

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА РЕЗЦОВ ПРИ ТОЧЕНИИ СЕРОГО ЧУГУНА

А. М. РОЗЕНБЕРГ, А. К. БАЙКАЛОВ

При износе металлорежущих инструментов работа сил трения на гранях инструмента расходуется на истирание определенного объема твердого сплава, в результате чего на передней грани вырабатывается лунка, а на задней грани образуется фаска износа.

Интенсивность истирания инструмента по времени можно выразить отношением:

$$I = \frac{W}{\tau} \quad (1)$$

Здесь: I — абсолютная интенсивность износа в $\text{мм}^3/\text{мин}$,

W — объем износа твердого сплава в мм^3 ,

τ — время работы инструмента в мин .

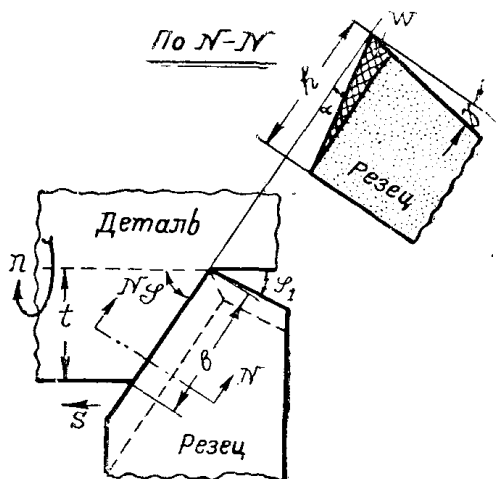
Для резцов, изнашивающихся по задней грани, объем износа (фиг. 1) выражается формулой:

$$W = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{t}{\sin \varphi} (1 \pm \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot h^2 \text{ мм}^3 \quad (2)$$

В формуле: α, γ, φ — геометрия заточки инструмента,

t — глубина резания в мм ,

h — усредненная ширина площадки износа по задней грани в мм .



Фиг. 1

Для заданного режима резания и геометрии инструмента:

$$I = C \frac{h^2}{\tau}, \quad (3)$$

где

$$C = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{t}{\sin \varphi} (1 \pm \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma) = \text{const.}$$

Выразим интенсивность износа в относительной форме:

$$i = \frac{I}{\Delta} = \frac{W}{\Delta \tau}, \quad \frac{\text{мм}^3}{\text{мм}^2 \cdot \text{мин}}, \quad (4)$$

$$\Delta = b \cdot h (1 \pm \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma) \text{ мм}^2.$$

$$\text{В формуле (5) } b = \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (5)$$

Здесь: Δ — фактическая площадь фаски износа в мм^2 ,

$$i — \text{относительная интенсивность износа в } \frac{\text{мм}^3}{\text{мм}^2 \cdot \text{мин}}.$$

Решая уравнения (2), (4) и (5), получим:

$$i = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{h}{\tau}. \quad (6)$$

Интенсивность объемного износа резцов по задней грани зависит как от геометрии заточки задней грани, так и от интенсивности линейного изменения ширины фаски износа по времени. Выражение (6) более удобно для анализа и широко используется для исследования закономерностей износа металлорежущих инструментов.

Нередко под интенсивностью износа подразумевается просто отношение $\frac{h}{\tau}$. С подобным выражением оперирует, например, проф. И. М. Беспрозванный при установлении режимов резания на основании определения постепенности износа режущей кромки инструмента [1] и ряд других авторов.

Формула $i = \frac{h}{\tau}$ отражает, собственно, интенсивность изменения ширины фаски износа по времени и не может, строго говоря, отождествляться с интенсивностью объемного износа самого инструмента. Отождествление этих двух понятий допустимо постольку, поскольку при $\alpha = \text{const}$ интенсивность объемного износа резца пропорциональна интенсивности линейного изменения фаски износа по времени. При переменном заднем угле (например, в экспериментах по определению оптимальной величины заднего угла), как это будет показано ниже, интенсивность износа резца должна характеризоваться выражением (6).

Если в формуле (6) $i = \text{const}$, то при работе инструментом постоянной геометрии должно быть и отношение $\frac{h}{\tau} = \text{const}$. В этом случае нарастание

ширины фаски износа по времени в графической форме изображается прямой линией. Многочисленные исследования показывают, что износ инстру-

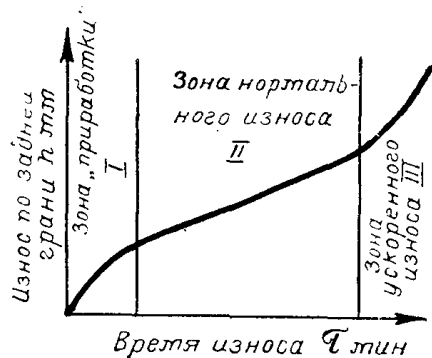
мента при постоянных условиях опыта не подчиняется этой элементарной зависимости.

Наиболее типичный случай износа по задней грани представлен на фиг. 2. Кривая разбивается на 3 зоны: зону первоначального износа или зону „приработки“ инструмента, зону нормального и зону ускоренного износа.

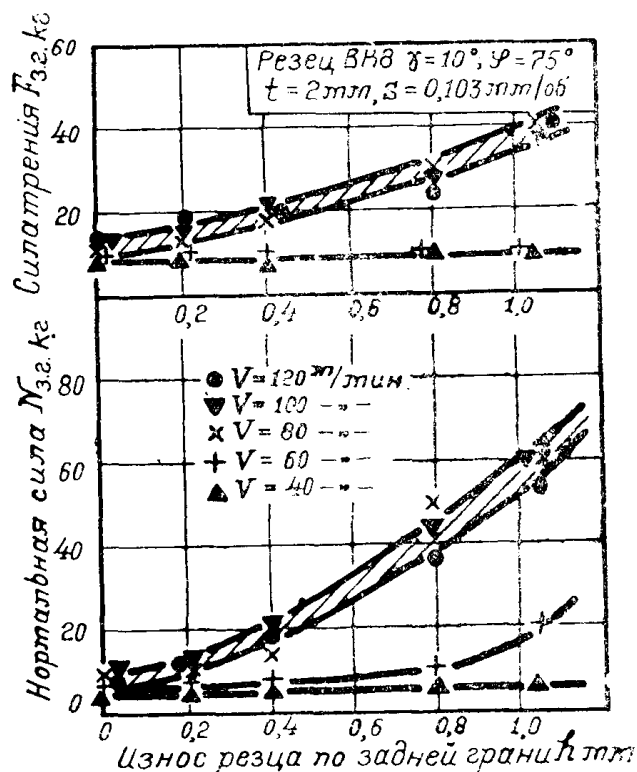
В эксперименте единственным переменным, если износ по передней грани мал, является фаска износа h или точнее площадь контакта резца по задней грани с обрабатываемым материалом. Следует ожидать, что увеличение площади контакта приведет к росту сил на задней грани и к изменению теплового баланса в зоне контакта. На фиг. 3 и 4 представлен характер изменения силы трения и нормальной силы на задней грани резца в зависимости от износа сплава ВК8 при точении серого чугуна твердостью $H_B = 190 \text{ кг/мм}^2$. (Экспериментальные графики № 3 и 4 и последующие опытные данные взяты из работы [7]. Силы на задней грани определялись по методике [4]).

Из фиг. 3 и 4 видно что по мере затупления инструмента абсолютная величина сил на задней грани монотонно возрастает. Если для острого резца сила трения и нормальная сила составляют 10—20 кг, то при достижении износа $h = 1,05 \text{ мм}$ эти силы увеличиваются до 40—80 кг. Для отдельных подач при определенных скоростях резания наблюдается увеличение силы на задней грани в 5—10 раз. Аналогичные зависимости были получены и для других подач в диапазоне от $S = 0,059 \text{ мм/об}$ до $S = 0,43 \text{ мм/об}$.

Увеличение работы сил трения на задней грани с ростом затупления инструмента должно вызвать дополнительное выделение тепла в зоне контакта и рост температуры резания. Однако значительного увеличения температуры, как это следует из фиг. 5 и 6, не наблюдается (температура замерялась в делениях гальванометра естественной термопары чугун—твердый сплав ВК8). Для толстых срезов ($S = 0,291 \text{ мм/об}$, фиг. 6) температура на гранях инструмента во всем диапазоне затупления остается практически постоянной. Объясняется это повидимому тем, что при работе с большими подачами температура резания определяется в основном количе-

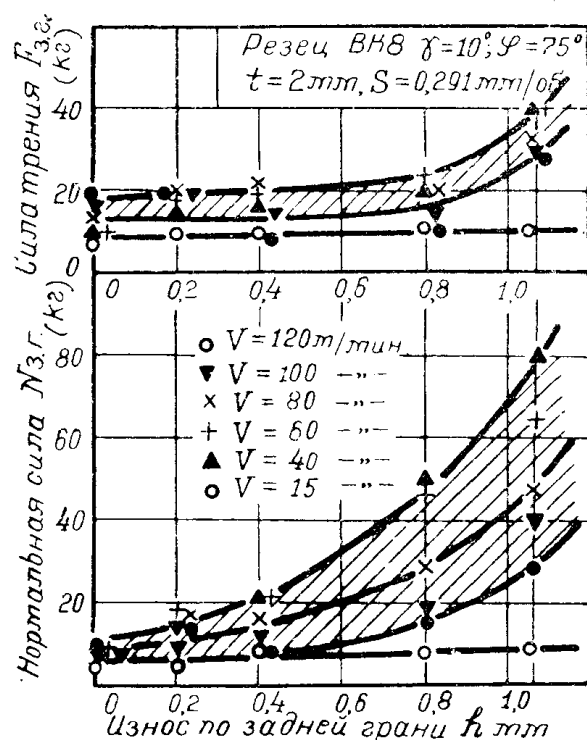


Фиг. 2



Фиг. 3

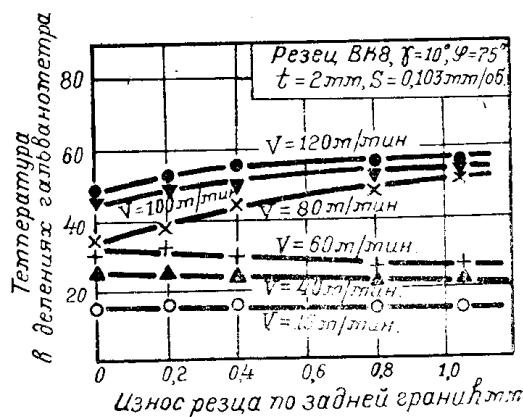
ством тепла, поступающего в резец через переднюю грань, величина последнего превалирует над количеством тепла, непосредственно образующегося на фаске износа. Дополнительное выделение теплоты трения на фаске износа не в состоянии сколько-нибудь существенно изменить тепловой баланс на гранях инструмента, тем более, что наряду с затуплением улуч-



Фиг. 4

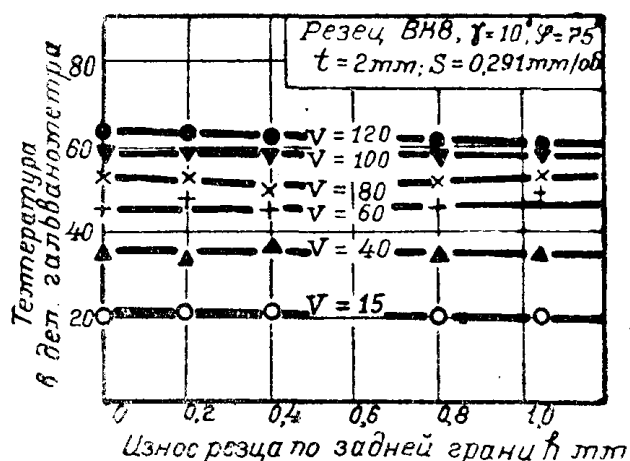
шается теплоотвод от режущей кромки резца (проявляется „охлаждающее“ влияние фаски износа). При снятии тонких стружек ($S \leq 0,1$ мм/об, фиг. 5) основной очаг теплообразования перемещается на заднюю грань. В этом случае температура на гранях инструмента, (а значит и интегральная температура, фиксируемая естественной термопарой), определяется количеством тепла, выделяющегося на фаске износа.

Для иллюстрации приводится расчет работы трения на гранях изношенного резца ($h = 1,05$ мм) при режиме резания $t = 2$ мм, $S = 0,054$ мм/об, $V = 120$ м/мин. Сила трения на передней грани для этих условий составляла 6 кг, сила трения на задней грани — 40 кг. Минутная работа трения на передней грани (без учета усадки стружки) $A_{пг} = 6 \times 120 = 720$ кгм/мин, а работа трения на задней грани $A_{зг} = 40 \times 120 = 4800$ кгм/мин. Соотношение работ трения указывает на то, что основной очаг теплообразования при резании с тонкими стружками находится в зоне контакта задней грани с обрабатываемым изделием. Естественно, что изменение работы трения в зоне контакта в данном случае заметно сказывается на тепловом



Фиг. 5

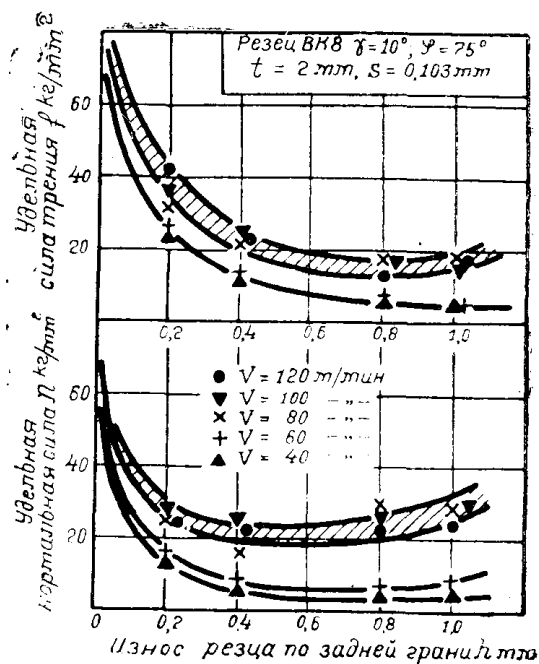
балансе на гранях инструмента и на показаниях гальванометра термопары. Необходимо отметить, что повышение температуры в связи с ростом фаски износа происходит медленнее, чем это следовало бы ожидать, исходя из анализа работы трения на задней грани, ввиду все более улучшающихся условий теплоотвода от режущей кромки резца. В тех случаях, когда работа трения на задней грани недостаточно велика ($V < 80$ м/мин, фиг. 5) „охлаждающее“ влияние фаски износа не только компенсирует рост температуры, но вызывает даже некоторое снижение ее.



Фиг. 6

Таким образом, при резании серого чугуна износ инструмента по задней грани происходит при непрерывном увеличении сил на задней грани и при более или менее постоянных температурных условиях. Совершенно ясно, что изменение интенсивности износа в различных зонах затупления (фиг. 2) связано с величиной сил на задней грани и с характером их изменения. Для анализа интенсивности износа резца с этой точки зрения были определены средние значения удельных сил на задней грани для различных фасок износа (фиг. 7 и 8).

Характер изменения n и f , представленный на фиг. 7 и 8, хорошо согласуется с кривой интенсивности износа резца по времени (фиг. 2). Для острого резца удельные силы на задней грани весьма значительны и являются основной причиной ускоренного износа резца в зоне „приработки“. Если считать, что площадь контакта острой кромки резца с обрабатываемым изделием меньше $0,1 \text{ мм}^2$, то удельные силы n и f должны превышать 100 кг/мм^2 . Зона „приработки“, как это следует из фиг. 7 и 8, будет определяться временем, необходимым для износа резца по задней грани до $h = 0,2 - 0,3 \text{ мм}$, после чего начнется „нормальный“ процесс затупления при более или менее постоянных удельных силах n и f . Зона III (зона ускоренного износа) начнется при достижении $h = 0,8 - 0,9 \text{ мм}$, т. к. при данной площади контакта начинается снова повышение удельных сил на задней грани



Фиг. 7

Площадь контакта реза с обрабатываемым материалом не остается индифферентной в процессе износа инструмента.

Ее влияние на износ проявляется в том, что она, во-первых, определяет абсолютную и относительную величину сил на задней грани реза, возникающих в результате упруго-пластического контакта трущейся пары резец-деталь, и что она, во-вторых, улучшает условия теплоотвода и в известной мере замедляет рост температуры в зоне трения.

Таким образом, при точении чугуна характер кривой износа и непостоянство интенсивности его в различные периоды затупления инструмента качественно вполне удовлетворительно объясняется динамикой сил на задней грани. В приложении к чугуну, как материалу хрупкому, при резании которого основную роль играет абразивный, механический вид износа металлорежущих инструментов, подобное упрощенное представление механизма износа вполне себя оправдывает.

Для твердых сплавов, обладающих высокой износостойчивостью, т. е. малой чувствительностью к изменению изнашивающих сил, кривая износа (фиг. 2) незначительно отличается от прямой. Тогда при данном критерии затупления h , можно оперировать со средним значением интенсивности износа

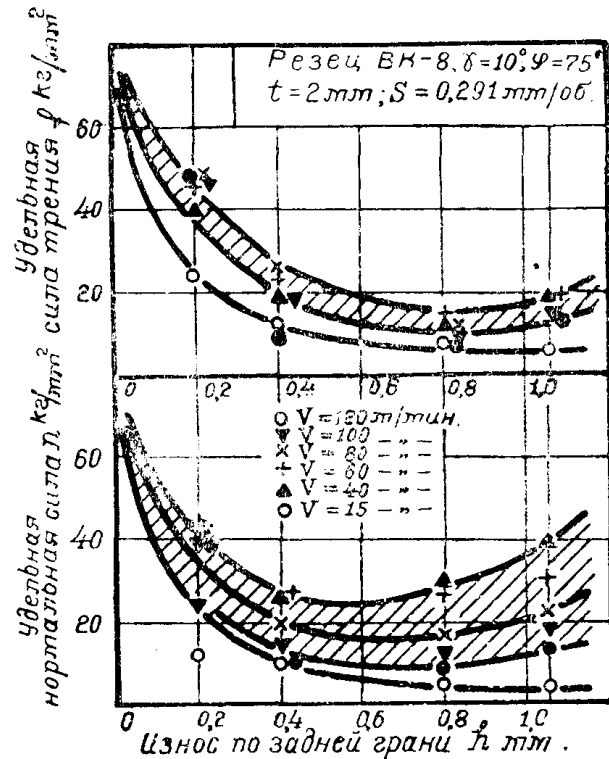
$i_{cp} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{h}{T}$, которая мало отличается от частных значений

$i = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \frac{h}{\tau}$ при текущем изменении координат h и τ (здесь T —стой-

кость инструмента для выбранного критерия затупления h).

При проведении стойкостных испытаний по определению оптимальной геометрии в первую очередь интересуются величиной заднего угла, наиболее существенно влияющего на стойкость инструмента, изнашивающегося в основном по задней грани.

Опыты в этих исследованиях проводятся при постоянном режиме резания и обрабатываемом материале, резцом с переменным задним углом при остальных неизменных геометрических параметрах. Очевидно, если пренебречь неравенством температур на гранях инструментов ввиду переменного угла заострения, то можно считать, что как величина удельных сил в зоне контакта, так и их изменение, по мере затупления, будут для всех случаев заточки одинаковыми. В таком случае средняя интенсивность износа для всех вариантов заточки должна быть постоянной, т. е. $i_{cp1} = i_{cp2} = i_{cp3} = \dots = i_{cpk}$, где 1, 2, 3, ... k —индексы резцов с различными задними углами. Согласно формулы (6) должно быть:



Фиг. 8

$$\frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_1 \frac{h}{T_1} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_2 \frac{h}{T_2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_3 \frac{h}{T_3} = \dots = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha_k \frac{h}{T_k} \quad (7)$$

или с учетом неравенства температур на гранях инструментов

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{T_1} \leq \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{T_2} \leq \frac{\operatorname{tg} \alpha_3}{T_3} \leq \dots \leq \frac{\operatorname{tg} \alpha_k}{T_k} \quad (7a)$$

при условии $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 \dots < \alpha_k$.

Выражение (7a) справедливо для всех значений задних углов до α_{opt} , определяемого экспериментально.

Неравенство (7a) теряет смысл для задних углов, превышающих оптимальное значение заднего угла, ввиду того, что при $\alpha > \alpha_{opt}$ режущий клин недостаточно прочен и износ резца будет определяться уже силами, действующими на передней грани.

Переходя к сравнению интенсивности износа резцов с задними углами $\alpha_2 > \alpha_1$, имеем:

$$\frac{T_2}{T_1} \leq \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} \quad (76)$$

или учитывая (1):

$$\frac{T_2}{T_1} \leq \frac{W_2}{W_1} \quad (7b)$$

Из формул (76) и (7b) следует, что выигрыш в стойкости за счет заднего угла пропорционален увеличению объема износа твердого сплава и численно совпадает с приращением тангенса заднего угла. Очевидно, что выигрыш в стойкости не может превышать отношения $\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}$. С увеличе-

нием заднего угла следует ожидать увеличения интенсивности объемного износа, так как при этом ухудшаются как условия теплоотвода из кончика резца, так и механическая прочность режущего лезвия.

В табл. 1 приводятся результаты стойкостных испытаний по определению α_{opt} при точении серого чугуна, показывающие справедливость неравенств (76) и (7b).

Таблица 1

№ пп	Условия опыта	α°	$T_{h=1,0}$ мин	$\alpha_1^\circ - \alpha_2^\circ$	$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$
1	Тв. сплав ВК8, чугун $H_B = 229 \text{ кг/мм}^2$ $V = 70 \text{ м/мин}$ $t = 2 \text{ мм}$ $S = 0,434 \text{ мм/об}$	9	12,5	9—15	1,7	1,7
		15	21,5	15—20	1,35	1,2
		20	25,0	9—20	2,3	2,0
2	Тв. сплав ВК8 Чугун $H_B = 190 \text{ кг/мм}^2$ $V = 150 \text{ м/мин}$ $t = 2 \text{ мм}$ $S = 0,43 \text{ мм/об}$	9	9,7	9—14	1,6	1,5
		14	14,9	14—20	1,45	1,2
		20	18,0	9—20	2,3	1,85
3	Тв. сплав ВК3 Чугун $H_B = 235 \text{ кг/мм}^2$ $V = 120 \text{ м/мин}$ $t = \text{мм}$ $S = 0,15 \text{ мм/об}$	10	21,0	10—15	1,5	1,7
		15	37,0	15—20	1,35	1,1
		20	42,0	10—20	2,0	2,0

Если в экспериментах по отысканию оптимального заднего угла формула (76) не подтверждается, то необходимо искать ошибку эксперимента. Д. К. Маргулис [3] при фрезеровании серого чугуна получил оптимальный задний угол $\alpha = 10^\circ$. Графики износа показывают, что практически такую стойкость имеет фреза с $\alpha = 14^\circ$. Было бы правильнее за оптимальный задний угол считать $\alpha = 14^\circ$, что соответствовало бы данным проф. М. Н. Ларина [2] по фрезерованию того же чугуна ($\alpha_{\text{опт}} = 15^\circ$) и не расходилось бы с отношением (7а). Необходимо отметить, что и в работе [2] также имеются противоречия. Так при изменении заднего угла с $\alpha = 5^\circ$ до $\alpha = 15^\circ$ прирост стойкости получен в 5 раз, а не в 3 раза, как это следовало ожидать из формулы (76) $\left(\frac{\text{tg}15^\circ}{\text{tg}5^\circ} \cong 3 \right)$.

Оснований для уменьшения интенсивности износа при переходе к большим задним углам никаких нет. Недостатком стойкостных опытов является единичность результатов, что не позволяет установить ошибку эксперимента. Наибольшие погрешности связаны с непостоянством механических свойств обрабатываемого чугуна и режущих качеств пластинок твердого сплава. Использование формулы (76) в известной мере позволит судить о надежности эксперимента и легко обнаружить ошибочный результат.

Возвратимся снова к формулам (76 и 7в). Следствием их анализа является вывод о том, что, во-первых, увеличение заднего угла дает пропорциональный выигрыш в стойкости инструмента. Пределом повышения заднего угла этой точки зрения является лишь механическая прочность режущего лезвия. В связи с этим вполне понятна тенденция конструирования инструмента с максимально возможными задними углами. Во-вторых, выигрыш в стойкости за счет заднего угла не приводит к экономии расхода твердого сплава по времени, поскольку интенсивность износа для всех вариантов заточки примерно одна и та же (строго говоря больше — для больших задних углов). Тем не менее использование инструментов с большими задними углами, поскольку они обеспечивают значительный выигрыш в стойкости, целесообразно как с точки зрения производительности процесса резания, так и с точки зрения себестоимости продукции. При работе с экономической стойкостью увеличение скорости резания для нового варианта заточки определяется равенством:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} \right)^m, \quad (8)$$

здесь: α_1 , V_1 и α_2 , V_2 — задний угол и скорость резания, соответствующая оптимальной стойкости, для 2 вариантов заточки задней грани.

Опытами [7] установлено, что при точении серого чугуна твердостью $H_B = 190-220 \text{ кг/мм}^2$, оптимальное значение заднего угла равно 20° , а показатель степени относительной стойкости $m = 0,38$. По сравнению с задним углом $\alpha = 8^\circ$, рекомендуемым нормативами, увеличение скорости резания составит:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{\text{tg}20^\circ}{\text{tg}8^\circ} \right)^{0,38} = 1,4 \text{ или } 140\%.$$

Наряду с увеличением скорости резания увеличится расход твердого сплава, приходящийся на одно изделие.

По сравнению с прежним режимом резания (V_1) расход твердого сплава составит (в %):

$$K_W = \left(\frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} \right)^{1-m} \times 100\% = \left(\frac{\text{tg}20^\circ}{\text{tg}8^\circ} \right)^{0,62} \times 100 = 180\%.$$

Фактический расход твердого сплава будет несколько выше, т.к. в выводах не учтено увеличение интенсивности износа за счет ухудшения теплоотвода для резца с большим задним углом.

Повышенный расход твердого сплава на более высоких скоростях резания полностью компенсируется ростом производительности труда и конечной себестоимостью металлообработки. Об этом говорит вся практика внедрения скоростных режимов резания.

Выводы

1. При точении серого чугуна характер кривой износа резцов и изменение интенсивности износа качественно вполне удовлетворительно объясняются динамикой сил резания на задней грани инструмента.

Причиной первоначального износа резцов следует считать высокие значения удельных сил p и f , величина которых на остром резце может превышать 100 кг/мм^2 . Для уменьшения первоначального износа следует затачивать фаску на задней грани шириной $0,1\text{--}0,2 \text{ мм}$ с нулевым задним углом. Зона нормального затупления инструмента характеризуется умеренным и более или менее постоянным значением удельных сил на задней грани ($10\text{--}30 \text{ кг/мм}^2$). При достижении определенной величины износа режущей кромки силы на задней грани возрастают, что приводит вновь к ускоренному затуплению инструмента.

2. Для характеристики интенсивности затупления инструментов, изнашивающихся по задней грани, предлагается относительная интенсивность объ-

емного износа резцов $i = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{h}{\tau}$, учитывающая геометрию инструмента

и линейную интенсивность нарастания фаски износа по времени.

Переход от линейной интенсивности износа к объемной может быть полезным для изучения механизма износа и вопросов стойкости методом радиоактивных изотопов, а так же при анализе интенсивности износа инструментов с переменной геометрией заточки.

3. Увеличение стойкости инструмента за счет заднего угла связано с пропорциональным увеличением объема износа твердого сплава и ограни-

чивается отношением $\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}$. Последнее выражение может служить в ка-

честве критерия достоверности эксперимента при определении оптимального заднего угла.

4. При конструировании инструментов, изнашивающихся по задней грани, необходимо стремиться к максимально возможным значениям задних углов. Необходимую механическую прочность режущего лезвия следует создавать за счет формы передней грани и других геометрических параметров ($\gamma, \varphi, \lambda, r$ и т.д.), влияющих на стойкость в значительно меньшей степени, чем задний угол.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б е с п р о з в а н н ы й И. М. Установление режимов резания на основе определения постепенного износа режущей кромки инструмента. Сборник „Резание металлов“, МВТУ им. Баумана. Машгиз, 1951
2. Л а р и н М. Н. Скоростное фрезерование чугунных заготовок. Сборник по обмену техническим опытом „Скоростное резание металлов“. Выпуск IV. Челябингосиздат, 1950
3. М а р г у л и с Д. К.—Скоростное резание металлов на ЧТЗ им. И. В. Сталина. Сборник по обмену техническим опытом „Скоростное резание металлов“, выпуск IV, Челябингосиздат, 1950.

4. Розенберг А. М.—Определение сил на задней грани резца. Сборник Зап. Сиб. филиала АН СССР. „Вопросы машиноведения и машиностроения“. Новосибирск, 1941.
 6. ВНИИ—Конструкции твердосплавного инструмента под редакцией И. И. Семенченко, Машгиз, 1951.
 6. МСС—Режимы скоростного резания металлов, ч. 1, Машгиз, 1950.
 7. Байкалов А. К.—Оптимальная геометрия резцов при скоростном точении серого чугуна, диссертация, Томск, 1952
-