая препятствует непосредственному металлическому контакту, увеличивает омическое сопротивление и экранирует действие молекулярных сил.

При скоростях резания, соответствующих максимуму омического сопротивления, Г. М. Яковлев наблюдал улучшение чистоты обработанной поверхности, уменьшение сил трения и их флуктуации и снижение интенсивности износа инструмента.

Можно полагать, что работа на оптимальных скоростях резания, соответствующих минимальной интенсивности износа твердосплавных инструментов, будет соответствовать максимуму омического сопротивления зоны скользящего контакта.

Факторы, действующие при повышении скорости резания в сторону снижения интенсивности износа, следующие:

1) уменьшение размера частиц твердого сплава, вырываемых с трущихся поверхностей инструмента при разрушении мест схватывания;

2) уменьшение интенсивности абразивного износа инструмента

карбидными или другими твердыми включениями, имеющимися в обрабатываемом металле.

Радиографические снимки, полученные с обработанных поверхностей и стружек, а также снимки контактных поверхностей инструмента показывают, что износ инструмента носит дискретный характер не только при работе на низких и средних скоростях резания, но также и на высоких скоростях резания [34], [100]. Следовательно, износ инструмента за счет адгезионного взаимодействия контактных поверхностей наблюдается при любых температурах контакта. Размеры частиц, вырываемых с поверхностей инструмента при разрушении мест схватывания, особенно велики при резании на средних скоростях, способствующих интенсивному схватыванию и наростообразованию. В зоне высоких скоростей резания размеры вырванных частиц резко уменьшаются, и места вырыва на контактных поверхностях могут быть обнаружены лишь при очень большом увеличении. Уменьшению размеров вырванных частиц способствует уменьшение времени контакта и изменение отношения твердостей контактных поверхностей H_1/H_2 .

При любых скоростях резания и температурах контакта наблюдается также и абразивно-механический или просто абразивный износ инструмента. Если допустить, что при высоких скоростях резания нет абразивного износа, то, очевидно, интенсивность износа инструмента при высоких температурах контакта не должна была бы зависеть от особенностей структуры и твердости сталей в исходном состоянии.

Однако исследования Э. И. Фельдштейна [95] показывают, что особенности структуры сталей в исходном состоянии при их обработке с высокими скоростями резания ($v=300\div350$ м/мин) продолжают оказывать решающее влияние на интенсивность износа инструмента. Аналогичный вывод следует также и из наших опытов по точению стали ЭХВГ различной структуры и твердости (см. рис. 79).

Наиболее сильно действие абразивного износа проявляется при работе на сравнительно низких скоростях резания. В зоне высоких скоростей резания абразивное действие карбидов оказывает несколько меньшее влияние на интенсивность износа инструмента, что вытекает из анализа экспериментальных данных по точению сталей с различной структурой и твердостью [61], [95].

При работе на высоких скоростях резания может происходить пластическое опускание вершины, которое наблюдается не только у твердосплавных резцов, но также и у резцов, оснащенных минеральной керамикой. При пластическом деформировании режущей кромки резко изменяются геометрические параметры режущей части инструмента, что наряду с размазыванием материала инструмента по обрабатываемой поверхности и стружке является дополнительной причиной повышения интенсивности износа инструмента. В ряде случаев пластическая деформация становится основной причиной выхода резца из строя.

Диффузионные явления, помимо непосредственного влияния на интенсивность износа инструмента, оказывают и косвенное влияние. Так, повышение коэффициента диффузии, вызываемое повышением температуры контакта, в ряде случаев может привести к повышению коэффициента трения между трущимися поверхностями. Последние из-за повышенной при нагревании подвижности атомов становятся «кинематически» более шероховатыми. Увеличение шероховатости поверхностей происходит также из-за неравномерности диффузии зерен твердого сплава и обрабатываемого материала и непрерывного взаимного проникновения атомов через отдельные наиболее выступающие участки реальных поверхностей. Повышение шероховатости контактных поверхностей и повышение коэффициента трения между ними приводит к повышению интенсивности износа инструмента.

Кроме того, повышение коэффициента трения, приводящее к повышению наклепа обработанной поверхности и микротвердости прирезцово-й стороны стружки, повышает интенсивность износа также и через указанные факторы, так как наклеп в зоне резания и стружки усиливает износ инструментов [80]. Таким образом диффузионные процессы могут влиять на интенсивность износа инструмента по меньшей мере четырьмя путями, но в ряде случаев это косвенное влияние может и отсутствовать.

Снижение коэффициента диффузии, независимо от причин, по которым оно произошло, приводит к замедлению диффузионного износа инструмента. Зависимость коэффициента диффузии от температуры в ряде случаев не монотонна.

● Например, П. А. Грузин [18] установил, что в интервале температур 900—1100°С наблюдается резкое уменьшение коэффициентов диффузии кобальта, хрома и вольфрама в железо и сталь. Указанное явление П. А. Грузин объясняет фазовым превращением, совершающимся в железе и стали при нагреве до температуры диффузионного отжига.

Характерно, что в указанном же интервале температур на кривых $\sigma_v = f(\theta^\circ)$ и $H = f(\theta^\circ)$ [51] наблюдается горб (рис. 154). По-видимому, не является случайным тот факт, что минимум интенсивности износа твердосплавного инструмента часто наблюдается именно в этом интервале температур.

Экстремальный характер интенсивности износа инструмента в зависимости от скорости и температуры резания объясняется совокупным действием многих причин. Уменьшение коэффициента диффузии в определенном интервале температур мы рассматриваем как одну из возможных причин существования этого интересного физического явления.

При снижении скорости и температуры резания против их оптимальных значений характер износа инструмента также изменяется. В этом случае износ твердого сплава происходит главным образом за счет вырывания его частиц вследствие явления адгезии (схватывания, сваривания).

Снижение скорости резания против ее оптимального ~~39145222~~ приводит к повышению интенсивности износа в силу того, что ~~252-~~ действуют следующие факторы:

- 1) уменьшение отношения твердостей H_1/H_2 поверхностей контакта инструментального и обрабатываемого материалов;
- 2) повышение коэффициентов трения на поверхностях инструмента вследствие разрушения поверхностных пленок и трения между более чистыми поверхностями;
- 3) повышение объема пластической деформации, выражающееся в повышении наклепа обработанной поверхности, удельной ра-

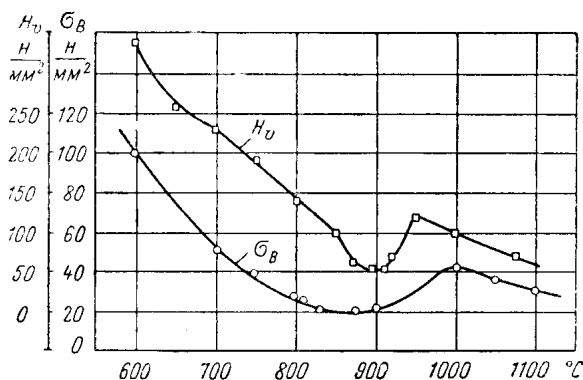


Рис. 154. Изменение твердости карбонильного железа и предела прочности при растяжении технического железа при нагреве:

H_v — по М. Г. Лозинскому; σ_v — по Н. Ф. Лашко, В. Г. Петренко и Г. Я. Слободянюку

боты стружкообразования, усадки стружки и микротвердости ее прирезковой стороны (см. рис. 152);

- 4) увеличение возможностей для абразивного действия карбидов, которые при работе на более низких скоростях резания наиболее прочно удерживаются в поверхностных слоях стружки и детали.

Повышение интенсивности износа инструмента при уменьшении отношения H_1/H_2 вытекает из уравнения переноса материала при схватывании [52]

$$M = CGvT \frac{H_2}{H_1} \varphi_m \chi_a \xi_m, \quad (86)$$

где M — количество перенесенного материала с одной поверхности на другую;

C — постоянная величина;

G — плотность;

v — скорость перемещения трущейся пары друг относительно друга в м/сек;

T — время в сек;
 H_1 — твердость инструментального материала в н/мм²;
 H_2 — твердость обрабатываемого материала в контактом слое в н/мм²;
 φ_m — функция, зависящая от жесткости механического зацепления;
 χ_a — коэффициент, зависящий от природы и толщины поверхностной пленки;
 ξ_m — коэффициент, зависящий от отношения H_2/H_1 .

Интенсивность износа вследствие адгезии пропорциональна величине M .

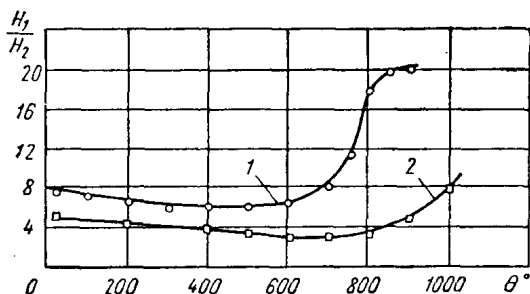


Рис. 155. Влияние температуры на отношение твердостей пары твердый сплав — обрабатываемый материал:

1—Т14К8—сталь 40ХНМА; 2—ВК8—ЭИ437

в зоне контакта, тем больше длина пути резания до затупления. В работе [52] приводится обширный цифровой материал, подтверждающий существование корреляции между произведением $v \cdot T$ и отношением H_1/H_2 . Так как снижение скорости и температуры резания против их оптимальных значений приводит к уменьшению отношения H_1/H_2 (рис. 155), то интенсивность износа инструмента при этом должна повышаться.

Таким образом, как повышение скорости резания против оптимальной величины, так и снижение ее приводит к повышению интенсивности износа инструмента, хотя физические причины этого совершенно различны. Основные факторы, влияющие на интенсивность износа режущего инструмента, и характер этого влияния при переходе скорости резания через оптимальное значение сведены в табл. 34.

Подавляющее большинство факторов, влияющих на интенсивность износа инструмента (отношение контактных твердостей, диффузия и адгезия, окислительные процессы, пластическое течение контактных слоев инструмента и др.), являются функцией температуры контактных поверхностей. Поэтому для заданного сочетания обрабатываемого материала и инструмента при работе на

При постоянстве критерия износа для заданной пары обрабатываемого и инструментального материалов длина пути резания приблизительно может быть определена по уравнению

$$vT \approx \text{const} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^z. \quad (87)$$

Уравнение (87) показывает, что чем больше твердость инструмента и чем меньше твердость обрабатываемого материала

**Основные факторы, влияющие на интенсивность
износа режущего инструмента**
(Н — непосредственное влияние; К — косвенное влияние)

№ по пор.	Основные факторы	Характер влияния	Действие фактора при различных скоростях резания	
			$v \leq v_0$	$v > v_0$
1	Адгезионное взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом	Н К	Снижается	Снижается
2	Диффузионные процессы между инструментальным и обрабатываемым материалами	Н К	Почти отсутствует	Повышается
3	Образование и разрушение тончайших пленок окисла	Н К	Снижается	„
4	Абразивное действие карбидов, содержащихся в обрабатываемом материале	Н К	„	Снижается
5	Механическое зацепление и разрушение неровностей контактных поверхностей	Н К	„	Повышается
6	Удаление и перенос инструментального материала на поверхность обрабатываемого материала	Н	Отсутствует	„
7	Наклеп обработанной поверхности и стружки	К	Снижается	Повышается (снижается)
8	Соотношение контактных твердостей инструментального и обрабатываемого материала	К	„	Снижается (повышается)
9	Шероховатость трущихся поверхностей в зонах контакта	К	Снижается	Повышается
10	Силы и коэффициенты трения на поверхностях инструмента	К	„	Повышается (снижается)

различных подачах минимальной интенсивности износа инструмента соответствует постоянная температура резания.

При замене любого из компонентов пары инструмент — деталь относительное влияние большинства факторов на интенсивность износа инструмента становится иным, а следовательно, и абсолютная величина оптимальной температуры резания будет другой. Результаты опытов, подтверждающих подобное заключение, даны в табл. 35, 36.

Таблица 35

**Оптимальная температура резания при точении
различных обрабатываемых материалов
цельным твердосплавным резцом Т14К8**

Обрабатываемый материал	40ХНМА	ЭИ736	1Х18Н9Т	ЭИ654
Глубина резания t в мм	1	1	0,5	1
Диапазон подачи s в мм/об	0,11—0,43	0,10—0,40	0,10—0,40	0,10—0,40
Оптимальная температура резания θ_0 в °С	820	770	850	930

Таблица 36

**Влияние инструментального материала
на оптимальную температуру резания**

Обрабатываемый материал	Диапазон подачи s мм/об	Марка твердого сплава	Оптимальная температура резания θ_0 °С
1Х18Н9Т	0,10—0,40	Т14К8	850
	0,10—0,40	ВК8	785
	0,11—0,43	ВК3	785
	0,11—0,43	ВК2	800
ЭИ654	0,10—0,40	Т14К8	930
	0,15—0,50	ВК6	950

9. Уравнения суммарной интенсивности износа инструмента

Как было выше установлено, износ инструмента является следствием совокупного действия многих физических явлений, происходящих на поверхностях инструмента: адгезии и диффузии, окислительных процессов, пластического течения контактных слоев инструмента, абразивно-механического изнашивания и др. При современном состоянии науки еще нет возможности количественно оценить долю каждого явления и каждой причины в наблюдаемом суммарном износе инструмента и их изменение при изменении скорости резания.

Эту зависимость между суммарной интенсивностью износа резца и скоростью резания можно выразить аналитически рядом Фурье

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx). \quad (88)$$

Коэффициенты Фурье для функции $f(x)$, имеющей период 2π , определяются, как известно, по формулам Эйлера—Фурье

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \\ a_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx; \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx. \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

Так как функция $y=f(x)[h_{0,\pi}=f(v)]$ получается в результате эксперимента и задается в виде таблицы и графика, то коэффициенты Фурье могут быть вычислены при помощи приближенных методов интегрирования. Рассматривается промежуток $0 \leq x \leq 2\pi$ длины 2π . Этого легко можно добиться соответствующим выбором масштаба по оси OX . Промежуток $0-2\pi$, т. е. исследованный диапазон скоростей резания, делится на n равных частей. С достаточной для практики точностью число n можно принять равным 12.

Тогда исходные данные для составления ряда Фурье можно представить в виде табл. 37.

Таблица 37

Скорость резания v	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}
Поверхностный относительный износ резца $h_{0,\pi}=f(v)$ [$y=f(x)$]	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}
Переменная x	0	$\frac{1}{6}\pi$	$\frac{2}{6}\pi$	$\frac{3}{6}\pi$	$\frac{4}{6}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	π	$\frac{7}{6}\pi$	$\frac{8}{6}\pi$	$\frac{9}{6}\pi$	$\frac{10}{6}\pi$	$\frac{11}{6}\pi$

Значения функции $f(x)$ (или значения величины $h_{0,\pi}$) в точках $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{10}, x_{11}$ (или в точках $v_0, v_1, v_2, \dots, v_{10}, v_{11}$) обозначены, соответственно, через $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{10}, y_{11}$. Эти значения определяются или по таблице или по графику данной функции путем измерения соответствующих ординат.

Коэффициенты Фурье по методу приближенного вычисления определенных интегралов могут быть определены следующими выражениями:

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos kx_i;$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin kx_i.$$

Вычисление по указанным формулам может быть весьма облегчено, если воспользоваться симметричностью их строения (схема

Коэффициенты Фурье при обработке

Обрабатываемый материал	Твердый сплав	Сечение среза		Аргумент x															
		t мм	s мм/об	0	$\frac{1}{6}\pi$	$\frac{2}{6}\pi$	$\frac{3}{6}\pi$	$\frac{4}{6}\pi$	$\frac{5}{6}\pi$	π	$\frac{7}{6}\pi$	$\frac{8}{6}\pi$	$\frac{9}{6}\pi$	$\frac{10}{6}\pi$	$\frac{11}{6}\pi$				
				Скорость резания v в м/мин															
				v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}				
40ХНМА	Т14К8	1,0	0,11	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360				
			0,21	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360				
			0,43	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360				
Х18Н9Т	Т14К8	0,50	0,10	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260				
			0,20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260				
			0,40	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260				
ЭИ736	Т14К8	1,0	0,10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240				
			0,20	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240				
			0,40	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240				
ЭИ437А	ВК8	0,50	0,08	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70				
ЭХ12М (HRC 60—61)	Т14К8	0,25	0,08	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31				
30ХГСА	Т15К6	1,5	0,30	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260				

К. Рунге) или специальными шаблонами для гармонического анализа [50].

Гармонический анализ Фурье проведен для ряда обрабатываемых материалов. Коэффициенты Фурье приведены в табл. 38.

Например, зависимость поверхностного относительного износа от скорости резания при точении стали 40ХНМА резцом Т14К8 ($t=1,0$ мм; $s=0,21$ мм/об) выражается следующим рядом Фурье:

$$f(x) = h_{0,н} = 3,55 + 1,13 \cos x + 0,57 \cos 2x + 0,22 \cos 3x + \\ + 0,24 \cos 4x + 0,15 \cos 5x + 0,125 \cos 6x - 0,59 \sin x + \\ + 0,36 \sin 2x + 0,13 \sin 3x + 0,10 \sin 4x + 0,02 \sin 5x,$$

Применение рядов Фурье для выражения влияния скорости резания на суммарную интенсивность износа инструмента с наилучшим приближением аппроксимирует искомые зависимости, так как из всех тригонометрических полиномов n -ой степени наименьшее

Т а б л и ц а 38

различных материалов

Значение коэффициентов ряда Фурье											
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
8,9	3,75	0,33	0,33	0,26	0,16	0,25	1,73	-0,16	0,27	-0,07	0,13
3,55	1,13	0,57	0,22	0,24	0,15	0,125	-0,59	0,36	0,13	0,10	0,02
3,84	2,53	-0,54	-1,1	-0,79	-0,73	-0,41	-0,22	-2,56	-0,92	-0,36	-3,7
9,5	3,06	0,4	0,38	0,52	-0,14	0,27	3,82	-0,83	0,9	-0,46	0,22
3,95	3,02	1,7	1,12	0,82	0,66	0,33	0,102	0,33	-0,25	0,246	0,13
3,42	3,19	0,92	0,316	0,33	0,395	0,234	0,85	1,04	0,45	0,144	0,005
7,0	0,5	0,67	-0,27	0,10	-0,13	-0,07	-3,35	0	-0,27	-0,17	-0,002
2,17	0,035	0,20	-0,133	-0,05	-0,05	-0,025	-0,94	-0,115	-0,333	-0,087	-0,04
1,28	0,07	-0,04	-0,067	-0,093	-1,03	-0,045	-0,72	-0,26	-0,123	-0,087	-0,03
53,2	33,5	1,92	-9,3	-8,6	-9,15	-3,9	-1,92	-25	-13,8	5,92	-1,42
147,4	56,5	23,7	-23,3	-20,4	-30,6	-10,6	-104,5	-38,6	-36,7	10,2	-3,18
4,03	0,69	-0,46	0,482	-0,95	-1,67	-0,51	-3,45	-1,95	-0,96	-0,54	-0,25

среднее квадратическое отклонение в интервале $[-\pi, \pi]$ от функции $f(x)$ имеет тригонометрический полином, коэффициенты которого определяются по формулам Фурье*.

Большим преимуществом ряда Фурье перед формулами степенного вида является то, что ряды Фурье не нужно преобразовывать для выполнения расчетов на вычислительных машинах [16].

Величину поверхностного относительного износа (суммарную интенсивность размерного износа инструмента) можно также выразить интерполяционной формулой Лагранжа

$$\begin{aligned} h_{0..n} = & \frac{(v-v_1)(v-v_2)\dots(v-v_n)}{(v_0-v_1)(v_0-v_2)\dots(v_0-v_n)} h_{0..n,0} + \\ & + \frac{(v-v_0)(v-v_2)\dots(v-v_n)}{(v_1-v_0)(v_1-v_2)\dots(v_1-v_n)} h_{0..n,1} + \\ & + \frac{(v-v_0)(v-v_1)(v-v_3)\dots(v-v_n)}{(v_2-v_0)(v_2-v_1)(v_2-v_3)\dots(v_2-v_n)} h_{0..n,2} + \\ & + \dots + \frac{(v-v_0)(v-v_1)\dots(v-v_{n-1})}{(v_n-v_0)(v_n-v_1)\dots(v_n-v_{n-1})} h_{0..n,n}, \end{aligned}$$

а также многочленом С. Н. Бернштейна

$$h_{0..n} = \sum_{m=0}^n h_{0..n,m} C_n^m \frac{(v-v_0)^m (v_n-v)^{n-m}}{(v_n-v_0)^n}.$$

Многочлен Бернштейна дает наилучшее приближение к функции. Для выражения функции $h_{0..n}=f(v)$ как интерполяционной формулой Лагранжа, так и многочленом Бернштейна требуется большой объем вычислительной работы. Коэффициенты ряда Фурье вычисляются довольно просто и быстро.

10. Основные выводы

1. Такие важнейшие характеристики процесса резания, как наклеп и шероховатость обработанной поверхности и интенсивность износа режущего инструмента находятся в сложной зависимости от контактных процессов, происходящих на поверхностях инструмента.

2. Характер влияния толщины срезаемого слоя на нормальные q'_N и касательные q'_F удельные контактные нагрузки на задней поверхности и на коэффициент трения на задней поверхности μ' зависит от уровня скоростей (температур) резания. Повышение толщины срезаемого слоя при работе на скорости резания ниже оптимальной приводит к росту q'_N и снижению q'_F и μ' , а на скоро-

* П. И. Романовский, Ряды Фурье и др., Издательство «Наука», 1964.

стях резания выше оптимальной — приводит к снижению q'_x и повышению μ' ; величина q'_F при этом остается практически неизменной.

3. Интенсивность износа инструмента при повышении подачи изменяется аналогично изменению коэффициента трения по задней поверхности. Изучение закономерностей изменения коэффициента трения по задней поверхности помогает правильно понять и объяснить характер функций $h_{o.п}=f(s)$ при работе с различными скоростями резания и более обоснованно проводить мероприятия по интенсификации процессов резания.

4. Повышение толщины срезаемого слоя при сохранении постоянства оптимальной температуры резания приводит к снижению величин ξ , Q_c , q_F и μ . В этом случае также снижаются q'_N и q'_F , а μ' почти не изменяется. Такой характер влияния толщины среза на характеристики контактных процессов на поверхностях инструмента предопределяет и характер зависимости $h_{o.п}=f(s)$, наблюдающейся при сохранении постоянства оптимальной температуры резания.

5. Так как при изменении толщины срезаемого слоя и сохранении постоянства оптимальной температуры резания большинство показателей, характеризующих контактные процессы на поверхностях инструмента, не остаются постоянными, то, естественно, при изменении подачи период стойкости инструмента также непостоянен.

6. Общая и размерная стойкость инструмента при повышении подачи и сохранении постоянства оптимальной температуры резания в подавляющем большинстве случаев повышаются, так как наблюдаемое при этом снижение величин ξ , Q_c , q_F , μ , q'_N , q'_F резко облегчает условия работы режущего инструмента. Поэтому работа на повышенных подачах при сохранении постоянства оптимальной температуры резания является важным резервом повышения производительности обработки и размерной стойкости инструмента.

7. Снижение скорости резания против оптимальной создает более благоприятные условия для развития явлений адгезии и приводит к повышению величин ξ , Q_c , s , q_F , μ и μ' .

8. Развитие явлений адгезии, повышение трения на поверхностях инструмента и повышение объема пластических деформаций срезаемого слоя и обработанной поверхности, наблюдаемые при снижении скорости резания против оптимального значения, обуславливают повышение интенсивности износа инструмента и повышение шероховатости обработанной поверхности.

9. Повышение скорости резания против оптимального значения приводит к уменьшению явлений адгезии, но резко усиливает диффузионные процессы между инструментальным и обрабатываемым материалом и уменьшает защитную роль окисных пленок, образующихся на поверхностях контакта, что оказывает непосредственное влияние на повышение интенсивности износа инструмента.

10. Закономерности изменения шероховатости и наклепа обработанной поверхности при изменении скорости резания аналогичны закономерностям изменения интенсивности износа инструмента. При работе на скоростях резания, обеспечивающих минимум интенсивности износа инструмента, наблюдается минимум (или стабилизация) высоты неровностей и минимум (или стабилизация) глубины и степени наклепа обработанной поверхности. Равенство скоростей резания, соответствующих точкам минимума или критическим точкам кривых $h_{0.п}=f(v)$; $R_z=f(v)$; $H=f(v)$ и $h_c=f(v)$ является вполне закономерным явлением, так как изменение отмеченных характеристик процесса резания происходит в значительной мере под действием одних и тех же физических причин.

11. Так как при работе на оптимальных скоростях резания наблюдается минимальный наклеп и минимальная высота неровностей обработанной поверхности, то ведение процессов на оптимальных режимах имеет особо важное значение при выполнении окончательных операций изготовления ответственных деталей с повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя.



Глава XI

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА НА ОПТИМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ

Параметрические уравнения максимальной размерной стойкости и номограммы для выбора оптимальных скоростей резания получены для инструментов с вполне определенными геометрическими параметрами режущей части (r , ϕ , ϕ_1 , γ , α , λ). В научном и практическом отношении интересно выяснить возможность использования полученных уравнений и номограмм при работе инструментом с другими геометрическими параметрами режущей части *.

1. Влияние радиуса при вершине резца

Изменение радиуса при вершине резца изменяет среднюю ширину и толщину среза и температуру резания. Отсюда логично предположить, что семейства кривых $h_{o,п} = f(v)$ для разных подач и резца с постоянным радиусом при вершине r и для резцов с разным радиусом r и неизменной подачей должны иметь принципиально одинаковый характер. Экспериментальная проверка полностью подтвердила правильность этого предположения (рис. 156).

Точками минимума кривых $h_{o,п} = f(v)$ для резцов с разным радиусом r соответствует постоянная оптимальная температура резания. Зависимость оптимальной скорости резания от радиуса при вершине резца ВК6М при точении жаропрочного сплава ЭИ437БУ может быть выражена формулой

$$v_o = 23,2 \cdot r^{0,25}. \quad (90)$$

Исследования показали, что при работе на сравнительно низких скоростях резания ($v = 16 \text{ м/мин}$) с увеличением r интенсивность размерного износа резца значительно повышается (рис. 157). Так,

* Эксперименты, описанные в данной главе, под руководством автора выполнены инженерами Л. Н. Волгаревым и В. С. Мухиным. Все исследования, относящиеся к стали ЭИ654, для повышения точности проведены цельным твердосплавным резцом ВК8.

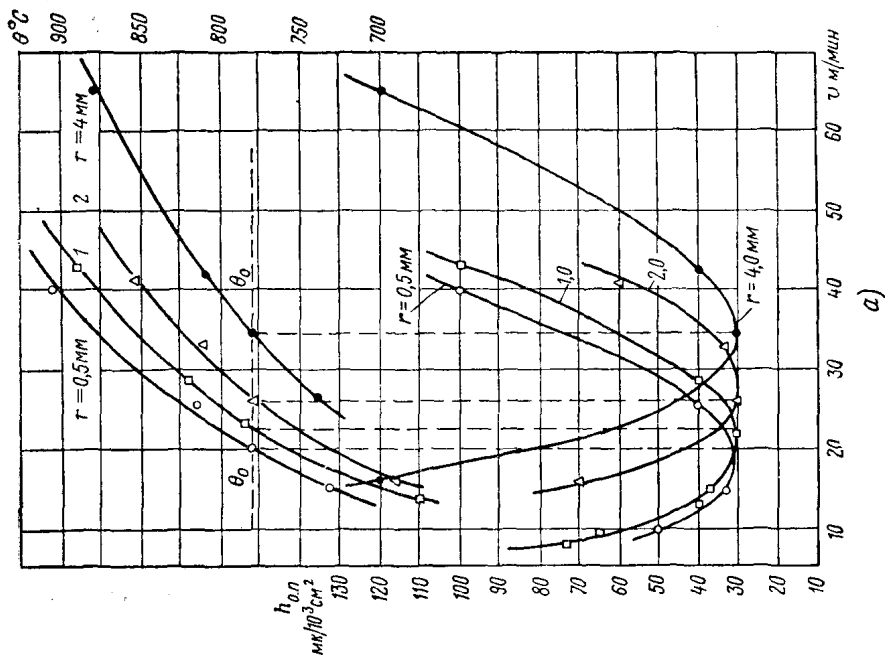
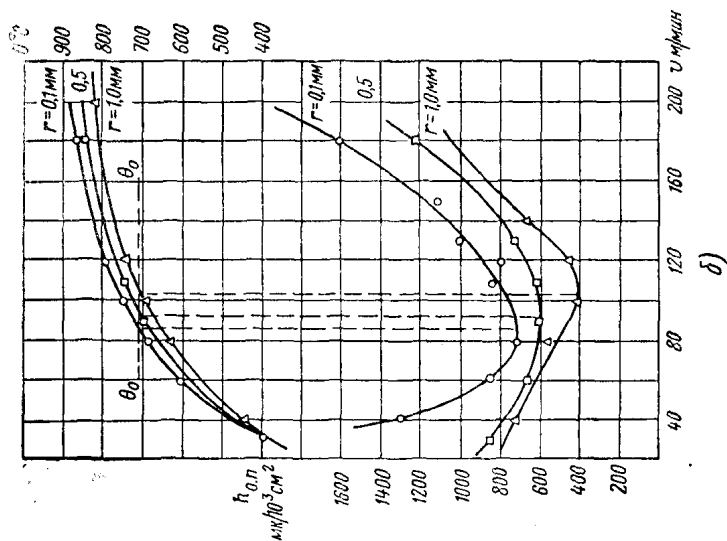


Рис. 156. Влияние скорости резания на по-
верхностный относительный износ и тем-
пературу резания при работе резцами с раз-
личными радиусами закругления вершины:
а — жаропрочный сплав ЭИ437БУ, резец ВК6М;
 $t = 1 \text{ мм}$, $s = 0.20 \text{ мм/об}$; б — сталь ЭИ654, резец ВК8;
 $t = 0.25 \text{ мм}$, $s = 0.018 \text{ мм/об}$



увеличение радиуса при вершине резца от 0,5 до 4,0 мм привело к повышению поверхностного относительного износа от 32 до 120 мк/10³ см², т. е. почти в 4 раза, что может быть объяснено снижением температуры резания и удалением ее от оптимального значения.

При работе на средних скоростях резания ($v = 25$ м/мин) с увеличением r значение $h_{o,п}$ сначала уменьшается (за счет снижения температуры резания и приближения ее к оптимальной θ_0), а затем, достигнув минимума, возрастает, так как температура резания перешла через оптимальное значение.

При работе на высоких скоростях резания ($v = 40$ м/мин) с увеличением r значение $h_{o,п}$ монотонно снижается, так как температура резания понижается и приближается к оптимальной. Следует отметить, что кривые $h_{o,п} = f(r)$ наиболее полого идут при тех значениях r , при которых обеспечиваются температуры резания, близкие к оптимальной.

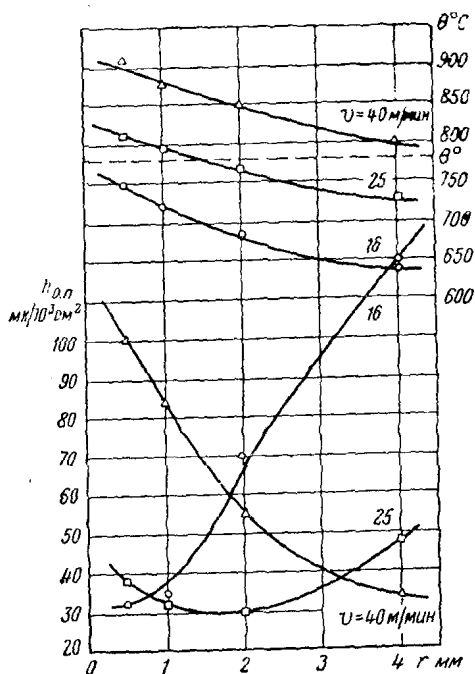


Рис. 157. Влияние радиуса закругления вершины резца на поверхностный относительный износ и температуру резания. Жаропрочный сплав ЭИ437БУ, резец ВК6М

2. Влияние главного и вспомогательного углов резца в плане

Изменение главного угла резца в плане вызывает изменение соотношения между толщиной и шириной среза и изменение температуры резания. Следовательно, семейство кривых $h_{o,п} = f(v)$ для резцов с различными углами ϕ должно быть аналогично семейству кривых $h_{o,п} = f(v)$ для различных подач. Опыты подтвердили аналогию указанных зависимостей (рис. 158). Как и следовало ожидать, минимумы кривых $h_{o,п} = f(v)$ для резцов с различными углами ϕ наблюдаются при различных оптимальных скоростях резания, которым соответствует постоянная оптимальная температура контакта.

Чем больше главный угол резца в плане, тем больше толщина среза, тем выше температура резания и ниже оптимальная скорость резания. Зависимость оптимальной скорости резания от главного

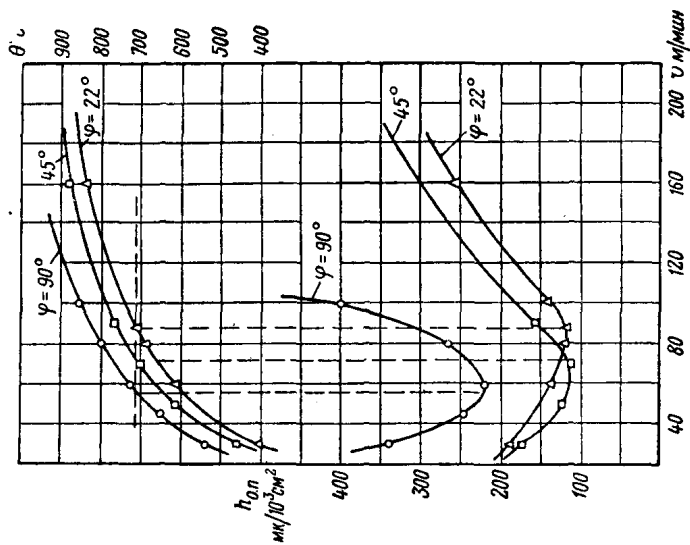


Рис. 158. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и температуру резания при точении с различными углами в плане.

Сталь ЭИ654, резцы ВК8; $t=0,25$ мм, $s=0,09$ мм/об

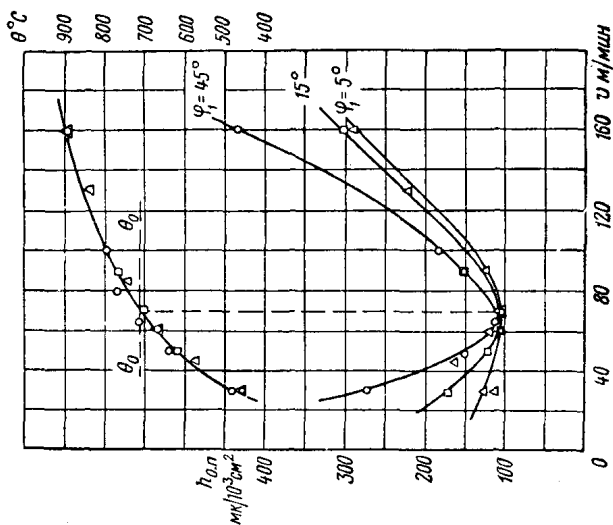


Рис. 159. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и температуру резания при точении с различными вспомогательными углами в плане.

Сталь ЭИ654, резцы ВК8; $t=0,25$ мм, $s=0,09$ мм/об

угла резца в плане (сталь ЭИ654, резец ВК8; $t=0,25$ мм; $s=0,09$ мм/об) может быть выражена формулой

$$v_o = \frac{248}{\varphi^{0,33}}. \quad (91)$$

Оптимальная скорость резания в зависимости от подачи (в диапазоне подач 0,018—0,090 мм/об) для той же стали и того же резца выражается формулой

$$v_o = \frac{28,8}{s^{0,33}}. \quad (92)$$

Совпадение показателей степени при φ и s в уравнениях (91) и (92), по-видимому, не случайно, так как главный угол резца в плане и подача являются факторами, определяющими толщину срезаемого слоя.

Изменение вспомогательного угла резца в плане φ_1 в пределах от 5° до 45° не оказывает заметного влияния на температуру резания (рис. 159). Поэтому оптимальные скорости резания для резцов с различными углами φ_1 являются практически совпадающими. В зоне оптимальных скоростей и температур резания интенсивность износа резцов с разными углами φ_1 примерно одинаковая, в то время как при низких и высоких скоростях резания линии $h_{0,п} = f(v)$ веерообразно расходятся. Здесь проявляется общая тенденция к большей стабилизации процесса резания при работе на оптимальных скоростях резания по сравнению с работой на других скоростях.

3. Влияние переднего угла, угла наклона главной режущей кромки и заднего угла резца

Передний угол резца оказывает большое влияние на пластическую деформацию срезаемого слоя, трение на передней поверхности, среднюю температуру контакта, прочность режущей кромки и период стойкости.

Для каждого обрабатываемого материала (характеризующегося прочностью, твердостью, пластичностью) проф. М. Н. Ларин рекомендует вполне определенную величину оптимального переднего угла. В связи с этим вопрос о влиянии переднего угла на оптимальную скорость резания может показаться надуманным. Однако, как показывает анализ статистических данных о геометрических параметрах резцов, применяемых разными рабочими при обработке различных по конфигурации и жесткости заготовок из одного и того же материала, фактические передние углы в ряде случаев колеблются в пределах до 15° и более. Даже одному и тому же резцу в различных стадиях использования пластинки твердого сплава рабочие, в целях облегчения операции заточки, часто придают различные передние углы. Поэтому вопрос о влиянии переднего угла

на оптимальную скорость резания представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Данные влияния скорости резания на величину поверхностного относительного износа и температуру резания при работе резцами с разными значениями переднего угла (рис. 160) показывают, что при всех значениях переднего угла кривые $h_{0.п} = f(v)$ имеют точку минимума при одной и той же оптимальной температуре резания.

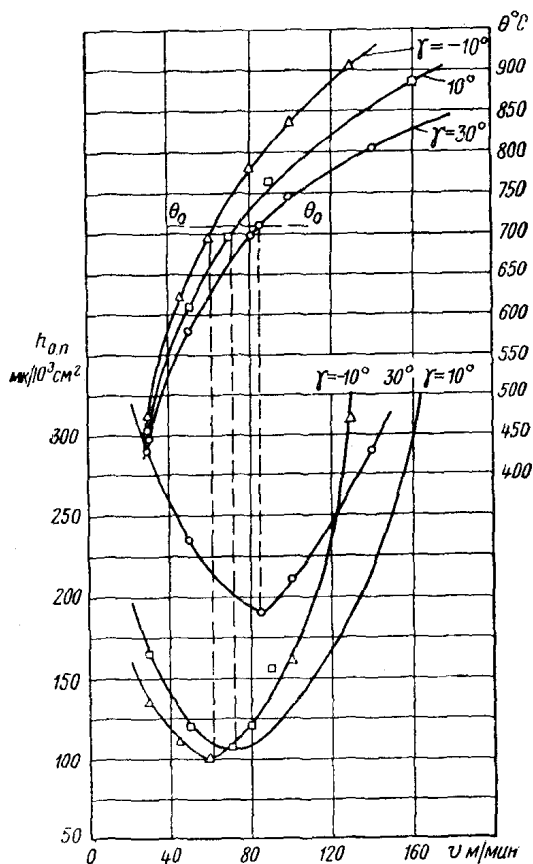


Рис. 160. Влияние скорости резания на поверхностный относительный износ и температуру резания при точении с различными передними углами.

Сталь ЭИ654, резцы ВК8; $t=0,25$ мм, $s=0,09$ мм/об

процесса резания с изменением угла λ приводит к изменению интенсивности износа инструмента (рис. 161).

Чем больше абсолютная величина угла λ , тем больше ширина среза и средняя толщина среза, тем выше удельная работа резания и удельные работы трения на поверхностях инструмента и тем выше температура резания. При всех значениях угла λ от $+20^\circ$ до -40°

При уменьшении переднего угла и переходе его от положительного значения к отрицательному (т. е. при увеличении угла резания δ) температура резания существенно повышается, а оптимальная скорость резания снижается, так что зависимость оптимальной скорости резания от угла резания может быть выражена формулой

$$v_o = \frac{992}{\delta^{0,60}} \quad (93)$$

Изменение угла наклона режущей кромки λ приводит к изменению ориентации передней поверхности относительного вектора скорости резания и некоторому изменению толщины и ширины среза. Это вызывает изменение удельной работы резания, удельной работы трения на передней поверхности и средней температуры контакта. Изменение указанных факторов про-

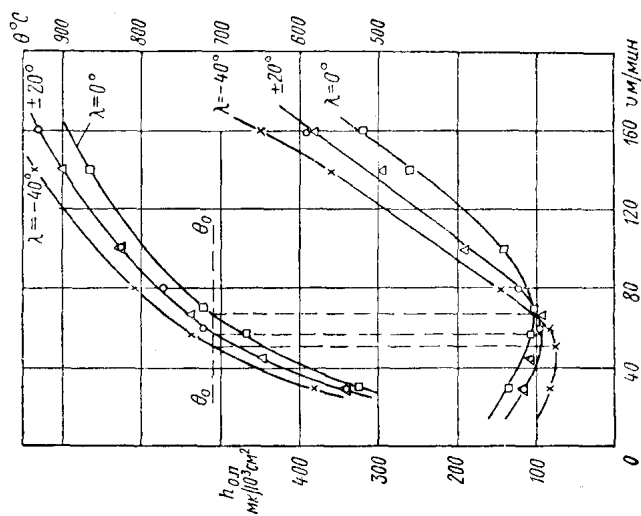


Рис. 161. Влияние скорости резания на по-
верхностный относительный износ и тем-
пературу резания при точении с различны-
ми углами наклона главной режущей
кромки.

Сталь ЭИ654, резцы ВК8; $t=0,50$ мм, $s=0,09$ мм/об

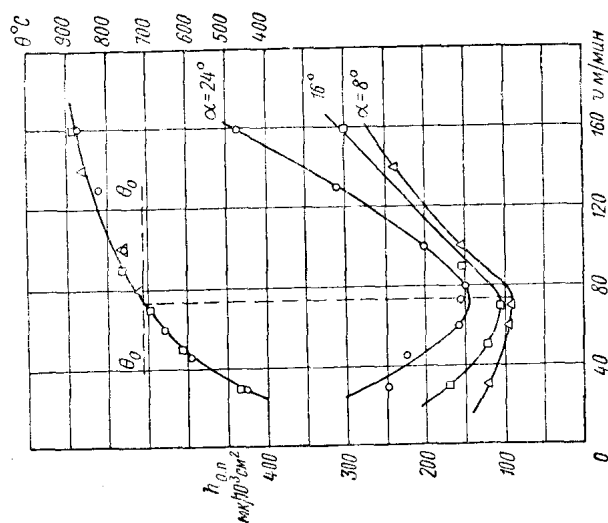


Рис. 162. Влияние скорости резания на по-
верхностный относительный износ и темпе-
ратуру резания при точении с различными
задними углами.

Сталь ЭИ654, резцы ВК8; $t=0,25$ мм, $s=0,07$ мм/об

кривые $h_{o,п}=f(v)$ имеют точки минимума при одной и той же оптимальной температуре резания, которой соответствуют различные оптимальные скорости резания.

Наименьшая температура резания и наибольшая оптимальная скорость резания наблюдаются при $\lambda=0$. Знак угла λ на температуру резания и интенсивность износа резца оказывает несущественное влияние.

Задний угол резца, как и следовало ожидать, не оказывает заметного влияния на температуру резания (рис. 162). Кривые $h_{o,п}=f(v)$ для резцов с разным углом α имеют точки минимума при одной и той же оптимальной температуре резания, которой соответствуют постоянные оптимальные скорости резания. Интенсивность размерного износа при увеличении угла α возрастает и при $v=const$ может быть выражена уравнением

$$h_{o,п}=C\alpha^{0,40}. \quad (94)$$

4. Основные выводы

1. Точки минимума кривых $h_{o,п}=f(v)$, полученных для резцов с разными геометрическими параметрами режущей части ($r, \varphi, \varphi_1, \gamma, \lambda, \alpha$), наблюдаются при одной и той же оптимальной температуре резания, хотя оптимальные скорости резания при этом могут быть существенно различны.

2. Инвариантность оптимальной температуры резания к изменению геометрических параметров режущей части инструмента позволяет быстро определять оптимальные скорости на основе температурных исследований. Для этого достаточно иметь зависимость $h_{o,п}=f(v)$ для резца с одной геометрией режущей части и семейство кривых $\theta=f(v)$ или $E=f(v)$ для резцов с другими сочетаниями геометрических параметров.

3. Кривые $h_{o,п}=f(r)$, $h_{o,п}=f(\varphi)$, $h_{o,п}=f(\gamma)$, $h_{o,п}=f(\lambda)$ при $v=const$ могут быть монотонно убывающими, монотонно возрастающими и иметь экстремальный характер.

Главным фактором, определяющим характер указанных функций, является температура резания.

Указанные кривые идут наиболее полого при таких комбинациях v, r, φ и др. параметров, работа на которых обеспечивает температуры резания, близкие к оптимальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования комплекса вопросов, связанных с размерной стойкостью инструмента и оптимальным ведением процессов чистовой обработки металлов резанием, показали, что важнейшим фактором, определяющим характеристики процесса резания (интенсивность износа, стойкость режущего инструмента, шероховатость и наклеп обработанной поверхности и др.) является средняя температура контакта, или температура резания.

Установлено, что при некотором значении температуры резания, названной оптимальной, в зоне резания создаются наиболее благоприятные условия (переход от адгезионного износа к диффузионному), при которых обеспечивается минимум интенсивности износа инструмента (и максимум его размерной стойкости), а поверхностный слой имеет наименьшую шероховатость и минимальный наклеп.

Положение о постоянстве оптимальной температуры резания, установленное вначале для точения, оказалось справедливым также для растачивания и торцового фрезерования. Дальнейшие многочисленные исследования показали, что положение о постоянстве оптимальной температуры резания для заданной пары твердый сплав — обрабатываемый материал может быть распространено на весьма широкий круг параметров (подача, диаметр обрабатываемой детали при точении и растачивании, геометрические параметры режущей части инструмента, способ охлаждения зоны резания и др.).

Нечувствительность оптимальной температуры резания к изменению всех основных параметров процесса резания открывает широкие возможности определения оптимальных режимов резания в многообразных условиях эксплуатации инструмента, что особенно важно при автоматизации процессов обработки резанием.

На основе положения о постоянстве оптимальной температуры резания и на базе выявленных закономерностей износа инструмента разработан метод определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, при которых обеспечивается максимальная размерная стойкость инструмента и точность обработки. Указанный метод позволяет в 4—5 раз сократить время, затрачиваемое на исследование, и во столько же раз сократить расход обрабатываемого и инструментального материалов по сравнению со стандартными стойкостными испытаниями.

Важно отметить, что для жаропрочных сплавов и других труднообрабатываемых материалов, а также для обычных конструк-

онных сталей в условиях автоматизированного производства оптимальные и экономические скорости резания можно считать практически совпадающими. Использование положения о постоянстве оптимальной температуры резания для оптимизации процессов резания в этих условиях приведет к повышению производительности металлорежущих станков, снижению затрат на инструмент и снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Ведение процессов обработки на оптимальных скоростях резания имеет особо важное значение при выполнении окончательных операций изготовления ответственных деталей с повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя и точности обработки.

Абсолютная величина оптимальной температуры резания при обработке различных материалов резцами, оснащенными различными пластинками твердого сплава, различна. Но это никоим образом не умаляет значения установленного положения о постоянстве оптимальной температуры резания, так как при практическом его использовании можно оперировать величиной т. э. д. с. и нет надобности в тарировании термопар твердый сплав — обрабатываемый материал.

Для облегчения практического использования возможностей быстрого подбора оптимальных режимов обработки в производственных условиях разработаны специальные номограммы, дающие возможность увязывать выбор режимов резания с чистотой, точностью, производительностью и себестоимостью обработки; они же служат основой при расчете точности обработки на станках. Номограммы позволяют снизить до минимума простой оборудования в автоматизированном производстве, вызываемые подналадкой и заменой изношенного инструмента, и крайне необходимы при проектировании автоматических линий, где скорости рабочих движений, как правило, устанавливаются неизменными. Номограммы наглядно показывают, что при соблюдении постоянства оптимальной температуры резания повышение подачи в диапазоне, характерном для чистового и тонкого точения всегда повышает не только производительность обработки, но и размерную стойкость инструмента.

Метод ускоренного определения оптимальных режимов резания может быть использован заводскими и вузовскими лабораториями и отраслевыми научно-исследовательскими институтами для разработки в сравнительно короткие сроки заводских и ведомственных нормативов по режимам резания для материалов, применяемых в данной отрасли промышленности и обладающих специальными характеристиками и свойствами.

Можно полагать, что в случае обработки деталей на оптимальных режимах резания, при которых получается наименьшая глубина и степень наклепа поверхностного слоя, автоматически (без всяких дополнительных операций) будет повышена износостойкость, коррозионная стойкость и долговечность ряда ответственных деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аваков А. А., Физические основы теорий стойкости режущих инструментов, Машгиз, 1960.
2. Айнбиндер С. Б. и Клокова Э. Ф., О механике возникновения сцепления при холодной сварке металлов, Изв. АН Латв. ССР, № 10, 87, 1954.
3. Айзеншток И. Я., Основные вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз, 1953.
4. Байкалов А. К., Размерный износ сплавов ВК8, ВК3 и пластинок ЦМ332 при точении серого чугуна, Известия Томского политехнического института имени С. М. Кирова, том 85, 1957.
5. Белецкий Д. Г., Тонкое точение, Оборонгиз, 1946.
6. Белоусова Е. А., Токарная обработка стали высокой твердости, «Станки и инструмент», 1962, № 3.
7. Бетанели А. И., Твердость твердых сплавов и минерало-керамических материалов в горячем состоянии, «Вестник машиностроения», 1953, № 4.
8. Бобрик П. И., Качество поверхностного слоя, температурные и силовые зависимости при резании некоторых марок жаропрочных сплавов, Сб. «Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов», Куйбышев, Облиздат, 1962.
9. Богданов Б. И., Точность обработки при скоростном обтачивании, сб. «Точность механической обработки и пути ее повышения», Машгиз, 1951.
10. Ван Ти и Скраган В. А., Относительный износ режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, Труды ЛПИ № 219, Машгиз, 1962.
11. Вершинская А. Д. и Андреев Г. С., Обработка резанием деталей, наплавленных стеллитом, Сб. ЦНИИТМАШ «Исследование в области технологии обработки металлов резанием», Машгиз, 1957.
12. Вульф А. М., Резание металлов минералокерамическими резцами, Машгиз, 1958.
13. Голубев Н. П., Определение степени и глубины наклепа обрабатываемой поверхности, «Станки и инструмент», 1962, № 4.
14. Грановский Г. И. и др., Резание металлов, Машгиз, 1954.
15. Грановский Г. И., Износостойкость твердых сплавов и закаленных инструментальных сталей, Сб. «Трение и износ при резании металлов», Машгиз, 1955.
16. Грановский Г. И., О методике исследования и назначения режимов резания на автоматических линиях, «Вестник машиностроения», 1963, № 10.
17. Грудов П. П., Скоростное резание, Сб., «Скоростные методы обработки металлов», Машгиз, 1949.
18. Грузин П. Л., Диффузия хрома, вольфрама, кобальта в железе и стали, ДАН СССР, 1954, № 4.
19. Губкин С. И., Пластическая деформация металлов, т. III, Металлургиздат, 1960.
20. Гуськов Б. С., и Крахин А. Г., Износ резцов и чистота поверхности при тонкой расточке чугунных втулок на алмазнорасточных станках, «Станки и инструмент», 1962, № 5.

- * 21. Даниелян А. М., Теплота и износ инструментов в процессе резания, Машгиз, 1954.
22. Дербишер В. В., О критерии затупления твердосплавных резцов, «Станки и инструмент», 1956, № 4.
23. Дикушин В. И., Проблемы автоматизации процессов в машиностроении, Сб. «Современные направления в области технологии машиностроения», АН СССР, 1957.
24. Еремин А. Н., Физическая сущность явлений при резании стали, Машгиз, 1951.
25. Зорев Н. Н., Вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
26. Зорев Н. Н., Расчет проекций силы резания, Машгиз, 1958.
27. Зорев Н. Н., Обработка стали твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания с большими сечениями среза, «Вестник машиностроения» 1963, № 2.
28. Исаев А. И., Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием, Машгиз, 1950.
29. Исаев А. И., Влияние износа резца на процесс образования поверхностного слоя, Сб. «Чистовая обработка конструкционных металлов», Машгиз, 1951.
30. Исаев А. И., Влияние материала режущей части инструмента на чистоту обработанной поверхности, Сб. «Чистовая обработка конструкционных металлов», Машгиз, 1951.
31. Исаев А. И., Егоров А. М., Исследование виброустойчивости упругой системы при токарной обработке, Труды МАТИ, вып. 32, Оборонгиз, 1957.
32. Иткин М. Э., Исследование скорости резания и наклепа обработанной поверхности при торцовом и цилиндрическом фрезеровании жаропрочных и титановых сплавов марок ЭИ437Б, ЭИ437А, ЭИ617 и ВТ6, Сб. «Обработка жаропрочных и титановых сплавов», Куйбышев, Облиздат, 1962.
33. Иткин М. Э., Стружкообразование и физические явления, сопровождающие процесс резания при токарной обработке углеродистой стали, жаропрочных и титановых сплавов, Татиздат, 1963.
34. Казаков Н. Ф., Радиоактивные изотопы в исследовании износа режущего инструмента, Машгиз, 1960.
35. Качер В. А., Размерный износ резцов ВК2 при тонком растачивании чугуна, «Станки и инструмент», 1956, № 4.
36. Каширин А. И., Исследование вибрации при резании металлов. Изд. АН СССР, 1944.
37. Каширин А. И., Износ инструмента при резании труднообрабатываемых сталей и сплавов, Сб. «Исследования в области технологии машиностроения», Оборонгиз, 1954.
38. Кистяковский В. А., Электрохимические реакции и электродные потенциалы некоторых металлов, «Известия СПб политехнического института», 1910.
39. Киттель Ч., Введение в физику твердого тела, ИЛ, 1962.
40. Комиссаров В. И., Расчет размерного износа резцов, «Вестник машиностроения», 1960, № 11.
41. Кондратов А. С., Чистота и амплитуда высокочастотных колебаний резца при скоростном резании труднообрабатываемых сталей, Труды МАТИ, вып. 38, Оборонгиз, 1959.
42. Кондратов А. С., Исследование влияния вибрации на стойкость резцов, Труды МАТИ, вып. 45, Оборонгиз, 1960.
43. Кораблев П. А., Суминов В. М., Влияние жесткости технологической системы на износ режущего инструмента, Сб. «Некоторые вопросы современной технологии приборостроения», Труды МАТИ, № 52, Оборонгиз, 1961.
44. Костецкий Б. И. и др., Вопросы трения при резании металлов, Сб. «Передовая технология машиностроения», Изд. АН СССР, 1955.

45. Кравченко Б. А., Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов, Куйбышев, Облиздат, 1962.
46. Кривоухов В. А. и др. Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов, Машгиз, 1961.
47. Кривоухов В. А., Деформирование поверхностных слоев металла в процессе резания, Машгиз, 1945.
48. Кузнецов В. Д., Наросты при резании и трении, Гостехиздат, 1956.
49. Ларин М. Н., Основы скоростного фрезерования, Сб. МОНИТОМАШ «Скоростные методы обработки металлов», Машгиз, 1949.
50. Лопшиц А. М., Шаблоны для гармонического анализа, ОГИЗ, 1948.
51. Лозинский М. Г., Строение и свойства металлов и сплавов при высоких температурах, Metallurgizdat, 1963.
52. Лоладзе Т. Н., Износ режущего инструмента, Машгиз, 1958.
53. Любимов В. Г., Резание аустенитной марганцовистой стали в нагретом состоянии, Львов, 1958.
54. Макаров А. Д., Параметрические уравнения максимальной размерной стойкости инструмента для определения оптимальных режимов резания, ГОСИНТИ, № 6—63—446/78, 1963.
55. Макаров А. Д., Прибор для измерения радиального износа и температурного удлинения резца, «Станки и инструмент», 1956, № 5.
56. Макаров А. Д., Чистовая обработка закаленных сталей на увеличенных подачах и микрогеометрия обработанной поверхности, Труды УАИ, вып. 3, 1957.
57. Макаров А. Д., Исследование радиального износа резцов с минералокерамическими пластинками при чистовом точении осевой стали. Сб. «Вопросы точности в технологии машиностроения» под ред. проф. А. И. Исаева, Оборонгиз, 1957.
58. Макаров А. Д., Радиальный износ минералокерамических резцов и чистота поверхности при обработке стали, филиал ВИНТИ АН СССР, № М—58—309/16, 1958.
59. Макаров А. Д., Способ повышения размерной стойкости резцов, Филиал ВИНТИ АН СССР, М., № М—59—143/8, 1959.
60. Макаров А. Д., Вопросы точности и чистоты обработки при чистовом точении стали минералокерамическими резцами ЦМ332, Сб. «Инструментальные режущие материалы», АН СССР, 1960.
61. Макаров А. Д., Чистовое точение закаленных сталей, ЦИТЭИН ГНТК СМ РСФСР, № М—60—25/7, 1960.
62. Макаров А. Д., Ускоренный метод определения обрабатываемости металлов и установления рациональных режимов резания, «Организация процессов обработки металлов резанием, вып. 13, ЦИТЭИН ГНТК СМ РСФСР, 1961.
63. Макаров А. Д., Вопросы разработки и назначения режимов резания с учетом размерной стойкости инструмента, точности, производительности и себестоимости обработки, Сб. «Экономичность технологических процессов», Труды ЛИЭИ, вып. 47, Ленинград, 1964.
64. Макаров А. Д., Исследование и установление режимов чистовой обточки жаропрочных сплавов с учетом размерной стойкости резцов, чистоты, производительности и себестоимости обработки, Сб. «Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов», труды Всесоюзной межвузовской конференции, Куйбышев, Облиздат, 1962.
65. Макаров А. Д., Размерный износ и стойкость резцов, оснащенных пластинками твердого сплава Т30К4, при точении стали 1Х18Н9Т, ГОСИНТИ, вып. 52, № М—62—267/52, 1962.
66. Макаров А. Д., Размерный износ и стойкость резцов при точении закаленных сталей, «Станки и инструмент», 1962, № 8.
67. Макаров А. Д., Номограммы для выбора подач и скоростей резания с учетом чистоты обработки и интенсивности размерного износа резцов, «Машиностроитель», 1962, № 10.

68. Макаров А. Д., Прибор для измерения радиального износа и температурной деформации расточных резцов, «Станки и инструмент», 1962, № 10.
69. Макаров А. Д., Танатаров Р. А., Зависимость размерного износа резцов от диаметра расточки, «Станки и инструмент», 1964, № 6.
70. Макаров А. Д., Танатаров Р. А., Размерный износ расточных резцов при обработке жаропрочного сплава ЭИ437А и нержавеющей стали Х18Н9Т, ГОСИНТИ, № 6—64—1467/35, 1964.
71. Малкин А. Я., Скоростное точение закаленных сталей, Сб. «Скоростная обработка металлов резанием», Оборонгиз, 1961.
72. Маркарян Г. К., Упрочнение поверхности и его связь со стружкообразованием, Сб. «Качество поверхности деталей машин», № 5, Изд. АН СССР, 1961.
73. Маталин А. А., Рысцова В. С., Точность, производительность и экономичность механической обработки, Машгиз, 1963.
74. Меерсон Г. А., Кисляков Г. А., Исследование изнашивания металлокерамических твердых сплавов при трении, Сб. IX, АН СССР, Институт машиноведения, М., 1954.
75. Митряев К. Ф., Комиссаров В. И., Торцовое фрезерование высокопрочной стали ЭИ643, «Вестник машиностроения», 1961, № 2.
76. Надеинская Е. П., Исследование износа режущего инструмента с помощью радиоактивных изотопов, Машгиз, 1955.
77. Панкин А. В., Ускоренный метод установления оптимальных режимов резания путем использования связи износных, температурных и экономических критериев, Сб. «Тепловые явления при обработке металлов резанием», НТО Машпром, 1959.
78. Резников А. Н. и др., Режущий инструмент для автоматов и полуавтоматов, Куйбышев, Облиздат, 1961.
79. Резников Н. И., Скоростное резание металлов с большими подачами, Машгиз, 1957.
80. Резников Н. И. и др., Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов, Машгиз, 1960.
81. Резницкий Л. М., Механическая обработка закаленных сталей, Машгиз, 1958.
82. Рейхель В., Методика определения стойкости резца и обрабатываемости материала, «Мировая техника», 1936, № 4.
83. Розенберг А. М., К вопросу о трении при резании металлов, Сб. «Трение и износ при резании металлов», Машгиз, 1955.
84. Розенберг А. М., Еремин А. Н., Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
85. Розенберг А. М., Байкалов А. К., К вопросу об интенсивности износа резцов при точении серого чугуна, Известия Томского политехнического института, т. 85, Томск, 1957.
86. Романов К. Ф., Голубов С. А., Характер и роль трения в процессе износа инструмента при обработке жаропрочных сплавов резанием, Физик ВИНТИ, № М—58—351/19, 1958.
87. Романов К. Ф. и др. Выбор инструментальных сталей для обработки жаропрочных и титановых сплавов, ЦИТЭИН, № М—61—14/5, 1961.
88. Рывкин Г. М., Инструмент автоматического производства, Сб. «Высокопроизводительный режущий инструмент» Московский дом научно-технической пропаганды, Машгиз, 1961.
89. Смирнов Ф. Ф. и др., Режущие свойства твердых сплавов повышенной прочности, «Станки и инструмент», 1962, № 3.
90. Соколовский А. П., Научные основы технологии машиностроения, Машгиз, 1955.
91. Ташлицкий Н. И., Влияние механических свойств и теплопроводности сталей на их обрабатываемость, ЦНИИТМАШ, Машгиз, 1952.
92. Трент Е., «Прикладная механика и машиностроение», ИЛ, 1952.

93. Троицкая Д. Н., Влияние распыленных жидкостей на стойкость резцов с пластинками из твердых сплавов, «Вестник машиностроения», 1963, № 10.
94. Усачев Я. Г., Явления, происходящие при резании металлов, «Известия Петербургского политехнического института», т. XXIII, 1915.
95. Фельдштейн Э. И., Обработываемость сталей, Машгиз, 1953.
96. Филоненко С. Н. и Гончар Ю. Н., Зависимость величины тангенциальной силы резания от диаметра обработки, «Станки и инструмент», 1962, № 7.
97. Штейнберг С. С., Металловедение, Metallurgizdat, 1961.
98. Эрпшер Ю. Б., Об эксплуатации инструментов на автоматических линиях, Сб. «Автоматизация машиностроительных процессов», Изд. АН СССР, 1960.
99. Якобсон М. О., Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке, Машгиз, 1956.
100. Яковлев Г. М., Некоторые вопросы скоростного фрезерования и точения, Белорусиздат, 1960.
101. Akers R. M., Smith S. S., How to determine optimum feeds and speeds, „Tool Engr“, 1960, No. 6.
102. Albrecht A. B., Chip studies reveal what happens during, „The Machinist“, 1953, No. 26, vol. 97.
103. Fersing L., Smith D. H., „Transactions of the ASME“, 1955, No 1.
104. Field and Bullock, Milling Cast Iron with Carbides, „Mechanical Engineering“, vol. 67, No. 10, 1945.
105. Schriftliche Fertigung und moderne Werkzeugmaschinen, Vorträge auf 7 Aachen Werkzeugmaschinen Kolloquium. Essen, 1945.
106. Johnson T., Quick way to develop consistent feed and speed tables, „Metalworking Production“ 1960, No. 41.
107. Manjoine M. J., Influence of rate of strain and temperature on yield stresses of mild steel, Journ. of Appl. Mec., 1944, No. 4.
108. Müller E., Der Verschleiss von Hartmetallwerkzeugen und seine kurzzeitige Ermittlung, Schw. Arch. für angew. Wiss. und Techn., 1962, Nr. 6, Nr. 9, Nr. 10.
109. Ostermann G., Über die Ursachen des Werkzeugverschleisses, „Industrie—Anzeiger“, 1959, Nr. 62-4.
110. Schmidt A. O., Roubik J. R., Hug G., Effects of workpiece diameter on tool life, „Tool and Manufacturing Engineer“, 1961, No. 5.
111. Shaw M. C., Pigott D. and Richardson L. P., The effect of the cutting fluid upon chip—tool interface temperature, „Transactions of the ASME“, 1951, No. 1, vol. 73.
112. Shaw M. C., Smith P. A., Tests compare finishes from ceramic and carbide tools, „Tool Engr“. 1957, No. 4.
113. Trent E. M., Tool wear and machinability, „Institution of Production Engineer Journal“, 1959, No. 3.
114. Vieregge G., Der Werkzeugverschleiss bei spanabhebenden Bearbeitung im Spiegel der Verschleisschnittgeschwindigkeitskurven, „Stahl und Eisen“, 1957, 77, Heft 18.
115. Withoff I., Über die Kosten und die Wirtschaftlichkeit automatisierter Fertigung, „Industrie—Anzeiger“, 1956, Nr. 78, Nr. 89.
-

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Условные обозначения	5
Глава I. Установление стойкостных зависимостей на основе исследования размерного износа резца	9
1. Элементы износа инструмента и методы их измерения	9
2. Относительный и удельный износ резца при различной длине пути резания	11
3. Погрешности определения радиального износа и ширины фаски износа по задней грани при различной длине пути резания	15
4. Метод ускоренных стойкостных испытаний	17
5. Метод ускоренного определения режимов резания	20
6. Экспериментальная проверка метода ускоренного определения режимов резания	21
7. Экспериментальная проверка формул для расчета режимов резания	30
8. Другие способы получения стойкостной зависимости	30
9. Возможности дальнейшего сокращения стойкостных испытаний	34
10. Основные выводы	38
Глава II. Влияние скорости резания и подачи на размерную стойкость режущих инструментов	40
1. Характеристики размерной стойкости инструмента	40
2. Влияние скорости резания и подачи на характеристики размерной стойкости инструмента	42
Глава III. Определение оптимальных сочетаний подач и скоростей резания	51
1. Характер зависимости стойкости инструмента от скорости резания при различных подачах	51
2. Оптимальная температура резания, рациональная температура контакта и температура резания, соответствующая минимальной себестоимости обработки	55
3. Положение о постоянстве оптимальной температуры резания при различных подачах	59
4. Зависимость линейного относительного износа и скорости размерного износа от температуры резания	63
5. Метод определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания	66
6. Дальнейшее совершенствование ускоренного метода определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания	69
7. Аналитический метод определения экономических скоростей резания	77
8. Параметрические уравнения максимальной размерной стойкости резцов при точении различных материалов	80

9. Номограммы для определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания	83
10. Основные выводы	91
Глава IV. Влияние сечения срезаемого слоя на размерную стойкость инструмента и производительность	93
1. Влияние подачи на размерную стойкость инструмента при постоянной оптимальной температуре резания	94
2. Влияние подачи на период стойкости резца при постоянной оптимальной температуре резания	96
3. Влияние подачи на период стойкости резца при постоянной производственно выбранной температуре резания	98
4. Влияние подачи на производительность	102
5. О характере зависимостей $h_{o.п}=f(s)$ при $v=\text{const}$	103
6. Зависимость $h_{o.п}=f(s)$ при точении различных материалов	105
7. Влияние глубины резания на поверхностный относительный износ резцов	116
8. Основные выводы	118
Глава V. Новые характеристики обрабатываемости металлов резанием	121
Глава VI. Влияние свойств обрабатываемого материала и материала инструмента на интенсивность размерного износа инструмента	129
1. О взаимосвязи между истинным пределом прочности при растяжении S_k и новыми характеристиками обрабатываемости v_o и $h_{o.п.o}$	129
2. Влияние твердости стали на интенсивность размерного износа резца	131
3. О сравнении режущих свойств различных инструментальных материалов	137
4. Взаимосвязь интенсивности износа инструмента с чистотой обработанной поверхности	143
5. Основные выводы	146
Глава VII. Новый способ повышения размерной стойкости инструмента	149
1. Определение оптимальной ширины нулевой фаски по задней грани	149
2. Эффективность фаски при различных скоростях резания	154
3. Эффективность фаски при различных подачах	156
4. Влияние ширины нулевой фаски на интенсивность радиального износа и период стойкости резца	158
5. Влияние фаски на чистоту обработанной поверхности	160
6. Основные выводы	164
Глава VIII. Размерный износ расточных резцов	167
1. Прибор для измерения радиального износа и температурной деформации расточных резцов	167
2. Влияние скорости резания и подачи на размерный износ расточного резца	168
3. Зависимость общей и размерной стойкости резца от диаметра расточки	171
4. Влияние жесткости расточного резца на интенсивность его размерного износа	177
5. Влияние нулевой фаски на интенсивность размерного износа расточных резцов	179
6. Сравнение v_o и $h_{o.п.o}$ при точении и растачивании	181
7. Основные выводы	184
Глава IX. Размерный износ торцовых фрез	186
1. Прибор для измерения размерного износа и температурной деформации торцовых фрез	186
2. Влияние v и s_z на $h_{o.п}$, ξ и θ однозубых торцовых фрез	188
3. Получение зависимости $h_{o.п}=f(v)$ при торцовом фрезеровании на основе сокращенных испытаний	192
4. Способ повышения размерной стойкости торцовых фрез	194
5. Сравнение величин v_o и $h_{o.п.o}$ при точении и торцовом фрезеровании	196
6. Основные выводы	200

Глава X. Взаимосвязь износа инструмента с физическими характеристиками процесса резания	202
1. Влияние скорости резания на силы и коэффициенты трения на поверхностях инструмента	203
2. О взаимосвязи коэффициента трения с интенсивностью износа образцов из различных инструментальных материалов в условиях трения	205
3. Некоторые элементы механики стружкообразования и определение коэффициента трения при резании металлов	210
4. Влияние скорости резания на контактные явления на передней поверхности инструмента	216
5. Влияние скорости резания на контактные явления на задней поверхности инструмента	220
6. Влияние подачи на контактные явления процесса резания	222
7. Пластическая деформация поверхностного и срезаемого слоя	224
8. О взаимосвязи между интенсивностью износа инструмента и основными факторами процесса резания	231
9. Уравнения суммарной интенсивности износа инструмента	240
10. Основные выводы	244
Глава XI. Влияние геометрии инструмента на оптимальную скорость резания	247
1. Влияние радиуса при вершине резца	247
2. Влияние главного и вспомогательного углов резца в плане	249
3. Влияние переднего угла, угла наклона главной режущей кромки и заднего угла резца	251
4. Основные выводы	254
Заключение	255
Литература	257

Алексей Дмитриевич Макаров

ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Издательский редактор *А. А. Степанова* Техн. редактор *Н. Н. Скотникова*

Т-12695 Подписано в печать 7/Х 1966 г. Учетно-изд. л. 14,01

Формат бумаги $60 \times 90^{1/16} = 8,25$ бум. л.—16,5 печ. л.

Цена 84 коп. Тираж 10 000 экз. Тем. план 1966 г. № 381 Заказ 981/1881

Московская типография № 8 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Хохловский пер., 7