

СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ РАБОТЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ

А. М. РОЗЕНБЕРГ

Общие соображения

Работа, затрачиваемая на процесс резания металлов, расходуется на деформацию стружки и обработанной поверхности, а также на преодоление сил трения на передней и задних гранях инструмента. Кроме этого совершенно незаметная часть работы расходуется на образование новой поверхности. Это часть работы связана с поверхностной энергией обрабатываемого металла, составляет исчезающе малую часть общей работы резания и может не приниматься во внимание. Деформации в процессе резания могут быть упругими, пластическими и хрупкими, причем под хрупкими деформациями мы понимаем такие, при которых образуется стружка, снимаемая с хрупкого металла. В этом случае, по существу говоря, мы имеем дело с упругими и незначительными пластическими деформациями, приводящими к разрушению металла превращаемого в стружку.

Всю работу резания можно разделить на работу деформации в зоне сдвига стружки A_s , работу деформации обработанной поверхности A_r , работу трения на передней грани A_F и работу трения на задней грани A_{F1} . В работы деформации входят как работы упругой, так и пластической деформации, причем выделять в отдельное слагаемое работу упругой деформации нет смысла, с одной стороны, ввиду трудности ее учета, с другой стороны, ввиду ее малости в сравнении с работой пластической деформации, особенно при резании пластичных металлов. Деформация обработанной поверхности (поверхности среза) отчасти является результатом волны пластической деформации, опережающей режущую кромку, инструмента, распространяющейся от плоскости сдвига вперед и несколько вглубь в область обработанной поверхности, отчасти результатом работы сил трения на задней грани инструмента в процессе взаимодействия задней грани с поверхностью среза. Эта последняя часть совершается работой трения на задней грани. Поэтому целесообразно работу деформации обработанной поверхности (точнее поверхности среза) также отдельно не учитывать, часть ее считать включенной в работу деформации стружки, часть же считать выраженной работой сил на задней грани инструмента.

Таким образом можно окончательно считать, что вся работа резания A суммируется из следующих существенных и заметных по величине частей: работы деформации A_s , производимой в зоне сдвига стружки, работы трения на передней грани A_F , и работы трения на задней грани A_{F1} , то есть

$$A = A_s + A_F + A_{F1}. \quad (1)$$

Следует отметить, что работа трения на передней грани инструмента, расходуемая на преодоление сил трения между стружкой и передней гранью, также осуществляет деформацию стружки в зоне прирезцового

слоя и с этой точки зрения ее можно было бы включить в работу деформации стружки, однако лучше ее оставить самостоятельной частью, так как деформация ею осуществляемая в прирезцовом слое стружки является вторичной, накладывающейся на первичную деформацию, полученную стружкой в зоне сдвига. Таким образом работа деформации A_c расходуется на деформацию стружки в зоне сдвига и результатом этой работы является выделение тепла деформации и нагрев металла в зоне сдвига. Работа трения на передней грани A_F расходуется на вторичную деформацию прирезцового слоя и результатом ее является дополнительный нагрев прирезцового слоя стружки, что в совокупности с нагревом стружки в зоне сдвига создает ту или иную температуру на передней грани инструмента. Работа трения на задней грани A_{F_1} дает выделение тепла в зоне контакта задней грани с поверхностью среза и в совокупности с прогревом режущей части инструмента со стороны его передней грани создает температуру на задних гранях.

Износ инструмента по передней и задним граням несомненно связан с работами трения A_F и A_{F_1} , совершаемыми на этих гранях силами трения F и F_1 и поэтому работы трения имеют самостоятельный интерес в приложении к вопросам стойкости и износа инструмента.

Имеющиеся исследования

Разделение работы резания на составляющие ее части представляет существенный интерес. На это указывает то обстоятельство, что уже в работах Брикса [1], а затем Рудника [2] сила резания, а значит и работа резания, представляется состоящей из двух разнородных частей, одна из которых пропорциональна поперечному сечению срезаемого слоя, другая пропорциональна полупериметру поперечного сечения среза.

Впервые примерные процентные соотношения между отдельными составляющими работы резания предложил проф. Глебов [3]. По его данным эти соотношения являются следующими:

Составные части работы резания	Обрабатываемый металл	
	чугун	сталь
Работа срезания	25—45%	6—25%
Работа деформации	40—65%	65—85%
Работа трения	10—16%	10—15%

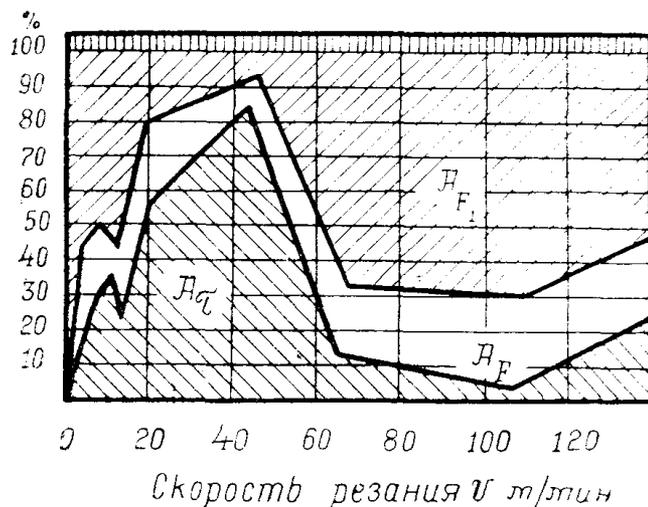
Это разделение было предложено Глебовым на основе лишь гипотетических предположений, так как в его распоряжении не было необходимых материалов для более или менее точного расчета таких существенных элементов как сила трения и работа трения. Мы уже в свое время указывали, что Глебов явно переоценил роль работы срезания, которая должна быть исчезающе малой [4].

Первую схему, показывающую изменение отдельных составляющих работы резания при изменении скорости резания дал проф. Касьян [5]. Эта схема приводится в ряде работ и представлена нами на фиг. 1.

Из схемы проф. Касьяна следует, что при резании стали работа деформации может изменяться в очень широких пределах от 3 до 84%, работа трения на передней и задней гранях меняется от 16 до 97%, при-

чем работа трения на задней грани сама по себе может составлять от 8 до 90%. Доля работы трения на передней грани сравнительно невелика и составляет от 8 до 30% общей работы резания.

Как мы видим, схема Касьяна количественно несравнима с данными Глебова.



Фиг. 1

Расчет отдельных составляющих работы резания для сталей на основании экспериментальных данных проведен Клушиным [6], причем в пределах изменения скорости резания от 3 до 143 м/мин им получены следующие изменения:

Работа деформации	47—64%.
Работа трения на передней грани	31—37%.
Работа трения на задней грани	3—17%.

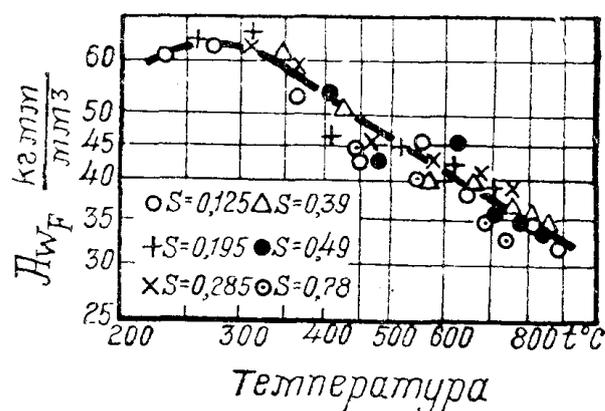
Здесь даны крайние пределы изменения для двух сталей, поэтому сумма может не составлять 100%.

Данные Клушина совершенно несравнимы с данными Касьяна и очень значительно отличаются от величин предложенных Глебовым в отношении работы трения, которая Глебовым оценивается в 10—15%, Клушиным же в 34—54%.

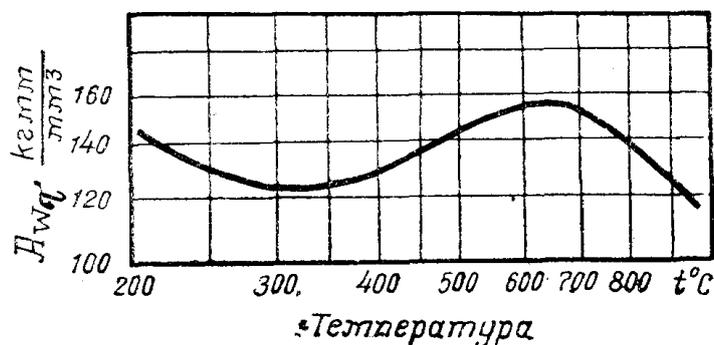
Заслуживающие внимание данные о работе резания имеются у Зорева [7]. Зорев рассчитал на основании экспериментальных материалов удельные работы деформации и удельные работы трения на передней грани резца при резании стали 40 и поставил их в зависимость от температуры на передней грани. Удельная работа является частным от деления общей работы на объем превращаемого в стружку металла. Поэтому при постоянном поперечном сечении срезаемого слоя соотношения общих и удельных работ одинаковы и безразлично, сравнивать общие или удельные работы. На фиг. 2 мы приводим график Зорева, представляющий изменение удельной работы трения на передней грани, а на фиг. 3 график, представляющий изменение удельной работы деформации.

Работа трения на задней грани Зоревым не представлена, поэтому по данным Зорева можно судить о двух составляющих A_{τ} и A_F . Фиг. 2 и 3 показывают, что, если принять сумму $A_{\tau} + A_F$ за 100%, то соотношения этих отдельных составляющих к их сумме могут быть следующими:

Температура в °	Работа деформации в %	Работа трения в %
300	66	34
650	79,4	20,6
900	74	26



Фиг. 2



Фиг. 3

Если предположить, что работа трения на задней грани составит приблизительно 10% от общей работы, от соотношения работы деформации и работы трения к общей работе резания будут немного ниже. Таким образом по данным Зорева в тех случаях, когда работа трения на задней грани относительно невелика (это будет иметь место при толстых срезах), доля работы деформации в общей работе резания может быть оценена в 60—66%, доля работы трения на передней грани в 30—24%. Эти величины, как мы видим, примерно соответствуют тому, что получил Клушин и совершенно несравнимы со схемой Касьяна.

По Зореву с повышением температуры на передней грани, т. е. с повышением скорости резания, доля работы деформации изменяется незначительно и всегда остается большей, чем работы трения на передней грани. То же самое и по данным Клушина. По схеме же Касьяна доля работы деформации с изменением скорости резания может изменяться более, чем в 20 раз, причем она может быть как в несколько раз больше, так и в несколько раз меньше работы трения на передней грани инструмента.

Таким образом приведенные краткие материалы показывают, что в этом вопросе имеются явные противоречия. Мы имеем большой экспериментальный материал, собранный в исследовательских работах кафедры станков и резания металлов, который дает нам возможность не только установить действительные соотношения отдельных составляющих работы резания, но и сделать некоторые обобщенные выводы. Все наши выводы будут относиться при резании сталей к той области средних и высоких скоростей резания, в которой нарост на инструменте отсутствует.

Исходные зависимости и обозначения

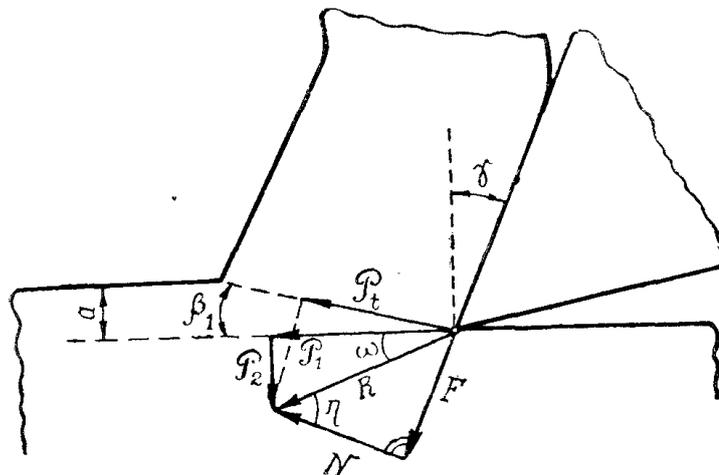
Как общую работу резания A , так и составные ее части A_z , A_F и A_{F_1} можно выразить аналитически. Если определять минутную работу, то будут получены следующие выражения

$$A = P_z \cdot V, \quad (2)$$

$$A_F = F \cdot V_F = F \frac{V}{\zeta}, \quad (3)$$

$$A_{F_1} = F_1 \cdot V, \quad (4)$$

$$A_\tau = P_\tau \cdot V_\tau. \quad (5)$$

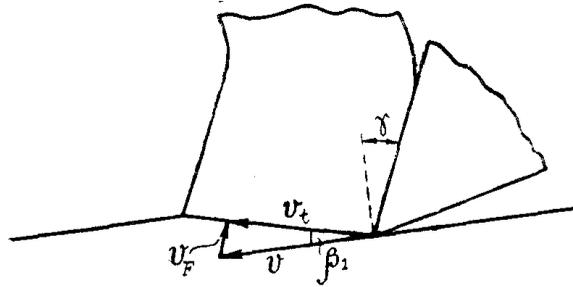


Фиг. 4

Здесь (фиг. 4 и 5):

- V — скорость резания,
- V_F — скорость перемещения стружки по передней грани инструмента,
- V_τ — скорость перемещения в плоскости сдвига стружки,
- ζ — усадка стружки,
- P_z — главная составляющая сила резания,
- F — сила трения на передней грани,
- F_1 — сила трения на задней грани, действует в направлении скорости резания V ,

P_τ — сила в плоскости сдвига, осуществляющая сдвиг металла при образовании стружки.



Фиг. 5

Удобно все дальнейшие выводы и рассуждения осуществлять пользуясь удельными работами, т. е. работами, отнесенными к единице объема металла превращаемого в стружку. Назовем: удельная работа резания A_w ,

удельная работа деформации в зоне сдвига стружки $A_{w\tau}$,

удельная работа трения на передней грани A_{wF} ,

удельная работа трения на задней грани A_{wF_1} .

Тогда:

$$A_w = \frac{A}{abv} = \frac{A}{stv} = \frac{P_z}{ab} = \frac{P_z}{st} \quad (6)$$

$$A_{wF} = \frac{A_F}{abv} = \frac{A_F}{stv} = \frac{F}{ab\zeta} = \frac{F}{st\zeta} \quad (7)$$

$$A_{wF_1} = \frac{A_{F_1}}{abv} = \frac{A_{F_1}}{stv} = \frac{F_1}{ab} = \frac{F_1}{st} \quad (8)$$

$$A_{w\tau} = \frac{A_\tau}{abv} = \frac{A_\tau}{stv} = \frac{P_\tau V_\tau}{abv} = \frac{P_\tau V_\tau}{stv} \quad (9)$$

Здесь a, b — толщина и ширина среза,
 s, t — подача и глубина резания.

Кроме этого удельную работу резания A_w можно представить состоящей из двух частей, — удельной работы, совершаемой передней гранью инструмента A_{wn} и удельной работы на задней грани $A_{wз}$.

При этом

$$A_w = A_{wn} + A_{wз},$$

$$A_{wn} = A_{w\tau} + A_{wF},$$

$$A_{wn} = \frac{P_1 v}{abv} = \frac{P_1}{ab} = \frac{P_1}{st},$$

$$A_{wз} = A_{wF_1}.$$

Здесь P_1 — часть силы P_z , приложенная на передней грани

$$P_1 = P_z - F_1.$$

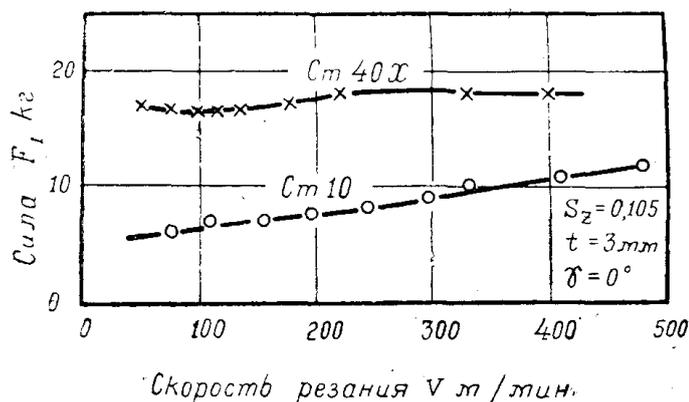
Удельные работы на передней и задней гранях инструмента имеют различные закономерности изменения при изменении параметров резания.

Это вполне естественно, так как первая из них связана с процессом деформации стружки и поэтому должна зависеть от усадки стружки, степени деформации ее, переднего угла инструмента, трения на передней грани, износа передней грани. Работа же на задней грани в явной форме не связана с процессами, протекающими на передней грани инструмента. Сила F_1 , определяющая работу на задней грани, не зависит в заметной степени от переднего угла инструмента, от степени деформации стружки, от толщины срезаемого слоя и в значительной степени связана с величиной затупления по задней грани. Выясним, прежде всего, относительную величину удельной работы на задней грани.

Удельная работа на задней грани инструмента

Величина удельной работы на задней грани может быть рассчитана, если известна сила F_1 . Сила F_1 может быть получена только экспериментально путем специальных методов определения сил на задних гранях [7,8]. Уравнение (8) показывает, что A_{WF_1} зависит от F_1 , a , b . На основании ряда проведенных исследований [9,10] можно считать, что при обычных стружках, когда ширина значительно больше толщины срезаемого слоя, сила трения на задней грани не зависит от толщины среза и переднего угла инструмента и прямопропорциональна ширине среза. Поэтому, в соответствии с уравнением (8) можно сделать заключение, что удельная работа на задней грани не будет изменяться при изменении ширины среза (b, t) и будет обратнопропорциональна толщине среза.

Для очень малых толщин среза, которые могут иметь место при работе фрез, разверток, протяжек, удельная работа A_{WF_1} может быть очень большой. При работе шлифования, когда снимаются особенно тонкие стружки, работа на задней грани режущего элемента составит основную и наибольшую часть всей работы, затрачиваемой на процесс резания. И наоборот при крупных стружках, при работе резцов, сверл, зенкеров, прогрессивных протяжек, удельная работа на задних гранях будет очень невелика и может составлять совершенно незначительную часть общей работы резания.



Фиг. 6

Силы на задней грани острого режущего элемента очень невелики; они исчисляются при резании сталей обычно несколькими килограммами на 1 мм длины режущей кромки. С повышением скорости резания и температуры они обычно немного возрастают. Это иллюстрируется фиг. 6, на которой показано изменение силы F_1 , при скоростном фрезеровании торцевыми фрезами сталей 10 и 40 X с подачей на зуб 0,105 мм и

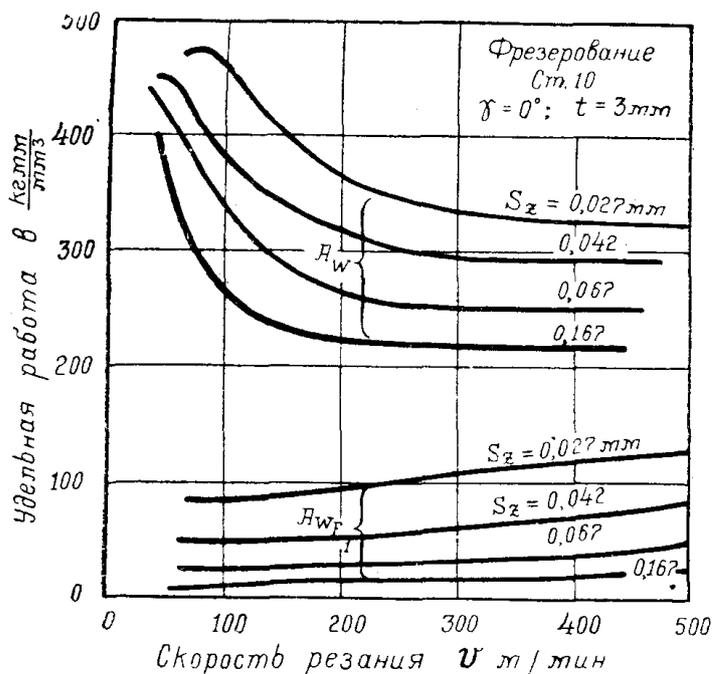
глубиной фрезерования (шириной среза) 3 мм. Фиг. 6 показывает, что на 1 мм длины режущей кромки приходится от 2,0 до 4 кг при фрезеровании стали 10 и от 5,0 до 6,0 кг при фрезеровании стали 40 X [11].

Воспользовавшись подобными экспериментальными материалами не представляет затруднения рассчитать удельные работы на задней грани.

На фиг. 7 нами приведен график изменения общей удельной работы A_w и удельной работы на задней грани A_{WF_1} в зависимости от скорости

резания и подачи на зуб при скоростном фрезеровании стали 10 торцевой фрезой [11]. Этот график показывает, что с увеличением подачи на зуб S_z , как общая удельная работа, расходуемая на весь процесс резания, так и удельная работа на задней грани значительно уменьшаются.

Представляет интерес показать удельную работу на задней грани в процентах от всей удельной работы резания. Это сделано на фиг. 8, которая построена по фиг. 7, причем здесь показано изменение удельной

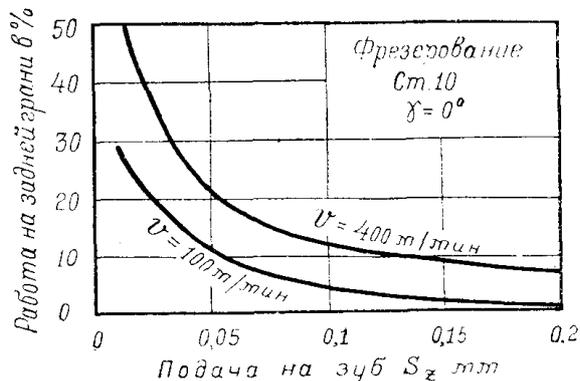


Фиг. 7

работы на задней грани в процентах от общей удельной работы в зависимости от подачи на зуб S_z для двух скоростей резания. Фиг. 8 показывает, что при очень тонких стружках удельная работа на задней грани может составлять более 50 % от общей, при толстых же стружках доля ее в общей работе становится малосущественной. Так уже при $S_z = 0,2 \text{ мм}$ A_{WF1} составляет 1—7% от общей работы, если же и далее увеличивать толщину среза, то удельная работа на задней грани и далее будет снижаться как по абсолютной величине, так и по отношению к общей работе.

То же самое показано на фиг. 9 для случая скоростной токарной обработки стали ШХ15 [10], с тем только отличием, что здесь график построен не для постоянной скорости резания, а для режимов постоянной усадки стружки, т. е. постоянной температуры на передней грани.

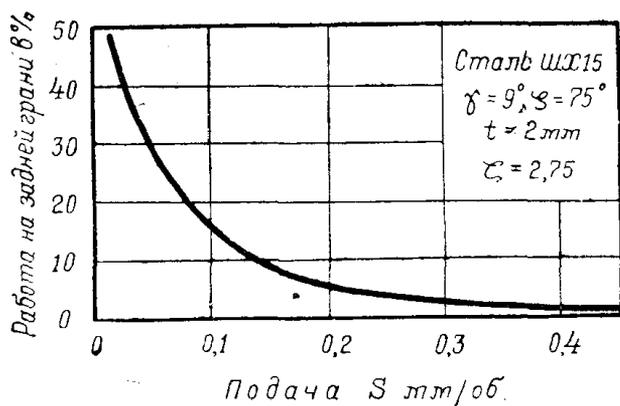
Из фиг. 9 следует, что, начиная с подачи $S = 0,15—0,2 \text{ мм/об}$ удельная работа на задней грани становится столь незначительной в общей ра-



Фиг. 8

боте резания, что ею для случая обработки стали острым режущим инструментом можно пренебрегать при расчете сил резания, мощности и работы резания.

Это нами было уже ранее экспериментально доказано для случая скоростного резания 8 различных марок углеродистых и легированных сталей [12].



Фиг. 9

Как показывают фиг. 8 и 9 при фрезеровании и токарной обработке сохраняются примерно одинаковые соотношения удельных работ на задней грани с общими удельными работами резания. Это вполне естественно, так как природа сил на задней грани во всех процессах резания должна быть одной и той же, ибо силы на задней грани являются силами упруго-пластичес-

кого контакта участка задней грани, соприкасающегося с поверхностью резания.

Как показали опыты Ю. П. Зимина по стали и Ю. А. Розенберга по чугуну силы на задней грани растут примерно пропорционально твердости обрабатываемого металла. Подобным же образом будет расти и удельная работа на задней грани A_{WF1} . Но соотношения ее с общей удельной работой резания будут для всех сталей примерно такими же как это показано на фиг. 8 и 9, потому что при повышении твердости обрабатываемого металла будут расти не только силы и работа на задней грани, но параллельно с этим также силы и работа на передней грани. Поэтому заключение о малосущественной доле удельной работы на задней грани в общей работе резания при снятии значительных толщин стружки может быть распространено на все стали.

С учетом этого становится очевидной ошибочность схемы Касьяна, в которой доля работы на задней грани достигает 70% от всей работы резания, тем более, что схема Касьяна построена для случая работы с подачей достаточно крупной ($S = 0.466$ мм/об).

На основании того, что при обычно применяемых подачах и толщинах среза доля работы на задней грани для острого инструмента очень мала, мы в дальнейшем положении будем рассматривать отдельно работы деформации и трения на передней грани, и устанавливать их взаимные соотношения без учета работы на задней грани. Это тем более удобно, что для работы на передней грани и их соотношений мы сможем сделать некоторые обобщенные выводы и связать эти работы и с физико-механическими характеристиками обрабатываемого металла, чего мы не можем сделать в отношении работы на задней грани.

Удельные работы деформации и трения на передней грани инструмента

Для удельной работы деформации в зоне сдвига стружки было приведено уравнение (9). В этом уравнении согласно фиг. 4 и 5

$$P_{\tau} = P_1 \frac{\cos(\omega + \beta_1)}{\cos \omega},$$

$$\frac{V_{\tau}}{V} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma)},$$

$$A_{W\tau} = \frac{P_1}{ab} \cdot \frac{\cos(\omega + \beta_1)}{\cos \omega} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma)}.$$

Если принять во внимание, что касательное напряжение τ в плоскости сдвига

$$\tau = \frac{P_{\tau} \cdot \sin \beta_1}{ab} = \frac{P_1}{ab} \cdot \frac{\cos(\omega + \beta_1)}{\cos \omega} \cdot \sin \beta_1,$$

то

$$A_{W\tau} = \tau \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma) \sin \beta_1}.$$

Здесь

$$\frac{\cos \gamma}{\cos(\beta_1 - \gamma) \sin \beta_1} = \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma} = \epsilon,$$

где ϵ — относительный сдвиг металла при образовании стружки. Поэтому

$$A_{W\tau} = \tau \epsilon. \quad (10)$$

Таким образом удельная работа деформации в зоне сдвига при резании равна произведению касательного напряжения на относительный сдвиг.

Кроме этого нами было доказано экспериментально, что удельная работа деформации при резании пластичных металлов равна удельной работе деформации при сжатии [13, 12]. Благодаря этому мы можем удельную работу деформации при резании выразить через физико-механические характеристики обрабатываемого металла и получить зависимость

$$A_{W\tau} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n\epsilon}{1.5}} - 1 \right\}. \quad (11)$$

Здесь e — основание натуральных логарифмов,

σ_0 и n — параметры политропы напряжений при сжатии, причем σ_0 — условный предел текучести при сжатии, n — показатель упрочнения.

Параметры политропы напряжений при сжатии связывают напряжение со степенью деформации $\frac{h_0}{h}$ при сжатии по зависимости

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^n,$$

где h_0 — высота образца до сжатия,

h — высота деформированного образца, для которого определяется напряжение σ .

σ_0 и n могут быть определены опытом сжатия образца из обрабатываемого металла [14]. При сжатии нужно брать исходные размеры образца $h_0 = 2,5 d_0$ для уменьшения влияния трения на торцах на напряженное состояние.

Уравнение (11) было проверено многочисленными опытами по 9 различным маркам стали, меди и алюминию.

По уравнению (11) удельная работа деформации при резании зависит от степени деформации ϵ и физико-механических характеристик металла σ_0 и n . С увеличением всех этих величин удельная работа деформации возрастает. Так как относительный сдвиг ϵ является функцией усадки стружки ζ и переднего угла γ , то $A_{w\tau}$ является также зависящей от этих величин.

Если мы будем осуществлять процесс резания металлов, для которых σ_0 и n зависят от скорости деформации, то для этих металлов скорость резания сама по себе будет оказывать влияние на удельную работу деформации. Примером такого металла является алюминий.

Уравнение (11) можно переписать в более развернутом виде

$$A_{w\tau} = \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n}{1,5} \cdot \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1 \right\}. \quad (12)$$

Уравнение (12) четко показывает от каких факторов зависит удельная работа деформации при резании.

Естественно, что факторы процесса резания, так или иначе влияющие на усадку стружки ζ , будут соответственно влиять и на удельную работу деформации при резании.

Уравнение (12) показывает, что удельная работа деформации не зависит от размеров и формы поперечного сечения среза, — глубины резания, подачи, ширины и толщины среза, угла в плане. При неизменных усадках изменение размеров сечения среза не изменит удельной работы деформации $A_{w\tau}$, а общая работа деформации A_τ будет при этом прямопропорциональна размерам поперечного сечения среза

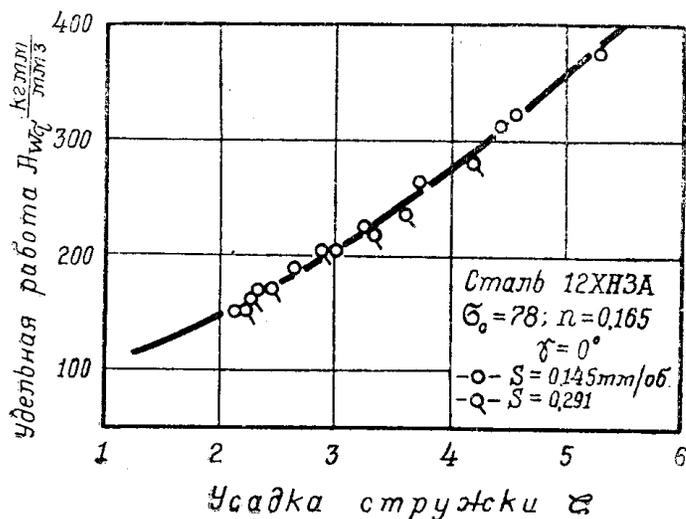
$$A_\tau = ab \frac{\sigma_0}{n} \left\{ e^{\frac{n}{1,5} \cdot \frac{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma}} - 1 \right\}. \quad (13)$$

Неизменную усадку при изменении поперечного сечения среза, как известно, мы получаем при режимах постоянной температуры на передней грани инструмента данной геометрии, так как при этом оказываются неизменными коэффициент трения на передней грани, направление равнодействующей силы на передней грани, положение плоскости сдвига и усадка стружки. Таким образом режимы постоянной температуры характерны не только постоянными коэффициентами трения, направлением равнодействующей, положением плоскости сдвига и усадкой стружки, но кроме этого и постоянной величиной удельной работы деформации в зоне сдвига стружки. Это следует не только из уравнения (12), но и из уравнения (10), так как при постоянных ζ и γ , относительный сдвиг ϵ также постоянен, а при этом и касательное напряжение τ в плоскости сдвига постоянно, что приводит к постоянству $A_{w\tau}$.

По уравнению (12) при известных σ_0 , n , γ и ζ можно рассчитать удельную работу деформации. Это будет удельная работа, рассчитанная по физико-механическим характеристикам обрабатываемого металла. Если, с другой стороны, провести опыты по резанию с измерением сил и усадки стружки, то по результатам опытов можно рассчитать касательное напряжение τ и относительный сдвиг ϵ . В этом случае удельную работу можно определить по уравнению (10) и это будет экспериментально полученная величина удельной работы.

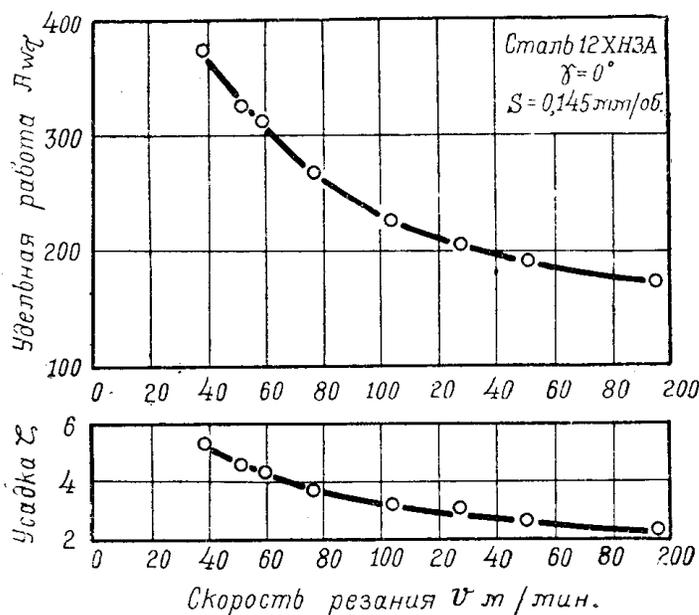
На фиг. 10 показано влияние усадки стружки на удельную работу деформации при резании стали 12ХНЗА, имеющей физико-механические характеристики $\sigma_0 = 78 \text{ кг/мм}^2$ и $n = 0,165$. На фиг. 10 сплошная кривая построена по уравнению (12), т.е. по физико-механическим характери-

стикам металла, полученным из опытов сжатия. Точки, расположенные на графике, получены экспериментальным путем и их расположение подтверждает правильность уравнения (12).



Фиг. 10

На фиг. 11 для этой же стали нами показано изменение усадки стружки и удельной работы деформации с изменением скорости резания. Подобные графики можно было бы привести по имеющемуся у нас экспериментальному материалу для 9 различных сталей, меди и алюминия.



Фиг. 11

Перейдем теперь к выводу уравнения для удельной работы трения на передней грани инструмента A_{WF} . В одной из наших работ было доказано [13], что сумма удельных работ деформации и трения на передней грани равна удельной работе A_{Wn} , производимой передней гранью инструмента.

Поэтому

$$A_{W\tau} + A_{WF} = A_{Wn},$$

то есть

$$A_{WF} = A_{Wn} - A_{W\tau},$$

$$A_{WF} = \frac{P_1}{ab} - A_{W\tau}. \quad (13a)$$

Здесь A_{Wn} — удельная работа, затрачиваемая на образование и отвод стружки.

Для силы P_1 , приложенной на передней грани, нами было выведено и подтверждено опытами уравнение

$$P_1 = \frac{\sigma_0}{n} ab \frac{e^{\frac{ne}{1.5}} - 1}{1 - \frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}}. \quad (14)$$

Здесь η — угол трения между стружкой и передней гранью. Подставляя (11) и (14) в (13a), получим

$$A_{WF} = \frac{\sigma_0}{n} \frac{e^{\frac{ne}{1.5}} - 1}{1 - \frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}} - \frac{\sigma_0}{n} (e^{\frac{ne}{1.5}} - 1),$$
$$A_{WF} = \frac{\sigma_0}{n} (e^{\frac{ne}{1.5}} - 1) \frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma) - \sin\eta}. \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает, что A_{WF} зависит от физико-механических характеристик металла, переднего угла, усадки стружки и угла трения η между стружкой и передней гранью, причем зависимость удельной работы трения от физико-механических характеристик точно такая же, как удельной работы деформации.

Можно в это выражение ввести вместо угла трения η величину коэффициента трения μ .

После преобразований получим, что

$$\frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma) - \sin\eta} = \frac{\operatorname{tg}\gamma}{\zeta(\cos\gamma + \operatorname{tg}\eta \sin\gamma) - \operatorname{tg}\eta},$$

так как

$$\operatorname{tg}\eta = \mu,$$

то

$$A_{WF} = \frac{\sigma_0}{n} (e^{\frac{ne}{1.5}} - 1) \frac{\mu}{\zeta(\cos\gamma + \mu \sin\gamma) - \mu}. \quad (16)$$

Если сравним уравнение (16) с (11), то получим соотношение между удельными работами трения и деформации

$$A_{WF} = A_{W\tau} \frac{\mu}{\zeta(\cos\gamma + \mu \sin\gamma) - \mu}. \quad (17)$$

Уравнение (17) показывает, что соотношение между A_{WF} и $A_{W\tau}$ определяется коэффициентом трения на передней грани μ , усадкой стружки и передним углом инструмента. Нельзя рассматривать влияние каждого из этих факторов по отдельности на соотношение удельных работ, так как в

процессе резания изменения этих факторов связаны друг с другом,—изменение γ всегда приводит к изменению μ и ζ , изменение μ неизбежно изменяет ζ .

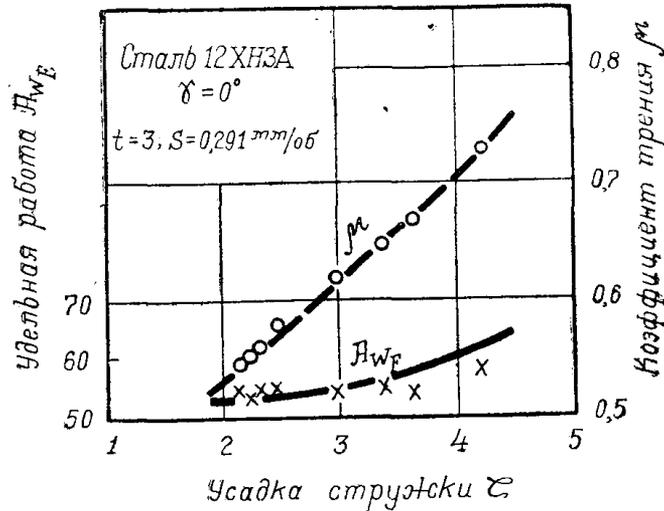
Уравнения (15) и (16) показывают, что удельная работа трения не зависит непосредственно от размеров и формы срезаемого слоя. Изменение размеров и формы поперечного сечения среза не изменит удельной работы трения на передней грани, если при этом не будут изменяться μ , ζ и γ . Такому условию удовлетворяют режимы постоянных температур для инструмента постоянной геометрии.

Уравнения (15) и (16) являются зависимостями общего вида для удельной работы трения на передней грани инструмента. Покажем насколько удовлетворительно они подтверждаются опытами. На фиг. 12 показано изменение μ с изменением усадки стружки зафиксированное в опытах. По этим опытными значениям μ и ζ , имея для стали 12ХНЗА

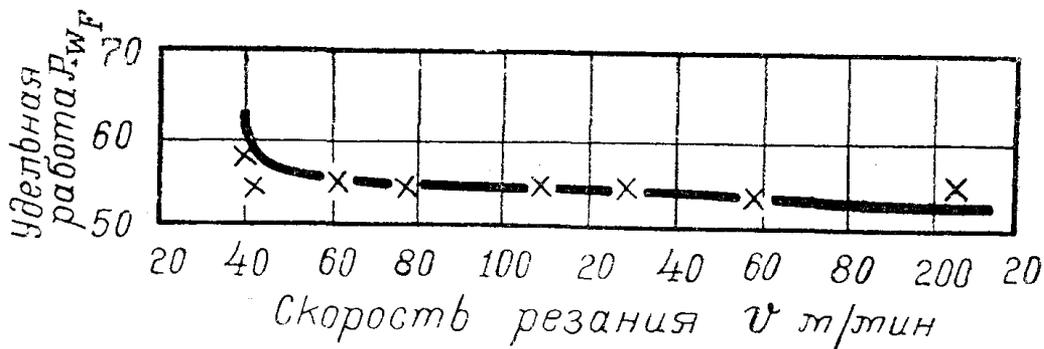
значения $\sigma_0 = 78 \text{ кг/мм}^2$ и $n = 0,165$, определенные опытами по сжатию, можно пользуясь уравнением (16) подсчитать удельную работу трения A_{WF} . Эта удельная работа, рассчитанная по физико-механическим характеристикам металла, представлена на фиг. 12 сплошной кривой. Кроме этого, по опытными значениям сил резания можно непосредственно определить силу трения на передней грани и по ней рассчитать удельную работу трения, минуя физико-механические характеристики металла. Эти значения удельной работы представлены на фиг. 12 крестиками.

Как видно из фиг. 12, расположение крестиков относительно кривой достаточно удовлетворительное и наибольшие отклонения не достигают 10%.

На фиг. 13 показано изменение A_{WF} в зависимости от скорости резания. Здесь также сплошная кривая проведена по уравнению (16), крестики



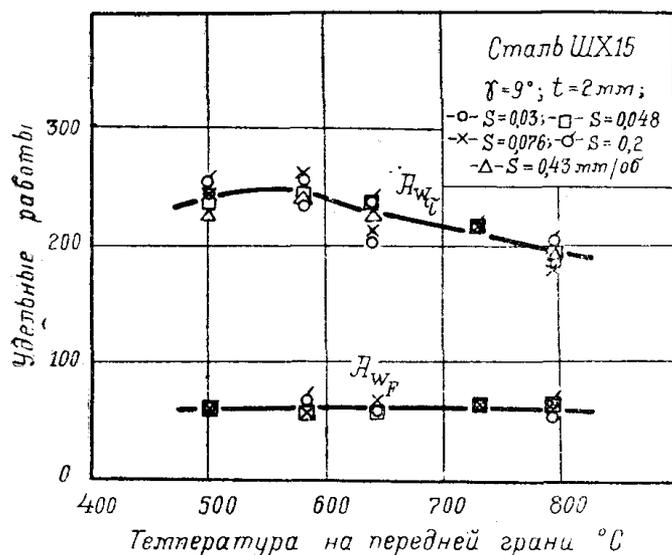
Фиг. 12



Фиг. 13

являются результатом подсчетов по опытными данным. Фиг. 12 и 13 показывают, что удельная работа трения на передней грани в широком диапазоне скоростей резания при существенном изменении усадки стружки и

коэффициента трения изменяется очень мало, повышаясь с увеличением усадки стружки, потому что этому сопутствует значительное увеличение коэффициента трения, и понижаясь с увеличением скорости резания, так как при этом уменьшаются μ и ζ . Изменение удельной работы трения при полукратном изменении коэффициента трения и двукратном изменении усадки не превосходит 20%.



Фиг. 14

Этого же обстоятельства подтверждается фиг. 14, на которой приведен график изменения удельных работ $A_{w\tau}$ и A_{wF} в зависимости от температуры на передней грани при резании стали ШХ15 по опытам Ю. П. Зимина [10]. При повышении температуры на передней грани, т. е. при повышении скорости резания, удельная работа деформации снижается, удельная работа трения остается постоянной. Следует обратить внимание на то, что на фиг. 14 нанесены точки для пяти различных подач, причем при постоянной

температуре величина удельной работы от подачи не зависит, что уже было указано ранее при анализе уравнений (12) и (16). Таким образом мы показали, что уравнения общего вида, связывающие удельные работы деформации $A_{w\tau}$ и трения на передней грани A_{wF} с физико-механическими характеристиками обрабатываемого металла и с параметрами процесса резания, удовлетворительно подтверждаются экспериментами.

Соотношения отдельных составляющих работы на передней грани инструмента

Не представляет затруднения выразить отношения работ деформации и трения ко всей работе, совершаемой передней гранью инструмента. Из приведенных ранее уравнений общего вида получим:

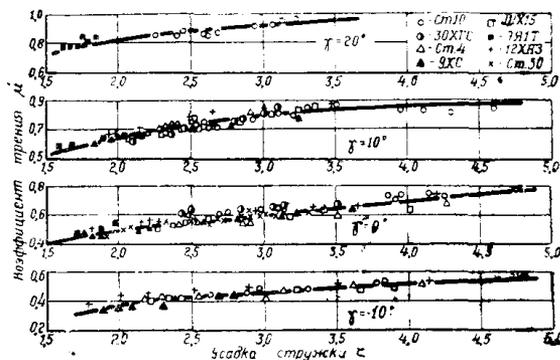
$$\frac{A_{w\tau}}{A_{wn}} = 1 - \frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}, \quad (18)$$

$$\frac{A_{wF}}{A_{wn}} = \frac{\sin\eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)}. \quad (19)$$

Уравнения (18) и (19) показывают, что относительные величины удельных работ не зависят от физико-механических характеристик обрабатываемого материала и полностью определяются тремя параметрами, — углом трения η (или коэффициентом трения μ), передним углом γ и усадкой стружки ζ . При известных значениях этих параметров по уравнениям (18) и (19) можно определить какую часть работы на передней грани инструмента составляет работа деформации и работа трения. Так как с изменением скорости резания и температуры на передней грани в процессе резания бу-

дут изменяться ζ , μ и η , то при этом будут изменяться и отношения удельных работ, определяемые уравнениями (18) и (19). Эти отношения можно поставить в зависимость только от усадки стружки по следующим соображениям. Усадка стружки ζ при данном переднем угле γ полностью определяется положением плоскости сдвига, которое зависит от направления равнодействующей силы на передней грани резца, определяемое в свою очередь коэффициентом трения μ или углом трения η . Таким образом получается, что при определенных значениях γ и ζ , угол η (или коэффициент трения μ) должен иметь определенное значение и отношения работ также должны иметь определенную величину.

При этом в области скоростного резания (без нароста на передней грани инструмента) механические характеристики и марка обрабатываемой стали не должны заметно сказываться на значениях μ и η при данных γ и ζ . Опыты подтверждают эти предположения. На фиг. 15 приведены экспериментально полученные графики коэффициентов трения при скоростном резании различных сталей резцами с различными передними углами. Графики показывают, что независимо от сорта стали при данном γ коэффициент трения μ (значит и угол трения η) может быть связан с усадкой стружки. На фиг. 16 представлена зависимость



Фиг. 15

$$1 - \frac{\sin \eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma)} = f(\zeta, \gamma),$$

которая получена на основании фиг. 15.

Естественно, что фиг. 16 дает графическое представление уравнения

$$(18), \text{ поэтому на оси ординат помещено отношение } \frac{A_{w\tau}}{A_{wn}}.$$

По фиг. 16, зная ζ и γ можно определить указанное отношение, которое будет действительно с достаточной степенью точности для любой стали в области скоростного резания.

$$\text{На фиг. 17 представлен график } \frac{A_{wF}}{A_{wn}} = f(\zeta, \gamma).$$

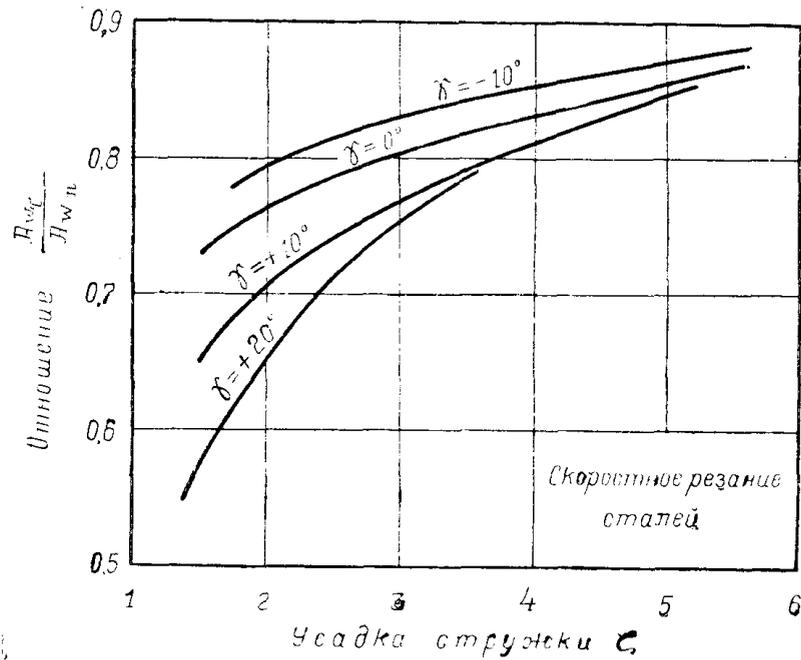
Его можно построить воспользовавшись фиг. 16, так как

$$\frac{A_{wF}}{A_{wn}} = 1 - \frac{A_{w\tau}}{A_{wn}}.$$

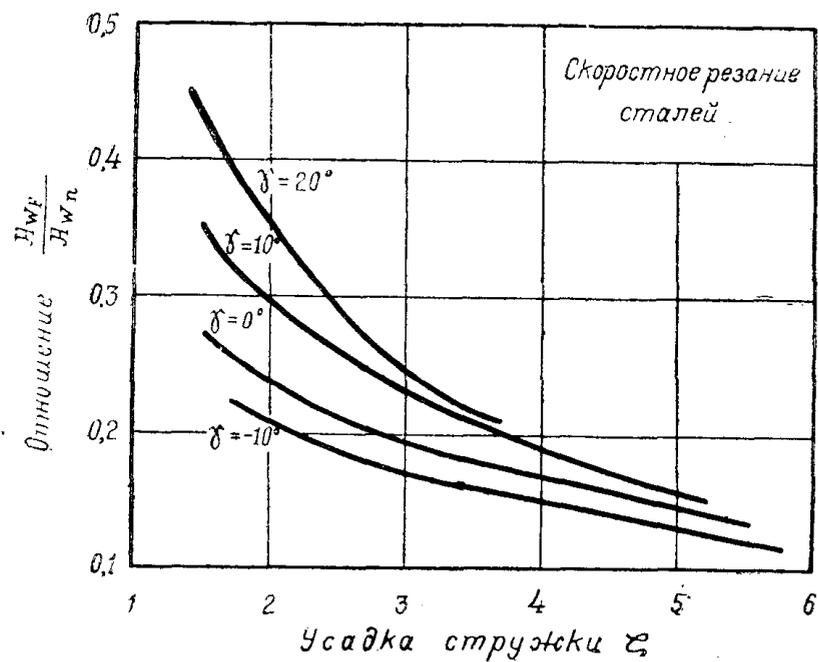
Фиг. 16 и 17 дают ясное представление об изменении составных частей работы резания на передней грани инструмента. При увеличении переднего угла γ падает доля работы деформации и повышается доля работы трения. При увеличении усадки стружки возрастает доля работы деформации и уменьшается доля работы трения. В пределах, встречающихся в практике значений усадки и при передних углах от 20 до -10° , работа деформации

может составлять от 60 до 86%, работа трения от 14 до 40% от общей работы, совершаемой передней гранью инструмента. В этих условиях работа деформации всегда превышает работу трения.

Если известна или экспериментально получена закономерность изменения усадки стружки с изменением скорости резания, то на основании



Фиг. 16



Фиг. 17

фиг. 16—17 просто определяется соотношение удельных работ на передней грани инструмента. На фиг. 18 представлены полученные опытами кривые усадки стружки при резании стали 10 с $\gamma = -10^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$. По этим

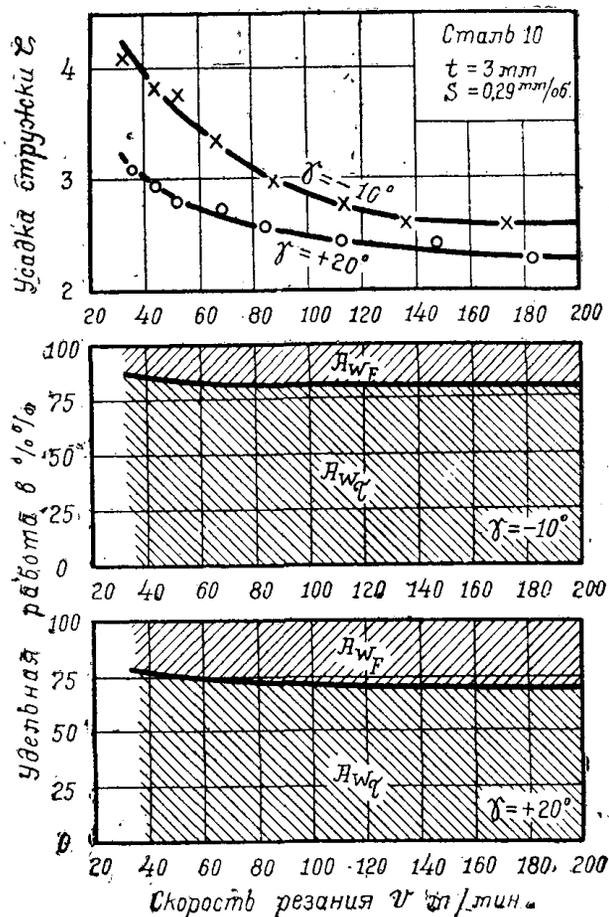
кривым построены графики баланса работы на передней грани резца. Основную часть представляет работа деформации в зоне сдвига стружки, которая при $\gamma = -10^\circ$ составляет от 80 до 87%, при $\gamma = +20^\circ$ от 69 до 76%. С изменением скорости резания изменение удельного веса работ деформации и трения сравнительно незначительное и не превосходит 10%. С повышением скорости резания удельный вес $A_{w\tau}$ немного снижается; удельный вес A_{wF} , наоборот, несколько возрастает. Можно предполагать, что, если бы мы произвели опыты с дальнейшим повышением скорости резания, то мы имели бы дальше постоянное соотношение удельных работ, т. к. усадка и коэффициент трения при дальнейшем повышении скорости прекращают свое снижение и их значения стабилизируются. Таким образом в области очень высоких скоростей резания (300—400 м/мин) можно ожидать примерно постоянного соотношения между удельными работами $A_{w\tau}$ и A_{wF} . Так как при этих скоростях при любой геометрии инструмента усадки обычно имеют порядок $\zeta = 1.8-2.5$, то работа деформации будет составлять приблизительно 65—80%, работа трения 35—20%.

Если представленные на фиг 16 и 17 соотношения удельных работ отнести не к усадке стружки ζ , а к относительному сдвигу ε , связанному с усадкой стружки зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 + 2\zeta \sin \gamma + 1}{\zeta \cos \gamma},$$

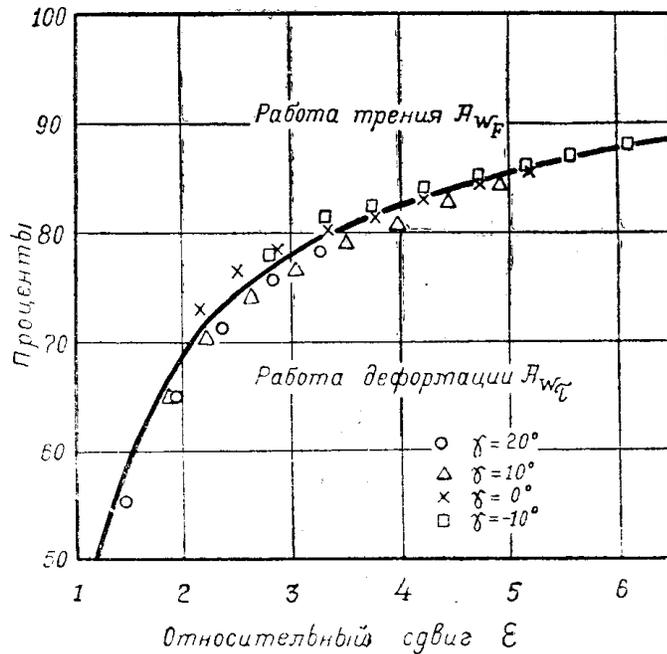
то получится график, представленный на фиг. 19.

Здесь по оси абсцисс отложен относительный сдвиг ε , а по оси ординат проценты. Для разных передних углов нанесены различно обозначенные точки, причем можно видеть, что, если по этим точкам провести некоторую среднюю кривую, то точки будут отклоняться от нее не более чем на 3—4%. Поэтому можно считать что кривая будет достаточно хорошо удовлетворять всем передним углам от $+20^\circ$ до -10° . Эта кривая показывает какую долю работы на передней грани A_n составляет работа деформации A_τ в процентах. Естественно, что дополнение до 100% принадлежит работе трения на передней грани. Так, например, при относительном сдвиге $\varepsilon = 2$ работа деформации составляет 68,5%, остальное, т. е. 31,5% составляет работа трения на передней грани. При $\varepsilon = 6$ соответственно доли этих работ 88 и 12%.



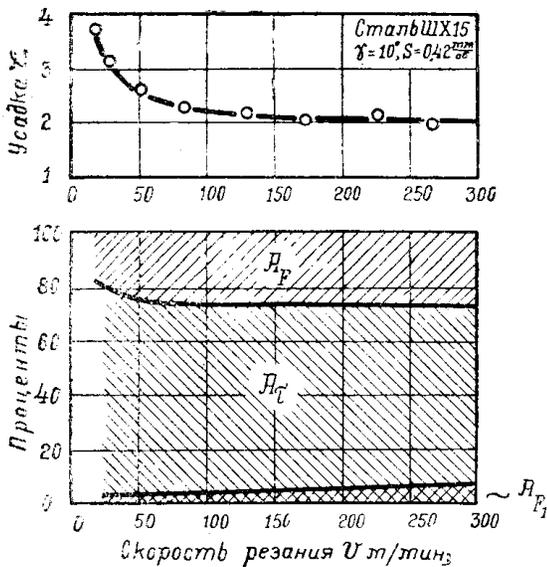
Фиг. 18

Фиг. 20 показывает, что в обычных случаях скоростного резания когда $\varepsilon > 1,5$, работа деформации всегда превосходит работу трения на передней грани и тем более значительно, чем больше степень деформации стружки, выраженная относительным сдвигом ε . С повышением скорости резания степень деформации падает и в работе, совершаемой передней



Фиг. 19

гранью, будет возрастать доля работы трения и уменьшаться доля работы деформации. Абсолютные значения этих работ с повышением скорости резания будут уменьшаться, причем работа деформации A_{γ} будет уменьшаться очень значительно, так что ее величина может изменяться в 2 и более раз, работа трения A_{γ} будет уменьшаться сравнительно немного.



Фиг. 20

довольно крупная подача ($S = 43$ мм/об), то доля работы на задней грани будет очень незначительна и, ориентируясь на приведенные выше материа-

будет уменьшаться примерно столь же значительно, как и удельная работа $A_{w\tau}$.

Температура в зоне трения на передней грани инструмента зависит от суммы удельных работ деформации и трения т. е. от удельной работы, совершаемой передней гранью $A_{w\tau}$. Но, несмотря на то, что с повышением скорости резания величина $A_{w\tau}$ значительно уменьшается, температура на передней грани с повышением скорости резания неизменно возрастает, причем на высоких скоростях она в 2—3 раза превышает температуру в зоне сдвига, хотя удельная работа трения A_{wF} составляет лишь 30—40% от работы деформации $A_{w\tau}$. Это объясняется следующими причинами.

Нагрев стружки в зоне сдвига осуществляется теплом, выделяющимся в результате работы деформации. Здесь она прогревается насквозь до температуры, пропорциональной удельной работе деформации $A_{w\tau}$. Прогретый металл стружки в процессе трения с передней гранью дополнительно подогревается теплом, выделяющимся вследствие тех дополнительных деформаций, которые возникают в результате трения о переднюю грань. Трение оказывает тормозящее действие на контактный слой стружки, благодаря чему слой некоторой толщины оказывается дополнительно деформированным в очень значительной степени. Толщина этого слоя вторичной деформации очень мала и обычно составляет 5—10% от толщины деформированной стружки. Работа трения затрачивается в основном на деформацию этого слоя и выделяется тепло подогревающее стружку, причем это тепло будет эквивалентно работе трения.

Температуру слоя вторичной деформации можно подсчитать, если к температуре, которую получила стружка в зоне сдвига, прибавить температуру, рассчитанную по удельной работе трения A_{wF} . Но величину A_{wF} мы получили путем деления работы трения A_F на весь объем металла, превращаемого в стружку. Такая величина A_{wF} была удобна для сравнения составных частей работы резания. Принципиально же, вернее, для расчета удельной работы трения, т. е. работы, отнесенной к единице объема деформированного трением металла, делить работу трения A_F на объем того слоя стружки, который претерпевает под влиянием силы трения дополнительную деформацию. Так как толщина и объем этого слоя в 10—20 раз меньше толщины и объема снятой стружки, то и величина удельной работы трения, рассчитанной по объему этого слоя, окажется в 10—20 раз выше, чем рассчитанной по всему объему стружки [7]. Ранее для стали 12ХНЗА мы привели графики удельных работ деформации и трения (фиг. 11 и 13), причем $A_{w\tau}$ изменялась в пределах от 375 до 170 кг/мм/мм³, A_{wF} —от 58 до 53 кг/мм/мм³, понижаясь с увеличением скорости резания, от 40 до 200 м/мин. Значения удельной работы трения A_{wF} существенно меньше удельной работы деформации. Если принять во внимание приведенные выше соображения, то эти значения удельной работы трения нужно увеличить в 10—20 раз. Тогда действительная удельная работа трения в слое вторичной деформации стружки окажется в 2—3 раза больше, чем удельная работа деформации в зоне сдвига, и станет понятным, почему температуры на передней грани инструмента столь высоки и превосходят температуру в зоне сдвига в 2—3 раза.

С повышением скорости резания температура на передней грани растет, что фиксируется объективным измерением ее. Все исследователи считают, что этот рост является следствием уменьшения промежутка времени контакта стружки с передней гранью инструмента при повышении скорости резания, что приводит к снижению теплоотвода от слоя вторичной деформации в толщу стружки и тело резца. Не отрицая возможности действия фактора времени на теплоотвод, мы предполагаем, что здесь имеет место и другая причина повышения температуры в зоне трения с повышением скорости резания.

Эта причина заключается в том, что толщина слоя вторичной деформации с повышением скорости резания уменьшается. Уменьшение толщины слоя вторичной деформации было замечено Т. Н. Лоладзе [15]. При обработке стали $\sigma_s = 63,5 \text{ кг/мм}^2$ с подачей $s = 0,54 \text{ мм/об}$, углом в плане $\varphi = 60^\circ$ и передним углом $\gamma = -10^\circ$ автор на шлифах продольного сечения снятой стружки измерял толщину слоя вторичной деформации на стороне стружки, обращенной к передней грани резца. Значения скорости резания, усадки стружки ζ , толщины снятой стружки a_1 , толщины слоя вторичной деформации a_2 и отношения $\frac{a_2}{a_1}$ приведены нами в таблице

v	ζ	a_1	a_2	$\frac{a_2}{a_1}$
51	2,44	1,15	0,1	0,087
80	2,22	1,04	0,08	0,077
101	2,16	1,01	0,07	0,07
132	2,15	1,01	0,06	0,06
159	1,8	0,84	0,04	0,048

Из приведенной таблицы следует, что с повышением скорости резания отношение толщины слоя вторичной деформации к толщине снятой стружки заметно уменьшается. Если при скорости резания 51 м/мин слой вторичной деформации составляет 8,7% от толщины снятой стружки, то при скорости 159 м/мин — лишь 4,8%. Действительное значение удельной работы трения может быть получено, если работу трения отнести к слою вторичной деформации. Поэтому, в соответствии с уравнением (15), которое давало значение удельной работы трения A_{WF} , отнесенной ко всему объему снятой стружки, выражение для действительной удельной работы трения, которую мы обозначим символом A'_{WF} можно дать в следующем виде

$$A'_{WF} = \frac{\sigma_0}{n} \left(e^{\frac{n\epsilon}{1,5}} - 1 \right) \frac{\sin \eta}{\zeta \cos(\eta - \gamma) - \sin \eta} \cdot \frac{a_1}{a_2}. \quad (21)$$

Мы ранее на фиг. 13 показали, что удельная работа трения A_{WF} , отнесенная ко всему объему стружки, незначительно уменьшается с увеличением скорости резания. Так как отношение $\frac{a_1}{a_2}$ с повышением скорости резания существенно возрастает, то и действительная удельная работа трения A'_{WF} будет увеличиваться. Это приведет к повышению температуры в слое вторичной деформации, а значит и в зоне трения стружки по передней грани инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брикс. Резание металлов. СПб, 1896.
2. Рудник С. С. Теория резания металлов. ОНТВУ, Машбудвидав, 1932.
3. Глебов С. Ф. Теория наиболее выгодного резания металлов. Госмашметиздат. 1933.
Глебов С. Ф. Работа резания и ее составные части. Вестник Металлопромышленности. № 10, 11, 1936.
4. Глебов С. Ф. Работа резания и ее составные части. Сборник сокращенных докладов конференции по резанию металлов. АН СССР, 1937.
4. Розенберг А. М. Динамика фрезерования. Изд. Советская Наука. Москва, 1945.

5. Аваков А. А. Некоторые вопросы стойкости резца. Труды Тбилисского института инженеров железнодорожного транспорта. Вып. XXIV, стр. 46, фиг. 17, 1951.
 6. Беспрозванный И. М. Основные теории резания металлов. Стр. 147, фиг. 209. Машгиз, 1948.
 7. Клущин М. И. Резание металлов. Машгиз, 1953.
 8. Зорев Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания. Машгиз, 1952.
 9. Розенберг А. М. Определение сил на задней грани резца. Сборник работ Западно-Сибирского филиала АН СССР „Вопросы машиноведения и машиностроения“. Новосибирск, 1951.
 10. Розенберг А. М. и Розенберг Ю. А.. Уравнение силы при резании хрупкого металла (чугуна). Известия Томского политехнического института, том 75. Томск, 1954.
 11. Зимин Ю. П. Исследование процесса скоростного резания сталей. Диссертация. Томск, 1947.
 12. Промптов А. И. Динамика скоростного фрезерования сталей. Автореферат диссертации. Томск, 1954.
 13. Розенберг А. М. и Хворостухин Л. А. Проверка уравнения силы резания на скоростных режимах. Известия Томского политехнического института. Том 75, Томск, 1954.
 14. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Теоретический вывод уравнения сил резания. Известия Томского политехнического института, том 75, 1954.
 15. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том II. Томск, 1941.
 16. Лоладзе Т. Н. Стружкообразование при резании металлов. Машгиз, 1952.
-