

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАПРОЕКТИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЗЦА

(Условный коэффициент полезного действия режущей  
поверхности)

В. П. КОШАРНОВСКИЙ

Ученые и исследователи всесторонними и глубокими экспериментами в области резания установили неопровержимый факт, что для конкретного материала и для определенных режимов резания может быть подобрана наивыгоднейшая геометрия режущего инструмента.

Наилучшая геометрия исследователями обычно подбирается экспериментально и потом предлагается для работы в промышленности вместе с соответствующими таблицами режимов резания. Количественной, объективной оценки степени пригодности той или иной геометрии режущего инструмента при этом не дается. Следовательно, нельзя быть уверенным, что предложенная геометрия резца действительно наилучшая. Новаторы производства непрерывно предлагают более совершенную геометрию режущего инструмента и тем самым подтверждают высказанное нами положение. Более совершенная форма резцов позволяет новаторам производства снижать усилия резания, увеличивать стойкость резцов и тем самым обеспечивать повышение режимов резания.

Как показали многократные исследования, от формы пуансона резко меняется усилие, которое необходимо для деформирования одного и того же объема металла [1, 2, 3]. То же отмечено и в отношении формы передней режущей поверхности.

Нами для объективного сравнения работы различных резцов предложена комплексная оценка качества испытываемого профиля резца путем определения некоторой условной величины — коэффициента полезного действия режущей поверхности.

Приведем ряд замечаний исследователей и ученых, указывающих на необходимость поисков именно в этом направлении.

А. М. Даниелян отмечает, что ввиду чрезвычайной сложности процесса теплообмена при резании его трудно описать математически без большого количества допущений и упрощений. Выведенная таким образом формула мало пригодна для практического использования без большого количества поправочных коэффициентов, которые берутся опять-таки из новых опытов.

Кроме отмеченного А. М. Даниеляном, мы хорошо знаем, что наряду с теплообменом в резании имеется также значительное количество других факторов, влияющих на оптимальность процесса резания. Все эти факторы осложняют исследования и не позволяют быстро и достаточно объективно оценивать наблюдаемый процесс резания и качество режущей поверхности, которой производится резание.

М. В. Касьян, проводя исследования по рациональному управлению стружкой, указывает, что полученная им зависимость

$$v = f(T, s, t)$$

является малонадежной, поскольку для раскрытия этой зависимости приходится последовательно каждые два элемента принимать за постоянные и экспериментально выявлять связь  $v$  с третьим элементом. Потом объединять их математически в предположении, что комплексное влияние отдельных факторов на  $v$  такое же, как и раздельное их влияние.

Нужно целиком согласиться с высказанной М. В. Касьяном мыслью, что методика экспериментирования с отдельными параметрами при остальных неизменных, т. е. без учета взаимовлияния, является недостаточно надежной.

Последующее введение большого числа поправочных коэффициентов (А. М. Даниелян) и специальная математическая обработка по созданию комплексных формул (М. В. Касьян) снижает ценность полученных экспериментальных данных.

А. Н. Еремин [4] констатирует, что на протяжении столетия исследователи по вопросам резания металлов провели огромное количество экспериментов, «но нет еще такой теории, которая обобщала бы ряд явлений процесса резания, дала бы возможность сократить число экспериментов, позволила бы заранее предсказать закономерности изменения явлений и выбирать наиболее рациональные режимы обработки металлов резанием».

Причина этого лежит в сложности процесса резания металлов и взаимного влияния отдельных факторов друг на друга. Изменение скорости резания, сечения среза или геометрии резца неизбежно меняет температуру резания. Изменение температуры резания вызывает изменение физико-механических свойств срезаемого слоя металла и т. д. А. Н. Еремин указывает, что «...для объяснения явлений процесса резания необходимо применять законы металлофизики не формально, а с учетом комплексной взаимосвязи всех явлений процесса резания, происходящих в данный момент».

Проф. М. Н. Ларин [5] также отмечает, что методология исследования явлений, зависящих от различных факторов, путем определения влияния «... каждого фактора при строгом постоянстве всех других факторов... приводит к значительным погрешностям». При этом М. Н. Ларин указывает, что такая методология непригодна для определения оптимальной величины переднего угла на базе широких обобщений.

Б. Н. Ильин делает попытку комплексно характеризовать качество испытываемой геометрии резца по величине образующегося при резании напыла. Б. Н. Ильин использует наблюдавшееся им явление образования «напыла», размеры которого характеризуют величину пластических деформаций в зоне резания, создаваемую геометрией резца.

Не разбирая существа вопроса, отметим лишь, что такой метод является косвенным методом и не дает необходимых количественных оценок.

Ряд других исследователей оценивает качество принятой геометрии по усилиям, развивающимся при резании, или по характеру образования стружки и ее усадке.

В этом случае количественная оценка хотя и существует, но она оторвана от исходных данных, характеризующих свойства металла.

Рассмотрим понятие «наивыгоднейшая геометрия режущего инструмента» при различных условиях резания.

При тяжелом резании наиболее выгоднейшей геометрией режущего инструмента будет такая геометрия резца, при которой обеспечивается получение минимальных усилий при максимальном снятии стружки в единицу времени с обеспечением рациональной стойкости режущего инструмента.

При специальных требованиях геометрию режущих инструментов изменяют по соображениям обеспечения заданной формы изделия. В этом случае идут, как правило, на ухудшение условий резания. Поэтому здесь редко удается одновременно выполнить требования наиболее выгоднейшего резания с обеспечением заданных размеров и формы детали. Характерными примерами могут служить геометрия режущей части модульной червячной фрезы для зубофрезерования, профильные резьбовые резцы и т. п.

Рассмотрим тяжелое резание. В этом случае при исследовании целесообразно уметь комплексно оценить, насколько удачно подобрана та или иная геометрия режущего инструмента с точки зрения получения минимальных усилий резания при максимальном съеме стружки.

#### УСЛОВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для числовой оценки эффективности работы режущих поверхностей резцов сопоставим удельные работы при разрыве образца и при резании. Необходимо обратить внимание на то, что мы берем предел прочности  $\sigma_b$ , а не  $\sigma_{с.к.}$ , так как все данные режимов резания в справочниках задаются по  $\sigma_b$ . Известно [6], что удельная работа деформации при разрыве образца ( $a_b$ ) будет

$$a_b = k\sigma_b\delta, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, характеризующий отношение площади диаграммы к площади прямоугольника со сторонами  $\sigma_b$  и  $\delta$  (рис. 1),

$\sigma_b$  — предел прочности в кг/мм<sup>2</sup>,

$\delta$  — остаточное относительное удлинение образца после разрыва.

Удельная работа резания ( $a_{рез}$ ) будет:

$$a_{рез} = \frac{P_z l}{Fl}, \quad (2)$$

где  $P_z$  — главная составляющая резания в лг,

$l$  — путь, пройденный резцом в мм,

$F$  — площадь среза стружки в мм<sup>2</sup>.

Эффективность работы режущей поверхности резца условимся оценивать безразмерным коэффициентом (условным коэффициентом полезного действия режущей поверхности — условным к. п. д. рп), являющимся отношением удельной работы деформации при разрыве образца к удельной работе резания.

Тогда

$$\eta' = \frac{a_b}{a_{рез}}. \quad (3)$$

Подставим значения  $a_b$  и  $a_{рез}$ .

$$\eta' = \frac{k\sigma_b\delta}{\frac{P_z l}{Fl}}; \quad \text{так как } \frac{P_z}{F} = p,$$

то

$$\eta' = k\delta \frac{\sigma_{\text{в}}}{p}. \quad (4)$$

В заводских условиях определение  $k$  и  $\delta$  требует проведения специальных опытов, сама же величина  $\eta'$  из-за  $\sigma_{\text{в}}$  является условной,

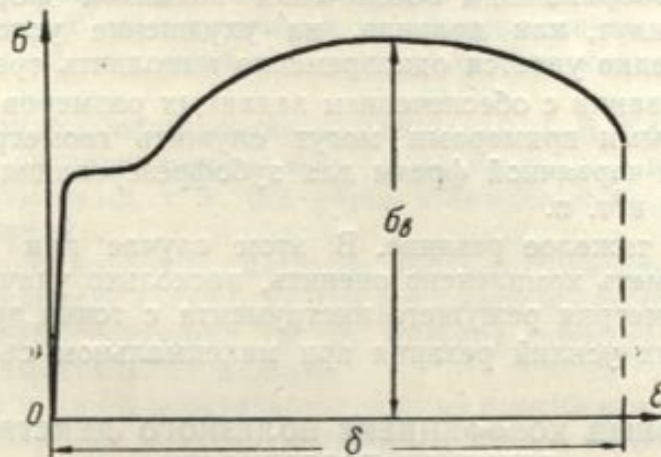


Рис. 1. Диаграмма напряжений при растяжении.

поэтому вместо  $\eta' = k\delta \frac{\sigma_{\text{в}}}{p}$  для сравнительной оценки эффективности работы резцов достаточно пользоваться пропорциональной ей величиной

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{в}}}{p}, \quad (5)$$

что и было нами сделано при проведении исследований по тяжелому резанию.

Многочисленными опытами доказано, что

$$p > \sigma_{\text{в}}. \quad (6)$$

Тогда из формулы (5) становится очевидным, что условный коэффициент полезного действия режущей поверхности будет всегда меньше единицы

$$\eta < 1. \quad (7)$$

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМУЛЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

##### Исследование изменения условного коэффициента полезного действия режущей поверхности в зависимости от изменения подачи

Проведем исследование формулы условного к. п. д. режущей поверхности и по данным для параметров, приводимым в справочниках по резанию, построим кривые условного к. п. д. рп.

Известно, что

$$P_z = C_p t^{x_{ps}} s^{y_p} \text{ кг}, \quad (8)$$

а удельное давление

$$p = \frac{P_z}{F} \text{ кг/мм}^2, \quad (9)$$

где  $F$  — площадь среза стружки, т. е.  $F = st$ .

$$(10)$$

Подставим в уравнение (9) значения  $P_z$  и  $F$ , тогда

$$p = \frac{C_p t^{x_p} s^{y_p}}{ts} \quad (11)$$

Из уравнения (5) и (11) определим условный к. п. д. рп в общем виде

$$\eta = \frac{\sigma_n}{C_p} t^{1-x_p} s^{1-y_p} \quad (12)$$

Для указанного материала величина  $\frac{\sigma_n}{C_p}$  есть постоянная.

Обозначим ее через  $C'_p$ .

Будем иметь

$$\eta = C'_p t^{1-x_p} s^{1-y_p} \quad (13)$$

По данным проф. А. М. Даниеляна, при резании стали, являющейся пластическим металлом, значение  $x_p$  примерно равно 1, а  $y_p = 0,75$ . Тогда наше уравнение (13) примет вид

$$\eta = C'_p s^{0,25} \quad (14)$$

Характер кривой условного коэффициента полезного действия режущей поверхности параболический.

Анализируя полученную формулу, мы видим, что в данном случае глубина резания в нее не входит, и, следовательно, изменяя глубину резания, мы не окажем влияния ни на увеличение, ни на уменьшение условного к. п. д. режущей поверхности. Иными словами, при тяжелом резании стали увеличение глубины резания не может помочь нам решить поставленный вопрос о наиболее эффективном использовании располагаемым усилием. Иное дело влияние на условный к. п. д. режущей поверхности подачи. С увеличением подачи мы будем иметь непрерывное повышение эффективности работы резца. Это означает, что при одной и той же нагрузке станка при наличии качественно спроектированной режущей поверхности мы можем снять большее сечение стружки за счет улучшения условного к. п. д. рп.

Для примера произведем подсчет значений условного к. п. д. рп для машиноподделочной стали с  $\sigma_n = 50 \div 60 \text{ кг/см}^2$ . Согласно данным комиссии по резанию, при  $\gamma = +20^\circ$  и  $\alpha = 6^\circ$

$$C_{p_z} = 171; \quad x_{p_z} = 1,00; \quad y_{p_z} = 0,78.$$

Следовательно, в этом случае выражение для условного к. п. д. режущей поверхности будет

$$\eta = 0,35 s^{0,22},$$

так как

$$C'_p = \frac{\sigma_n}{C_{p_z}} = \frac{60}{171} = 0,35.$$

Результаты подсчетов значений условных к. п. д. режущей поверхности как функции подачи для  $\gamma = +20^\circ$  и аналогично для  $\gamma = +10^\circ$  и  $\gamma = +30^\circ$  нами представлены в виде графиков (рис. 2).

Рассмотрим подробно кривую  $\eta$  для  $\gamma = +20^\circ$ .

Как мы видим из характера изменения этой кривой, с увеличением подачи условный к. п. д. рп непрерывно возрастает. До подачи 0,1 мм/р.х. кривая круто поднимается и достигает значения  $\eta = 0,21$  (21%). При увеличении подачи от 0,1 до 1 мм/р.х. условный к. п. д. рп продолжает относительно быстро расти и при  $s = 1 \text{ мм/р.х.}$  стано-

вится равным 0,35 (35%). Последующее увеличение подачи вызывает непрерывное улучшение условного к. п. д. рп. При увеличении подачи от 1 мм/р.х. до 6 мм/р.х. условный к. п. д. рп возрастает до 0,52 (52%). Следует здесь же указать, что анализу мы подвергли усредненные значения параметров, входящих в уравнение. Сама же формула (14) была выведена в результате исследования режущих поверхностей с плоской передней гранью. Учитывая сказанное, полученные значения условного к. п. д. рп для плоских режущих поверхностей не следует механически переносить на любые типы резцов.

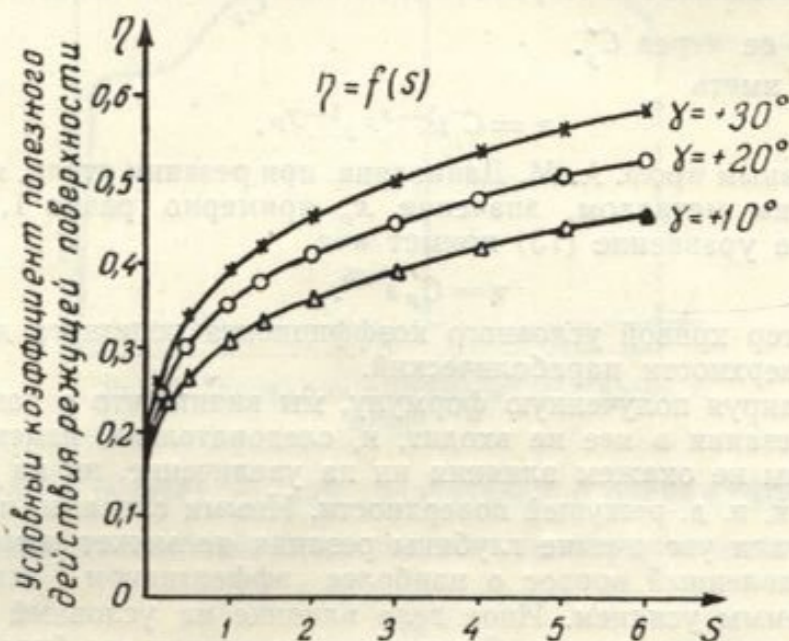


Рис. 2. Кривые изменения условного коэффициента полезного действия режущей поверхности в зависимости от подачи и переднего угла резания для стали  $\sigma_B = 50-60$  м/мин). (Исходные данные комиссии по резанию металлов).

Характер изменения кривой является типичным для кривых коэффициентов полезного действия машин, что еще раз подтверждает правильность принятого нами определения условного к. п. д. рп.

#### Исследование изменения условного к. п. д. передней режущей поверхности при различных $\gamma$

Н. И. Резников [7], анализируя формулу зависимости усилия резания  $P_z$  от переднего угла  $\gamma$ , указывает, что

а) по Тиме, для  $\delta$  от  $60^\circ$  до  $90^\circ$  получается почти пропорциональная зависимость

$$P_z = B_0 \delta;$$

б) По Зворыкину, степень при  $\delta$  несколько больше единицы, но очень незначительно. Характер зависимости тот же, что и у Тиме.

в) По данным исследований, проведенных Харьковским механико-машиностроительным институтом, при резании нержавеющей стали ЭЯ2 зависимость оказалась

$$P_z = c \delta^{0,99}$$

г) По некоторым другим испытаниям найдены следующие зависимости:

$$P_z = B_0 \delta^{1,08}; \quad P_z = c \delta^{0,67}.$$

Все указанные формулы можно представить в виде

$$P_z = c \delta^{y_0}, \quad (15)$$

где  $y_0 = 0,7-1,0$  в зависимости от обрабатываемого материала.

Н. И. Резников для углов  $\gamma = 5 \div 25^\circ$  переработал указанную формулу и представил ее в виде

$$P_z = \frac{c}{\gamma^{1,18}}. \quad (16)$$

Однако он здесь же отмечает, что при  $\gamma = 0$  значение  $P_z$  становится бесконечно большим, что не соответствует действительности.

Исходя из этого, комиссия по резанию приняла зависимость главного усилия резания от переднего угла в следующем виде:

$$P_z = \frac{c}{\alpha_{P_z}^1}, \quad (17)$$

где  $\alpha_{P_z}$  постоянная.

Для стали и чугуна она принята равной

$$\alpha_{P_z} = 1,012.$$

А. М. Даниелян [8] приводит значения поправочных коэффициентов для усилия резания

$$P_z = c \delta^{y_0}$$

в зависимости от переднего угла резания. Так, с уменьшением угла  $\gamma$  до  $+10^\circ$  усилие резания  $P_z$  увеличивается на 13%, а при увеличении до  $+30^\circ$  уменьшается почти на ту же величину. Соответственные изменения будет претерпевать и условный к. п. д. рп, что нами и учтено при подсчете значений  $\eta$ , приведенных на рис. 2.

Следует подчеркнуть, что рассмотренные эмпирические формулы (15, 16, 17) охватывают узкие пределы изменения передних углов и других параметров резания. Они не охватывают отрицательных углов, высоких скоростей резания и больших подач. Ограниченные пределы применения приведенных формул не позволяют провести аналитические исследования в общем виде.

#### Исследование граничного значения условного коэффициента полезного действия режущих поверхностей

Как известно, к. п. д. не может быть больше единицы.

Полученная нами формула (14) условного к. п. д. режущей поверхности для переменной подачи представляет собой параболическую зависимость

$$\eta = C'_p s^{0,25}.$$

Определим граничное значение для подачи ( $s$ ), когда  $\eta = 1$ .

Если определить численное значение для постоянной, пользуясь данными комиссии по резанию, то получим для нашего примера

$$C'_p = 0,35.$$

Определим из уравнения (14) максимальное значение подачи.

$$s^{0,25} = \frac{\eta}{C_p}; \quad s = \frac{\eta^4}{C_p^4}.$$

Подставим значения  $\eta = 1$  и  $C_p = 0,35$ , тогда

$$s = \frac{1}{0,35^4} = 2,86^4 \approx 67 \text{ мм/р. х.}$$

Такая подача для тяжелого резания не реальна. Для наиболее совершенной формы резца подачу при тяжелом резании до сих пор удавалось доводить лишь до 6 мм/р. х.

Следовательно, область, где условный к. п. д. режущей поверхности достигает единицы, т. е. своего максимального значения, выходит за пределы области применения действующих формул.

Теперь определим значение условного к. п. д. плоской режущей поверхности при наибольшем значении подачи  $s = 6 \text{ мм/р. х.}$ , которая может быть достигнута для резцов этого типа лишь со значительной перегрузкой станка. Принимая те же исходные данные, будем иметь

$$\eta_s = 0,35 \cdot 6^{0,25} \approx 0,55.$$

Следовательно, мы можем предугадать, что для плоской передней режущей поверхности условный к. п. д. при наибольшей подаче (6 мм/р. х) и рекомендуемом для данного металла  $\gamma$  будет иметь значение не выше 55%.

Параболическая зависимость изменения характера кривой условного к. п. д. режущей поверхности не дает обычного максимума для кривых к. п. д. Это показывает, что уравнение вида

$$P_z = C_p t^x p s^y$$

может применяться лишь при определенных условиях резания.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УСЛОВНОГО К. П. Д. РП

Сопоставление затрачиваемых усилий резания  $P_z$  при обработке резанием одного и того же материала резцами с различной геометрией дает нам возможность достаточно хорошо ориентироваться, в каком случае испытуемый резец более эффективно работает. Эту ориентировку мы почти полностью теряем, когда приходится обрабатывать другой материал.

Такую оценку можно произвести достаточно объективно при определении условного к. п. д. рп.

Для проверки изложенных положений произведено сравнительное исследование нескольких типов резцов. На значительном количестве режимов (свыше 1000) были замерены усилия резания, а для типичных режимов были произведены подсчеты величин  $\eta$  и построены графики.

Ниже приводятся экспериментальные данные, полученные при строгании стали 5 и марганцовистой меди двумя типами резцов (геометрия их приведена в табл. 1).

При строгании стали 5, для которой были запроектированы резцы, условный к. п. д. для плоской передней режущей поверхности дости-



гает значения 0,34 (100%), для резца же с оптимальной геометрией (по Ларину), имеющему фаску,  $\eta = 0,46$  (135%) (рис. 3).

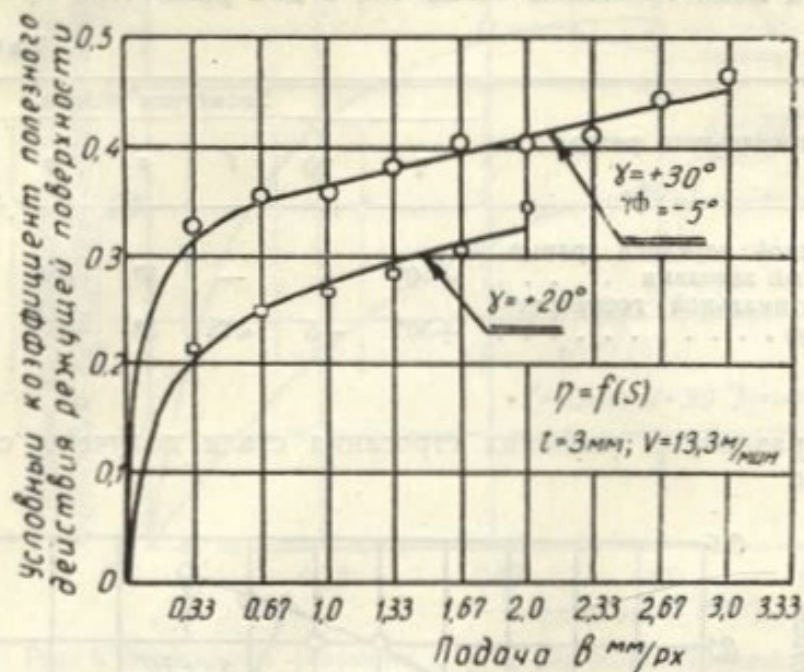


Рис. 3. Зависимость условного к. п. д. режущих поверхностей двух типов резцов от подачи при строгании стали 5 на режиме  $t=3$  мм,  $v=13,3$  м/мин.

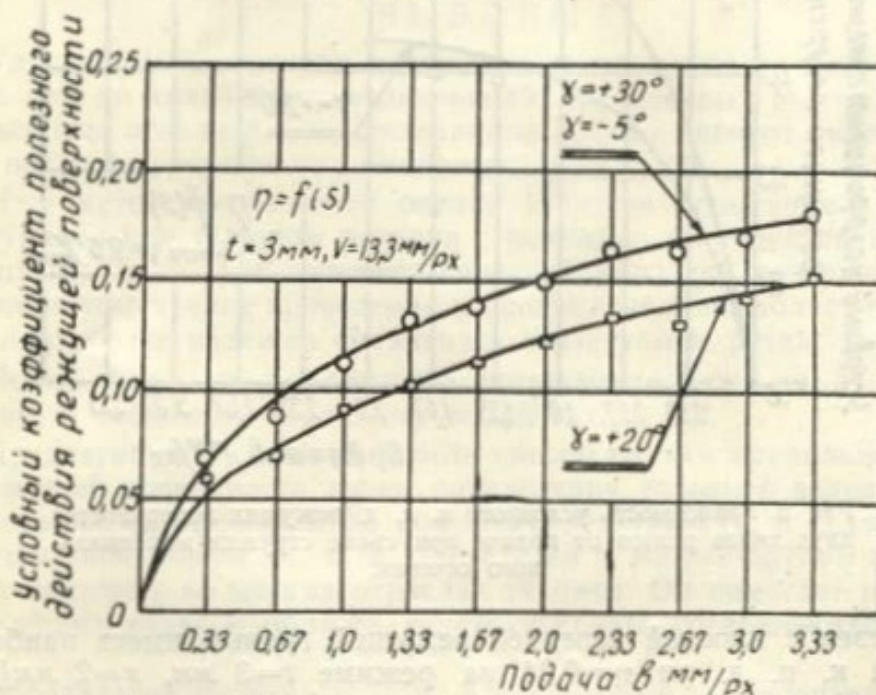


Рис. 4. Зависимость условного к. п. д. режущих поверхностей двух типов резцов от подачи при строгании марганцевистой меди на режиме  $t=3$  мм;  $v=13,3$  м/мин.

При строгании марганцевистой меди теми же резцами (рис. 4) условный к. п. д. рп при подаче  $s=3,33$  мм/р.х. оказался соответственно равным:

$$\eta_{+20^\circ} = 0,15 \text{ (100\%)},$$

$$\eta_{\text{оп. геом.}} = 0,18 \text{ (120\%)}. \quad \text{Б 312}$$

Данные показывают, что эффективность резцов при строгании марганцовистой меди снизилась более чем в два раза. При исследовании

Таблица 1

Тип строгального резца	Геометрия резцов						
	$\gamma$	$\gamma\phi$	$f$	$\alpha$	$\varphi$	$\varphi_1$	$\lambda$
Резец с плоской передней гранью, применяемый заводами . . . . .	$+20^\circ$	—	—	$8^\circ$	$45^\circ$	$20^\circ$	$0^\circ$
Резец с оптимальной геометрией (по Ларину) . . . . .	$+30^\circ$	$-5^\circ$	$< 2s$	$8^\circ$	$45^\circ$	$20^\circ$	$0^\circ$

резцов в различных условиях строгания стали получены следующие результаты.

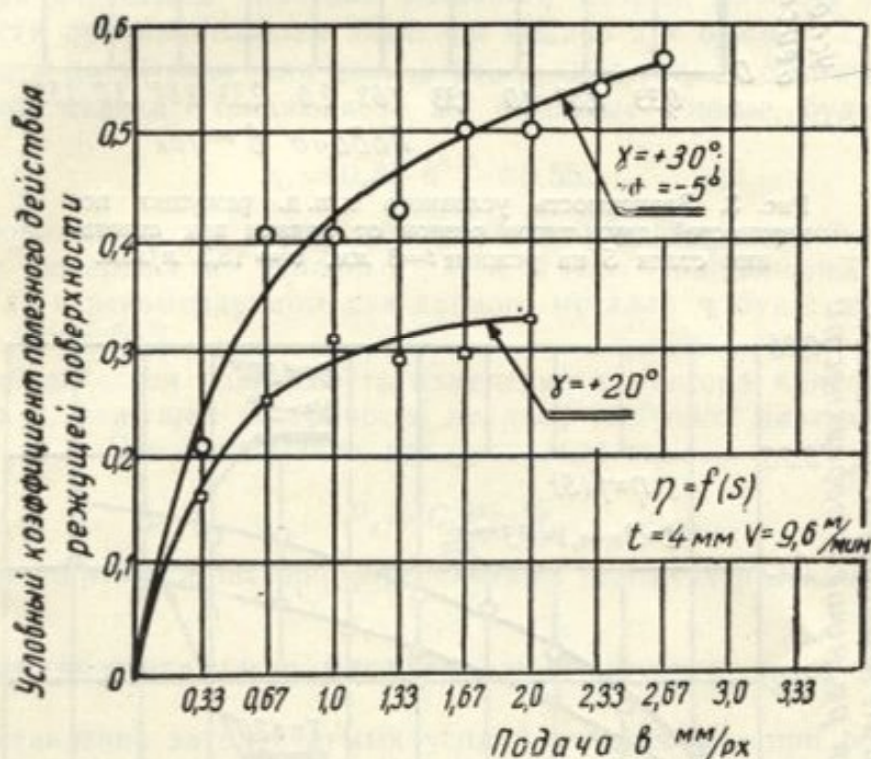


Рис. 5. Зависимость условного к. п. д. режущих поверхностей двух типов резцов от подачи при сьеме стружки максимального сечения.

1. Резец с плоской передней режущей гранью имеет наибольший условный к. п. д. рп  $\eta = 0,34$  на режиме  $t = 3 \text{ мм}$ ,  $s = 2 \text{ мм/р. х.}$  и  $v = 13,3 \text{ м/мин}$ .

2. Резец с оптимальной геометрией (по Ларину) имеет наибольшее значение условного к. п. д. рп (рис. 5)  $\eta = 0,57$  на режиме  $t = 4 \text{ мм}$ ,  $s = 3,0 \text{ мм/р. х.}$  и  $v = 9,6 \text{ м/мин}$ .

С увеличением сечения стружки за счет подачи работа оптимальными резцами (по Ларину) станет еще более выгодной.

Повышение скорости резания дает увеличение минутного сьема стружки, но для исследовавшихся профилей снижает условный к. п. д. рп (рис. 6).

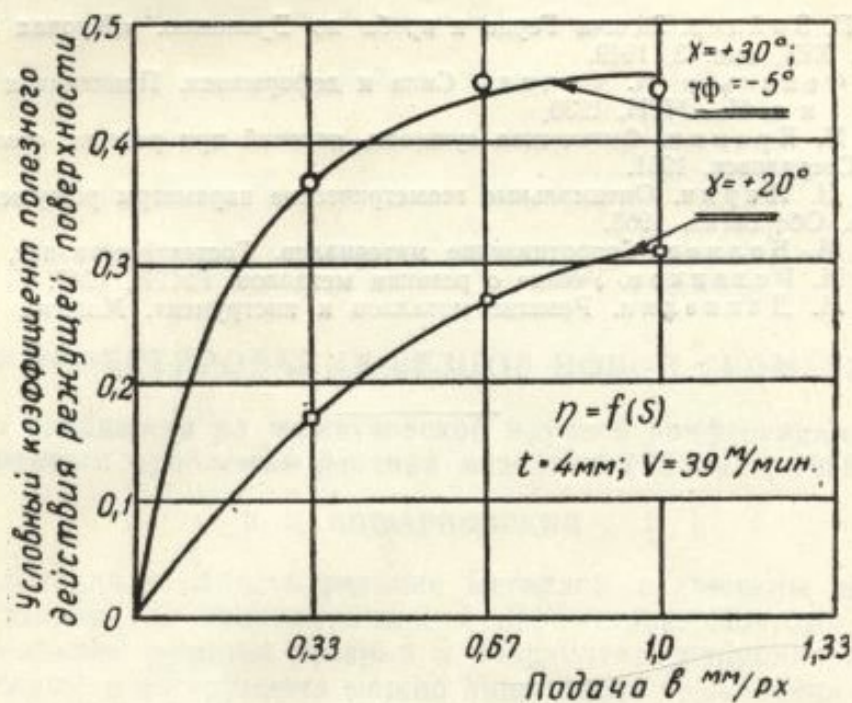


Рис. 6. Зависимость условного к. п. д. режущих поверхностей двух типов резцов от подачи при наибольшем минутном съеме стружки.

## ВЫВОДЫ

Улучшением геометрии режущего инструмента занимаются уже много лет, но количество исследований, проведенных в этом направлении, все еще невелико. Опубликованные работы решают частные вопросы и построены на простой эмпирике.

Наш метод комплексной оценки качества испытуемого режущего инструмента при тяжелом резании с помощью условной величины «коэффициента полезного действия передней режущей поверхности» дает некоторое ускорение проведения исследований и позволяет в числовых величинах более надежно сравнивать исследуемые резцы.

Повышение к. п. д. режущего инструмента даже на 1% дает значительную экономию народному хозяйству.

Предлагаемый в данной работе способ оценки правильности выбора режущей поверхности путем определения условной величины, которая названа «коэффициентом полезного действия (к. п. д.)», не является чем-либо новым. К. п. д. двигателей и машин-орудий прочно вошел в практику во многих отраслях техники. Он помогает решать ряд сложнейших задач в области конструктивного совершенствования машин.

Определение понятия к. п. д. в применении к режущим поверхностям связано со своеобразными трудностями. Пока лишь сделана первая попытка установления к. п. д. резца. Однако даже условный к. п. д. режущих поверхностей позволил ускорить процесс исследования.

Определяя условный к. п. д. рп, заводы могут более целесообразно проводить сокращение номенклатуры резцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Ф. Витман, Н. Н. Давиденко, Н. А. Влатин, Б. С. Иоффе. О применении конического отпечатка к изучению влияния скорости на сопротивление деформированию металлов. Ж. «Заводская лаборатория», 1948, № 5.

2. Г. П. Зайцев. Задача Герца и проба по Бринеллю. «Журнал технической физики», т. XIX, вып. 3, 1949.
3. А. Фенпль и Л. Фенпль. Сила и деформация. Прикладная теория упругости, т. I и т. II, ГНТИ, 1933.
4. А. Н. Еремин. Физическая сущность явлений при резании стали, Машгиз, Москва—Свердловск, 1951.
5. М. Н. Ларин. Оптимальные геометрические параметры режущей части инструментов. Оборонгиз, 1953.
6. Н. М. Беляев. Сопротивление материалов. Гостехтеоретиздат, М., 1953.
7. Н. И. Резников. Учение о резании металлов. ГНТИ, 1947.
8. А. М. Даниелян. Резание металлов и инструмент. Машгиз. 1950.