

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ И ВЗАИМОСВЯЗЬ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ СТАЛИ

А. Н. ЕРЁМИН

Цель исследования

Процесс свободного и несвободного резания с физической точки зрения представляет собой сложный процесс деформации металла, превращаемого в стружку. Несмотря на огромное количество экспериментальных исследований, имеющих большое практическое значение, мы все же не имеем еще достаточно ясного представления о всех законах изменения явлений процесса резания, о их взаимосвязи и причинах изменения. Отсюда понятно, почему в литературе по резанию до сих пор имеются противоречивые толкования и предположения по ряду вопросов процесса образования стружки.

Достаточно указать на существующие противоречия в вопросах о влиянии скорости резания на силу резания и на усадку стружки. Имеются противоположные мнения и о зависимости усадки стружки от толщины среза. Нет единого представления о процессе образования и исчезновения нароста на резце. Часто неправильно объясняется процесс образования и изменения неровностей на обработанной поверхности.

Есть вопросы, которыми вообще не занимались исследователи. Например, никто не исследовал закономерности изменения геометрии (угла) нароста на резце и не обратил серьезного внимания на роль геометрии нароста в процессе резания. Также никто не исследовал зависимость между усадкой и упрочнением стружки при резании железоуглеродистых сплавов и не сравнил эту зависимость с аналогичной зависимостью при пластическом сжатии образца и т. д.

Из приведенных примеров видно, насколько еще неполны наши познания в различных вопросах процесса резания, хотя в этом направлении в последние годы уже сделаны определенные сдвиги [5].

Настоящая работа является экспериментально-теоретическим исследованием явлений процесса свободного и несвободного резания железоуглеродистых сплавов. Работа проведена в период 1937—1947 гг.

Цель исследования—установить закономерности изменения явлений процесса резания, их взаимосвязь и причины изменения явлений.

Были исследованы геометрия нароста на резце, деформация и упрочнение стружки и сжатого образца, силы и напряжения при резании и при пластическом сжатии, чистота обработанной поверхности. Попутно исследованы температура резания на гранях резца и в стружке, свойства деформируемого металла, трение на гранях резца и другие явления процесса резания.

Условия и методика исследований

Вся экспериментальная часть исследований проведена на одних и тех же образцах (болванках) из углеродистых и хромистых сталей (табл. 1).

Характеристики испытываемых сталей

Материал	σ_B кг/мм ²	H_B кг/мм ²	$T'_{исх}$ сек	Удлине- ние $\delta_{10}\%$	Сжатие $\psi\%$	Резание		Сжатие	
						T_0 сек	t	T'_0 сек	t'
Углеродистая сталь 1010—п .	40	105	18,7	29,6— 31,6	68,4— 70	24,8	0,185	22,1	0,135
Углеродистая сталь 1020—п .	44,6	118	19,7	26,4— 30	61—64	25	0,187	—	—
Хромистая сталь 5120—н	50,3	135	20,6	27,5— 28	69,7— 70,4	26,7	0,185	24	0,135
Углеродистая сталь 1035—н .	64,6	173	—	21,6	51	—	—	—	—
Углеродистая сталь 1040—н .	65,8	180	24,5	21,3— 22	53—55	32	0,185	28	0,135
Хромистая сталь 5140—о	71,3	197	25,6	16,3— 19,3	46—47	32,8	0,190	28,6	0,135
Углеродистая сталь	—	260	29,4	—	—	37,6	0,195	—	—
Углеродистая сталь	—	163	—	—	—	—	—	—	—
Нержавеющая сталь	—	225	34,4	—	—	43,8	0,185	—	—

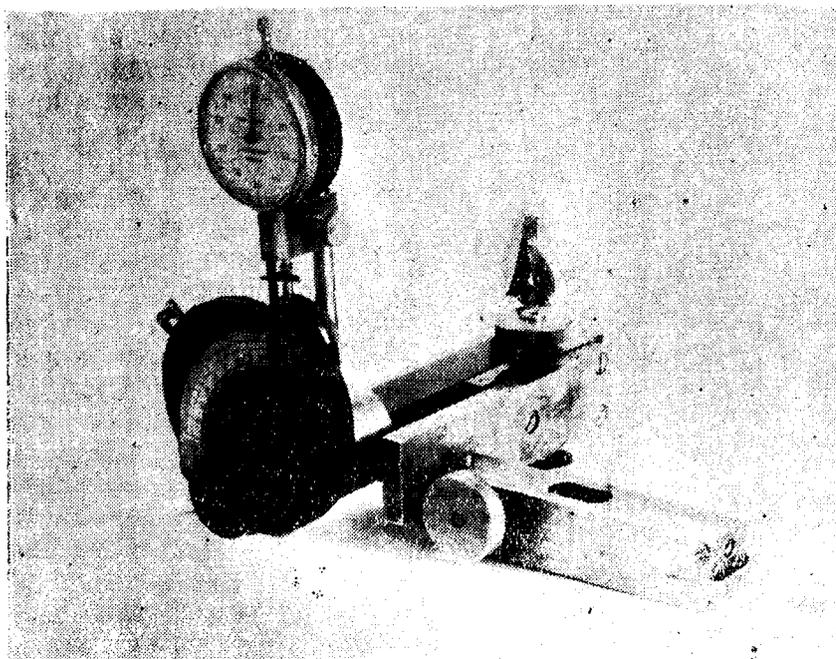
Обозначения: *п* — прокат; *н* — нормализация; *о* — отжиг; $T'_{исх}$ — исходная твердость по маятнику Герберта (по времени в секундах); T_0 и T'_0 — константы — условная твердость (по времени); t , t' — показатели степени.

Резцы для испытания были взяты из быстрорежущей стали (РФ-1) и твердого сплава (ВК-8) нормальной геометрии (угол резания $\delta = 35 - 105^\circ$; углы в плане $\varphi = 0 - 90^\circ$ и $\varphi_1 = 0 - 10^\circ$; угол задней заточки $\alpha = 5 - 8^\circ$; радиус при вершине $r = 0 - 6$ мм); резцы с фаской — с комбинированной передней гранью (угол резания $\delta_1 = 90^\circ$; угол схода стружки $\delta_2 \approx 43^\circ$; ширина фаски $k = a$ — толщине среза).

Режим резания изменялся в широких пределах. Скорость резания v изменялась от 0,0007 до 640 м/мин, толщина среза a — от 0,01 до 1,0 мм, ширина среза b — от 0,1 до 3 мм. Температура на резце колебалась от 20 до 900°C.

Резание проводилось на токарном станке без применения смазки и охлаждения, при условии отсутствия вибраций. Образцы сжимались на прессе Амслера со скоростью 0,0008 м/мин. Температура определялась: на резце — по гальванометру, методом естественной термопары (резец — обрабатываемый материал), в стружке — по цветам побежалости, приближенно. В обоих случаях проведены предварительные тарировочные опыты. Твердость стружек, поверхности среза и сжатых образцов (под прессом) измерялась маятником Герберта (время в сек. 10 качаний, при шарике $d = 1$ мм). Наблюдение за образованием нароста на резце в процессе резания и измерение угла и высоты нароста проводились посредством специального оптического прибора конструкции автора (фиг. 1). Силы резания измерялись трехкомпонентным гидравлическим суппортом. Вели-

чина неровностей на обработанной поверхности определялась профилографом, работающим по методу прерывистого ошупывания [1]. Усадка стружек находилась или способом взвешивания, или по нейтральной линии стружек при помощи компаратора. Всего было проведено около 5000 опытов. Подвергнут анализу материал, имеющийся в литературе по резанию.



Фиг. 1

Результаты исследований

На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований автором установлено, что основной причиной изменения всех явлений в процессе резания является температура резания на резце и в стружке.

Температура резания изменяет условия трения на гранях резца, исходные свойства металла, превращаемого в стружку, изменяет действительную геометрию резца (за счет изменения угла нароста на резце), в результате чего происходит изменение усадки стружки ζ , ее твердости T_n , силы P_z и напряжения резания σ_v , изменение чистоты обработанной поверхности (за счет неровностей) и других явлений процесса резания. Установлено также, что активность влияния различных факторов резания (v , a , b , δ и т. д.) на изменение явлений процесса резания зависит только от степени их воздействия на температуру резания и на объем деформируемого металла впереди резца.

Чем больше скорость резания, элементы сечения среза, угол резания резца и исходная твердость обрабатываемого металла, тем выше температура резания, и наоборот.

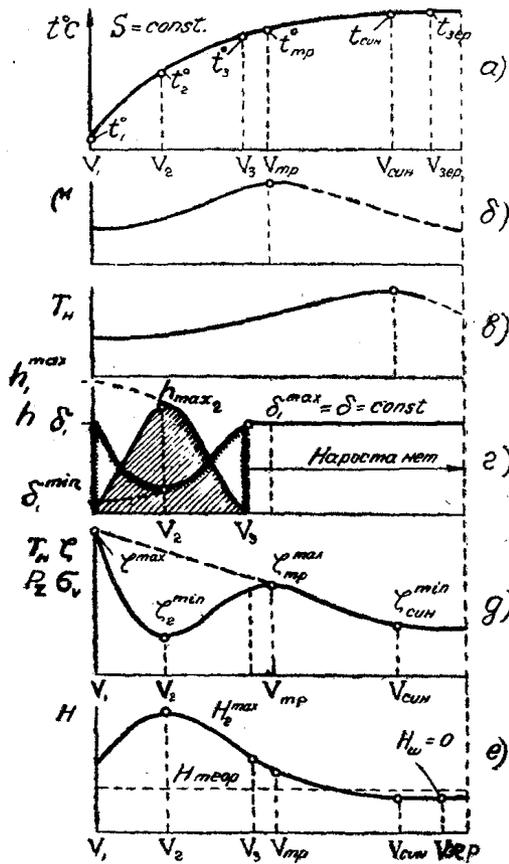
Общая картина закономерностей изменения и взаимосвязи явлений в процессе резания под влиянием температуры резания (например, с увеличением скорости резания v) представлена на схеме фиг. 2. Здесь каждая кривая имеет типичный характер, одинаковый для всех металлов, исследованных автором (табл. 1), и подтверждена большим количеством

экспериментов [2]. Последние приведены в настоящей статье только в виде отдельных примеров для иллюстрации тех или иных положений.

При этом примеры преднамеренно взяты из опытов по разным сталям.

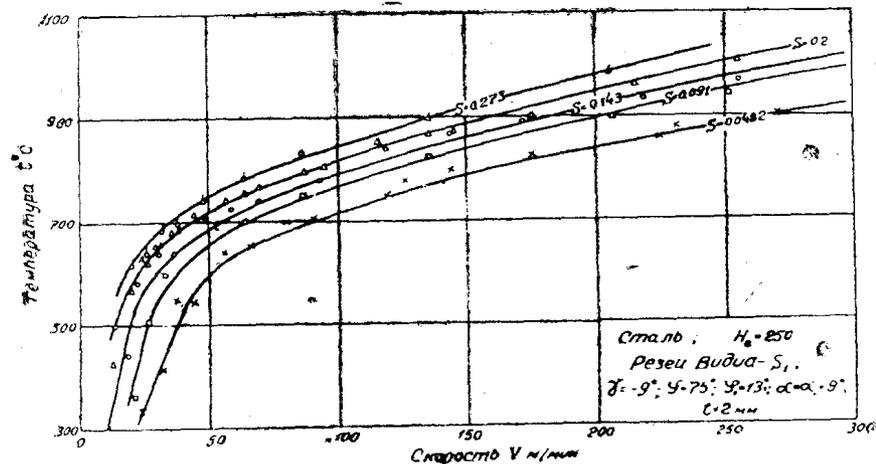
Из фиг. 2 следует, что с повышением температуры резания (при возрастании v , фиг. 2а и 3) изменяется коэффициент внешнего трения μ на передней (и задней) грани резца¹⁾ (фиг. 2б, 4) по закону кривой, имеющей максимум при температуре на резце $t_{mp}^0 \approx 600^\circ\text{C}$ [2]. Подобная же закономерность изменения μ наблюдалась исследователями и при трении чистых поверхностей (железо—чугун) [6] и при пластическом сжатии [11] (фиг. 4а), а также была подтверждена обширными исследованиями лаборатории резания ТПИ [3] (фиг. 5).

По существующим исследованиям металлофизиков и металловедов известно, что под влиянием температуры в железоуглеродистых сплавах возникает характерное явление синеломкости (хрупкости). В связи с этим исходная твердость $T_{исх}$ (по времени) и другие характеристики прочности металла (H_B , σ_s , σ_b) сначала возрастают с повышением температуры (фиг. 2б, 6, 7), достигая максимума при температуре синеломкости (при резании — в стружке) $t_{син}^0$, а затем падают. Характеристики пластично-



Фиг. 2

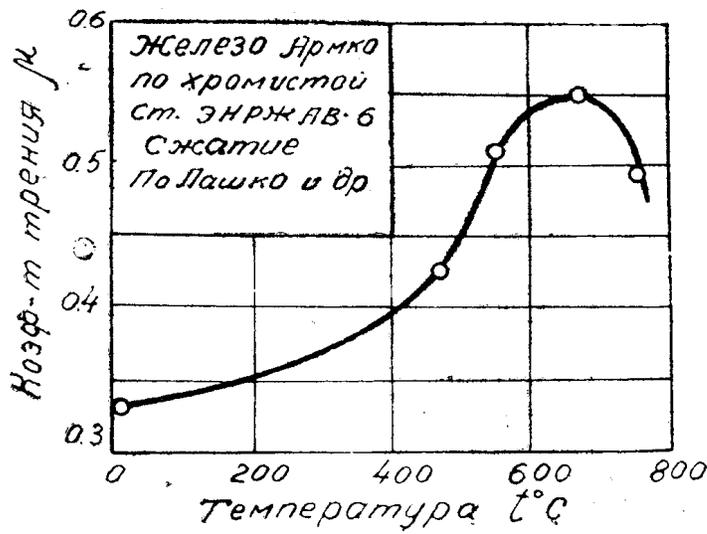
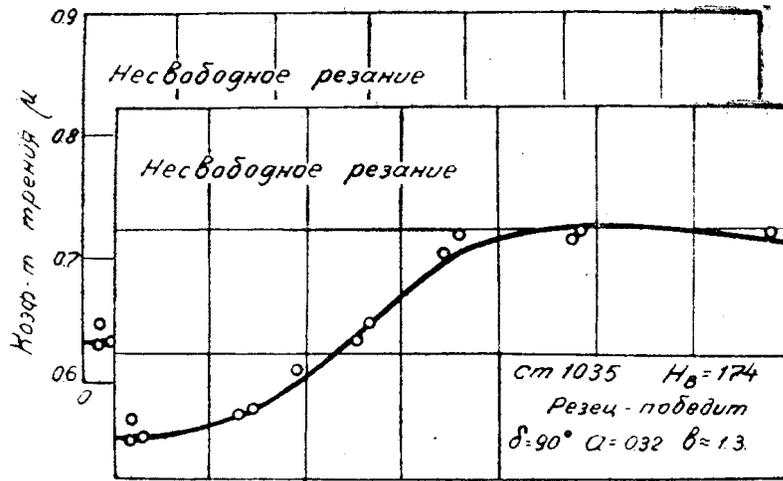
сти металла (удлинение δ % и сжатие ψ %) изменяются наоборот (фиг. 8).



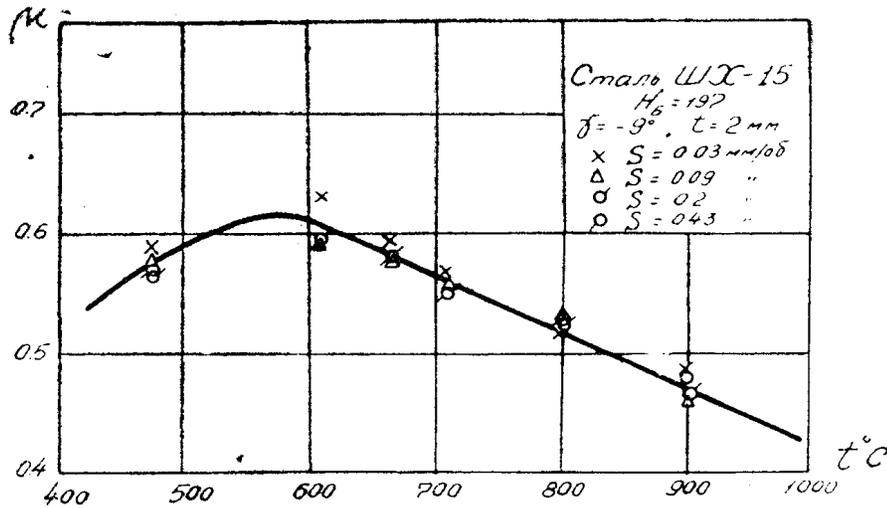
Фиг. 3

¹⁾ По известной формуле $\mu = \frac{F}{N}$,

где F — сила в плоскости передней (или задней) грани резца,
 N — сила, нормальная к той же грани резца, — получены экспериментальным путем.

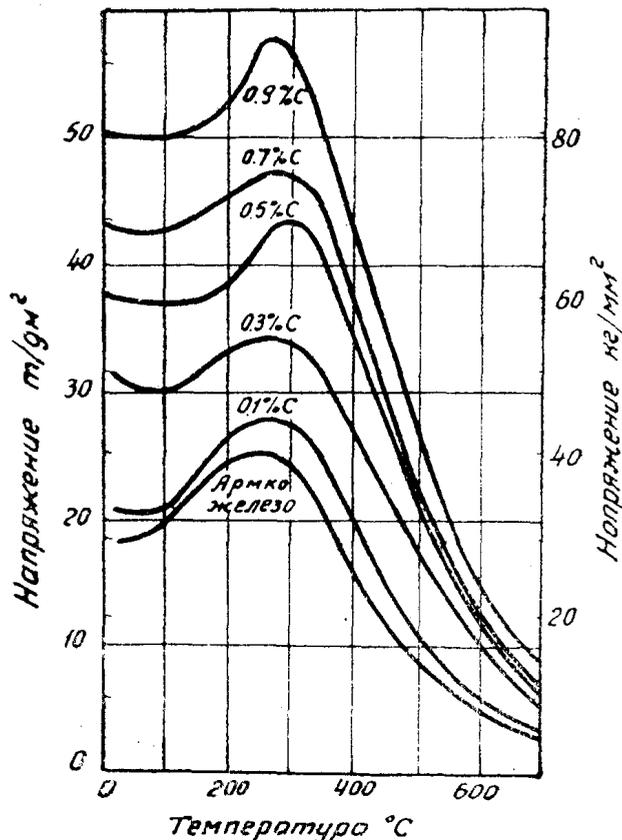


Фиг. 4а



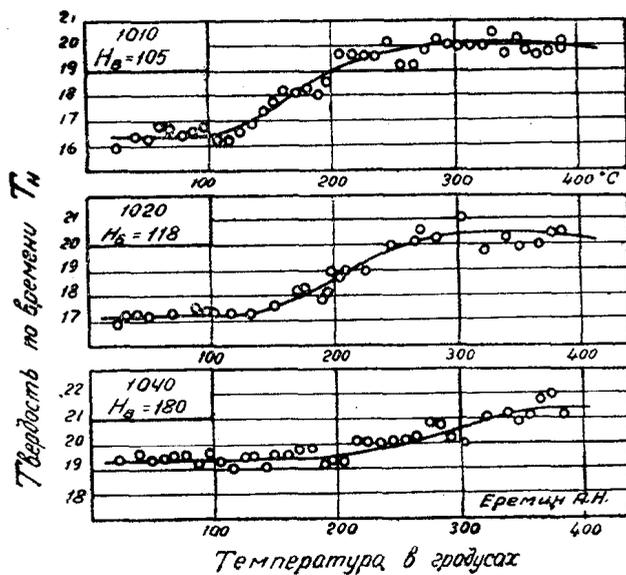
Фиг. 5

Несомненно, что по тем же причинам и по тому же закону должны изменяться исходные характеристики обрабатываемых сталей с повышением температуры резания в процессе резания.



Фиг. 6

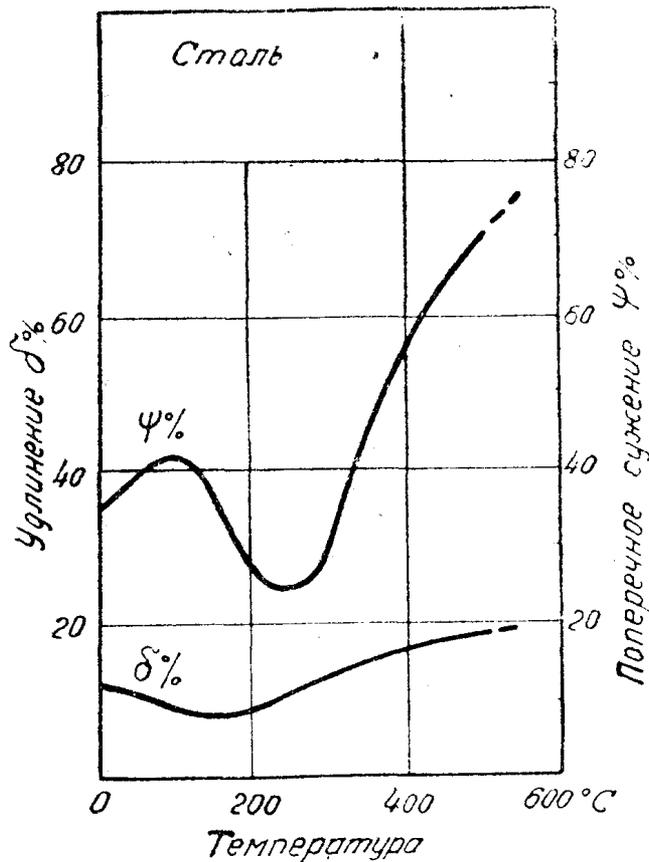
При резании железуглеродистых сплавов, как известно, наблюдается явление образования нароста на резце (фиг. 9), искажающее действительную геометрию последнего в процессе резания. Несмотря на то, что на-



Фиг. 7

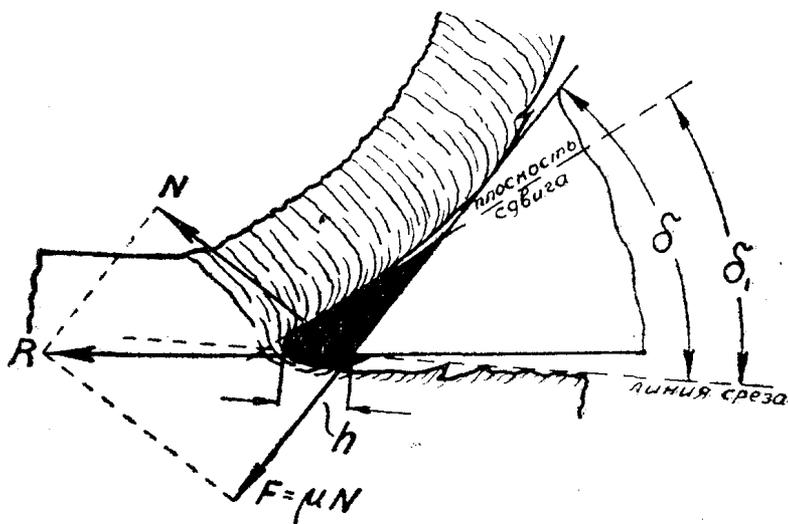
рост исследуется около 50 лет, однако, до сих пор нет ясного представления о процессе образования, изменения и исчезновения нароста на резце.

Автором установлено, что нарост есть часть стружки, задерживаемой трением (или фаской, на резце с фаской) на передней грани реза.



Фиг. 8

Этим подтверждается предположение, высказанное А. М. Розенбергом [12], и опровергаются представления о наросте как зоны застоя деформируемого металла на резце (Усачев, Эрнст, Каширин, Розенгейн и Стер-

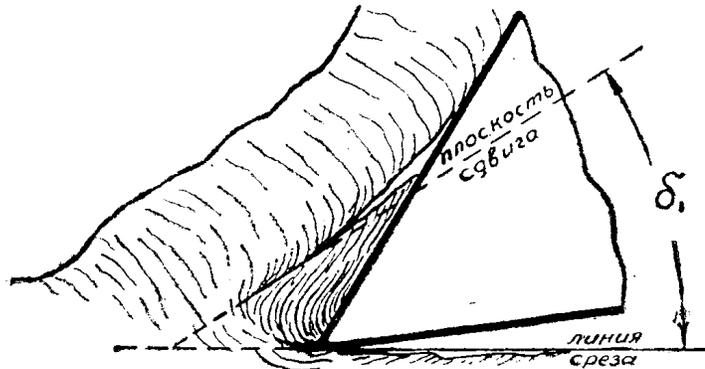


Фиг. 9

ней) или как скопление мельчайших частиц металла, соскобленных резцом и спрессованных на передней грани последнего (Тейлор, Паткай, Кривоухов и др.).

В действительности, нарост образуется из стружки в результате одновременного сдвига в ней под углом δ_1 и в плоскости касательной к линии среза (фиг. 10). Нарост образуется только в тот момент, когда стружка задерживается на резце контактной поверхностью под влиянием трения (или фаской).

С изменением температуры резания (влияющей на трение и свойства деформируемого металла (фиг. 2б, в) изменяется состояние, высота h и угол δ_1 нароста на резце (фиг. 2г). Из неустойчивого (по геометрии),



Фиг. 10

пассивного состояния при комнатной температуре ($t_1^\circ \approx 20^\circ\text{C}$) нарост постепенно переходит в более устойчивое, активное состояние с повышением температуры (и трения). При этом нарост не находится на резце постоянно, в виде „зоны застоя“. Наоборот, он непрерывно появляется и срывается (сдвигается) с резца в направлении движения стружки под влиянием силы деформации металла, действующей на заднюю грань нароста (фиг. 9). Сбегающая стружка не участвует в срыве нароста, но способствует удалению его с резца. Удаленные наросты видны на контактной поверхности стружки в виде зазубрин.

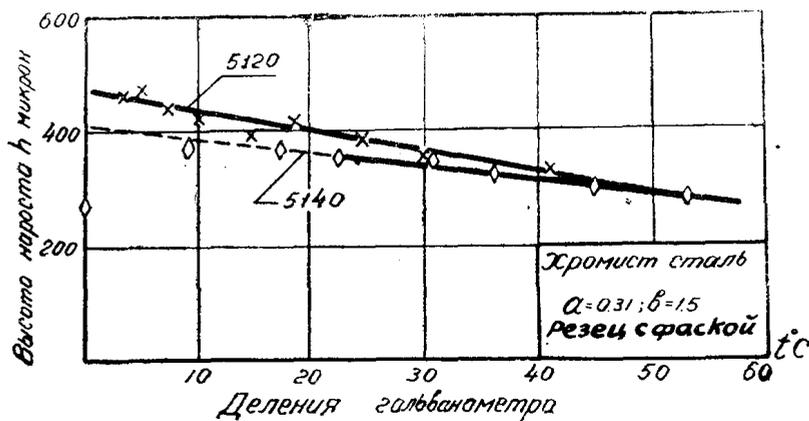
Зависимость угла нароста δ_1 от температуры резания (фиг. 2г) объясняется, по видимому, тем, что температура, изменяя μ и $T_{исх}$ (фиг. 2б, в), изменяет направление равнодействующей силы на резце R (фиг. 9), под влиянием чего и происходит изменение угла сдвига в стружке δ_1 , в момент образования нароста. Высота нароста h зависит и от угла δ_1 и от объема деформируемого металла впереди резца. Чем больше объем и меньше угол δ_1 , тем больше высота нароста, и наоборот (фиг. 2г).

Теоретически и экспериментально доказано автором (опытами с резцами с фаской), что при резании стали (табл. 1), с возрастанием температуры от 20°C и выше, нарост на резце имеет наибольшую высоту h_1^{max} и наименьший угол $\delta_1^{min} = 42-45^\circ$ при температуре $t_1^\circ \approx 20^\circ\text{C}$ (фиг. 2г, 11, 12).

С повышением температуры угол нароста увеличивается до $\delta_1^{max} = \delta$ угла резания резца, а высота его падает до $h^{min} = 0$, при критической температуре на резце t_3° (фиг. 2г, пунктирные линии). В этот момент нарост на резце исчезает и больше не появляется, независимо от дальнейшего повышения температуры свыше t_3° .

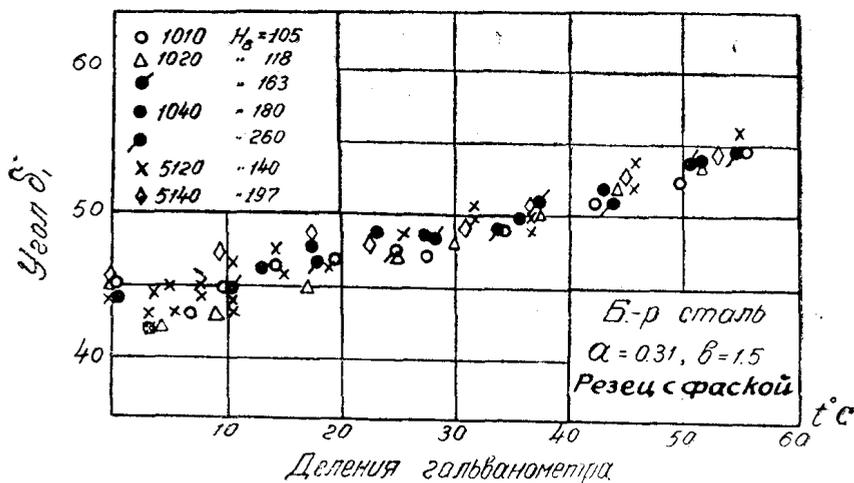
Нарост исчезает на резце не потому, что он размягчается и стирается стружкой (Рапац, В. Д. Кузнецов и др.), а потому, что при температуре t_3° сдвиг в стружке (образующий переднюю грань нароста) происходит под углом $\delta_1 = \delta$, т. е. в плоскости передней грани резца. Величина кри-

тической температуры исчезновения нароста на резце t_3^o определяется только углом резания резца δ . Чем меньше угол, тем меньше t_3^o , и наоборот (фиг. 13). Для резца с углом резания $\delta \leq 45^\circ$ критическая температура исчезновения нароста $t_3^o = t_1^o \approx 20^\circ\text{C}$, так как при этих условиях и угол нароста $\delta_1^{min'} \approx 42^\circ - 45^\circ$ (фиг. 12, 13). Во всех случаях объективным признаком исчезновения нароста на резце (при любом значении t_3^o) служит момент появления блеска на контактной поверхности стружек.



Фиг. 11

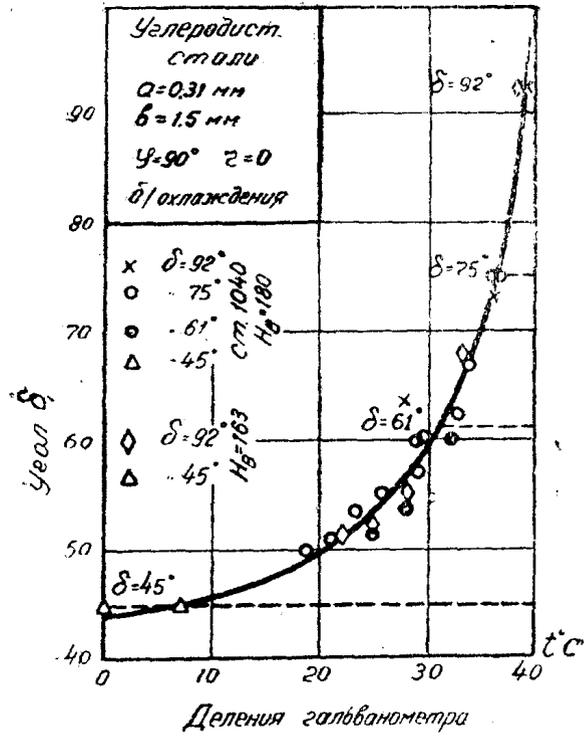
Закономерность изменения геометрии нароста на резце нормального вида (без фаски) под влиянием температуры резания имеет несколько иной характер (рис. 2г, сплошные линии). В данном случае, при температуре резания $t_1^o \approx 20^\circ\text{C}$, нарост на резце, обычно, отсутствует вследствие слабого трения на передней грани резца (фиг. 2б), а потому угол нароста



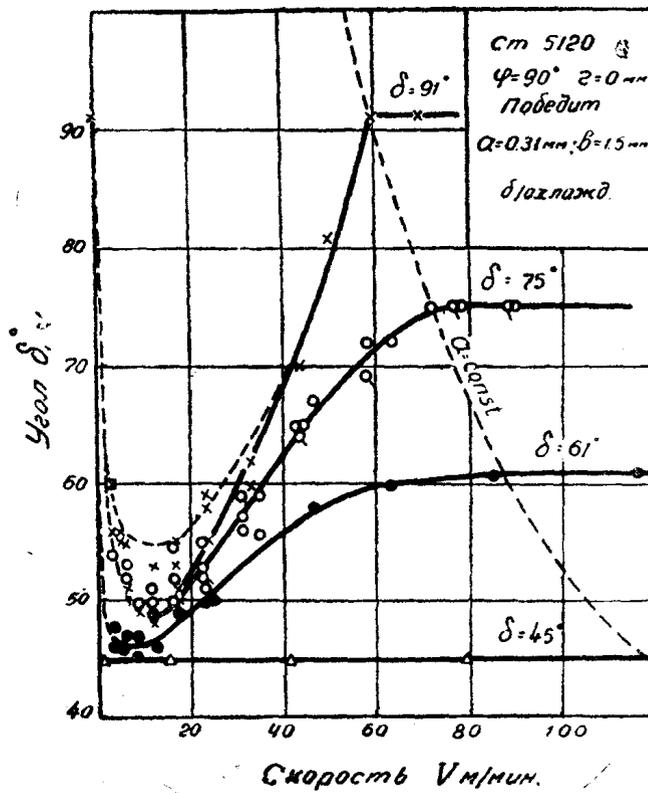
Фиг. 12

ста $\delta_1 = \delta_1^{max} = \delta$ и $h = 0$. Последнее отчетливо видно из фиг. 14 и 15, показывающих зависимость угла δ_1 и высоты h нароста от скорости резания и угла резания резца δ . То же наблюдается и на фиг. 16 при резании с различными толщинами среза a и на фиг. 17, 17а при резании сталей с различной исходной твердостью.

С повышением температуры (и трения) от 20°C и выше увеличивается активизация нароста, угол его сначала уменьшается до некоторого зна-

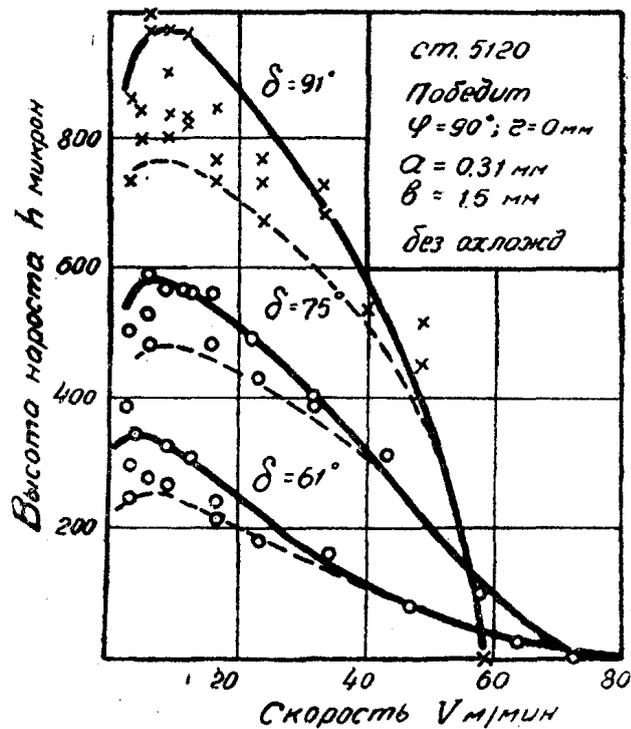


Фиг. 13



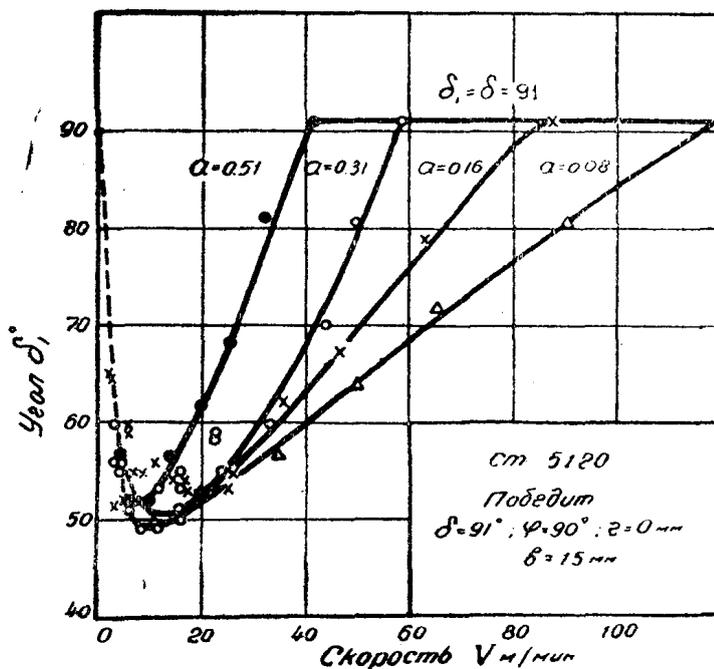
Фиг. 14

нения δ_1^{min} при температуре t_2° 1), после чего начинает увеличиваться достигая снова значения $\delta_1^{max} = \delta$ при критической температуре исчезно-



Фиг. 15

вения роста t_3° . В связи с этим высота роста изменяется по закону кривой обратного порядка: при t_1° и t_3° , $h = 0$; при t_2° , $h = h_2^{max} < h_1^{max}$



Фиг. 16

1) В зоне температур $t_1^{\circ} - t_2^{\circ}$ наблюдается наибольшее рассеивание в показаниях величин угла δ_1 и высоты h роста на резце, и тем больше, чем ближе температура резания к $t_1^{\circ} \approx 20^{\circ}\text{C}$. (фиг. 14, 15, 16).

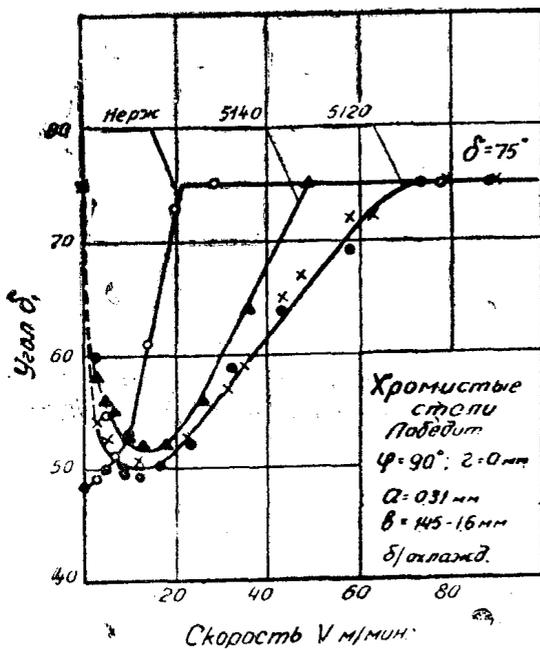
фиг. 2г, 14 и 15). Угол нароста на резце δ_1 определяет действительный угол резания в процессе резания.

Скорость, соответствующая критической температуре исчезновения нароста на резце t_3^0 , является критической скоростью резания V_3 (фиг. 2г). При всех значениях $V < V_3$ нарост на резце образуется, при $V_3 > V_3$ нарост отсутствует, и действительный угол резания $\delta_1 = \delta$ углу резца (фиг. 2г, 14, 16, 17).

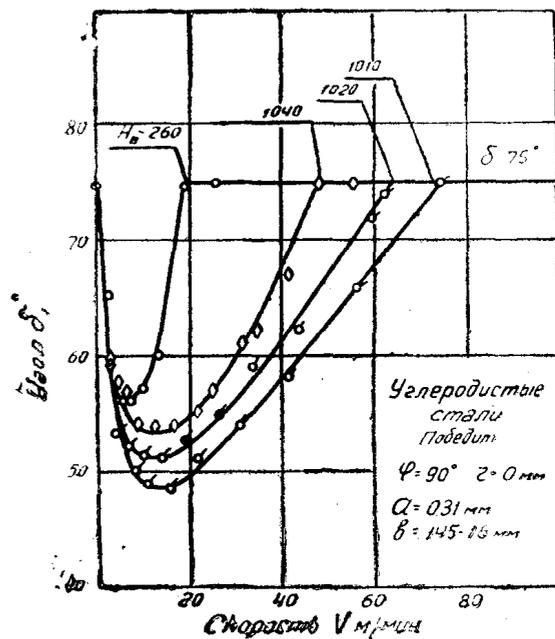
Зависимость V_3 от факторов резания определяется уравнением

$$V_3 = \frac{C}{\delta a^x b^y}, \quad (1)$$

где C —коэффициент, учитывающий исходные свойства обрабатываемого материала и резца, состояние граней и лезвия резца и условия резания (с охлаждением, без охлаждения). $x > y < 1$ —показатели степени влияния толщины и ширины среза на скорость резания.



(Фиг. 17)



Фиг. 17а

Уравнение (1) имеет для практики определенное значение. Для любого заданного режима резания по уравнению (1) можно определить такую величину скорости v_3 , выше которой нарост на резце всегда будет отсутствовать, что очень важно для обеспечения высокого качества чистоты обработанной поверхности.

Если температура резания изменяет коэффициент трения на резце μ и действительный угол резания δ_1 (за счет нароста), а также изменяет и исходные свойства деформируемого металла, превращаемого в стружку ($T'_{исх}$, σ_b , H_b и т. д.), то, несомненно, в связи с этим, должна изменяться и степень пластической деформации (усадка) стружки, а вместе с ней должны изменяться и упрочнение (твердость) стружки, сила и напряжение резания.

Автором установлено, что в результате комплексного взаимодействия μ , $T'_{исх}$ и δ_1 (фиг. 2б, в, г), с возрастанием температуры резания происходит изменение усадки стружки ζ , ее твердости T_n (упрочнение), силы резания P_z и условного напряжения σ_v , по закону типичной кривой (фиг. 2д) или подобной ей. При резании сталей (табл. 1) нормальным рез-

пом (без фаски) типичная кривая имеет четыре фазы изменения в зонах температур: $t_1^\circ - t_2^\circ$; $t_2^\circ - t_{mp}^\circ$; $t_{mp}^\circ - t_{син}^\circ$; $t^\circ > t_{син}^\circ$ ¹⁾.

В первой фазе ($t_1^\circ - t_2^\circ$) типичная кривая (фиг. 2д) резко понижается за счет уменьшения действительного угла резания δ_1 (фиг. 1г) и снижения пластических свойств металла под влиянием явления синеломкости.

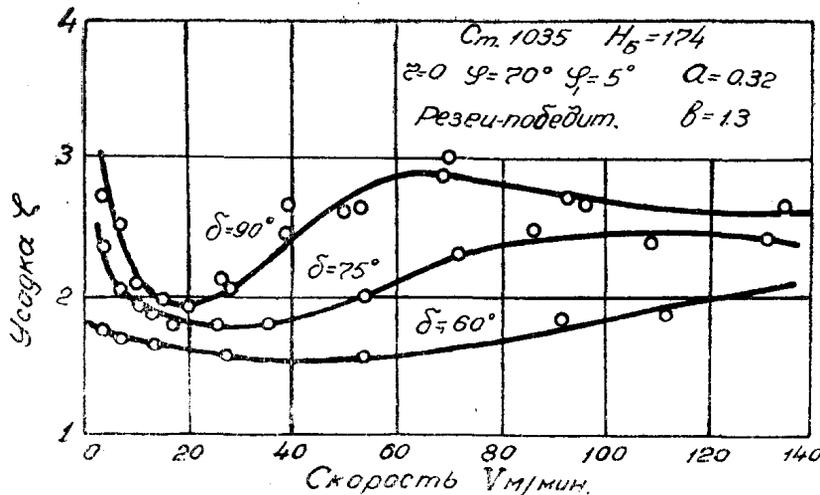
Во второй фазе ($t_2^\circ - t_{mp}^\circ$) кривая повышается, достигая второго максимума при t_{mp}° , в результате увеличения угла δ_1 и коэффициента внешнего трения на резце μ (фиг. 2б, г).

В третьей фазе ($t_{mp}^\circ - t_{син}^\circ$) кривая снова понижается под влиянием снижения μ и увеличения твердости деформируемого металла (фиг. 2в), вследствие активного проявления явления синеломкости.

В четвертой фазе ($t^\circ > t_{син}^\circ$) типичная кривая остается (практически неизменной (слабый уклон), благодаря взаимно противоположному действию коэффициента трения (снижение) и повышению пластичности деформируемого металла, превращаемого в стружку (фиг. 2б, в, 3 ÷ 7).

Если бы не было влияния нароста на резце, типичная кривая имела бы вид непрерывно понижающейся кривой в зоне температур $t_1^\circ - t_{син}^\circ$ (фиг. 2д, пунктирная линия). Именно поэтому вершина второго максимума на типичной кривой при t_{mp}° всегда расположена ниже первого максимума, при $t_1^\circ \approx 20^\circ\text{C}$.

Для примера приведены экспериментальные кривые, полученные автором для стали 1035 (табл. 1). На фиг. 18 показана кривая изменения усадки стружки ζ в зависимости от скорости резания v , при разных углах резания



Фиг. 18

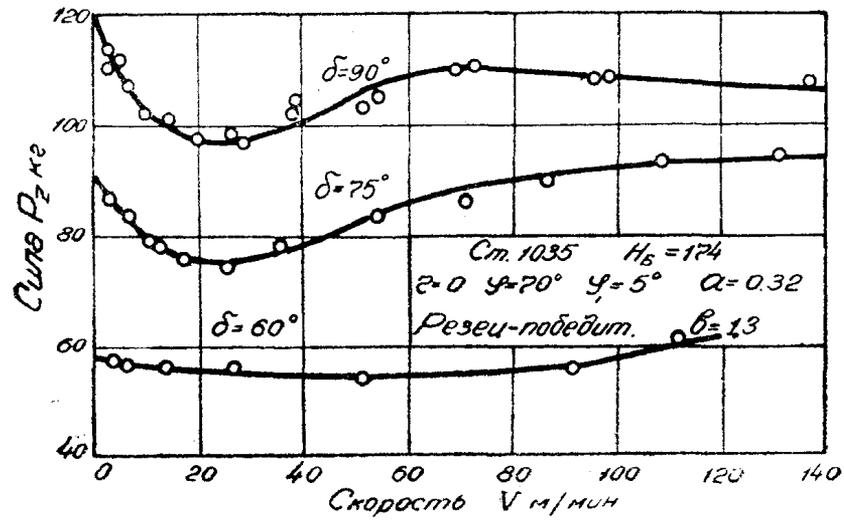
резца. Подобная зависимость для силы резания P_z изображена на фиг. 19 и для напряжения резания σ_v — на фиг. 20. Аналогичный характер имеют кривые, полученные и для других сталей (табл. 1).

Резкое выражение фаз типичной кривой зависит от исходных свойств обрабатываемого металла (табл. 1), угла резания и температуры резания.

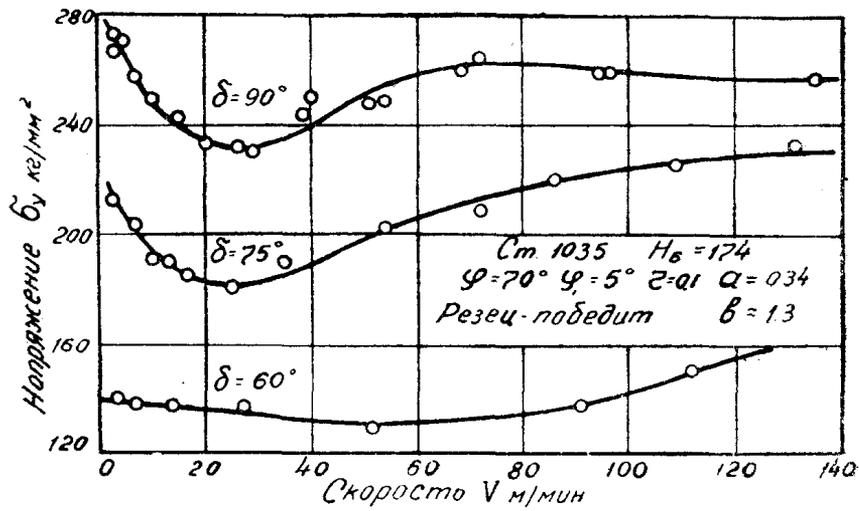
Взаимосвязь между усадкой и твердостью стружки (по времени) видна, например, из сопоставления фиг. 21 и 22 для стали 5120. То же наблюдается и для других сталей (табл. 1).

Установлено, что скорость резания в процессе резания тугоплавких металлов (сталь, табл. 1) является лишь температурным фактором. В зависимости от пределов скорости, т. е. зоны температур, можно получить

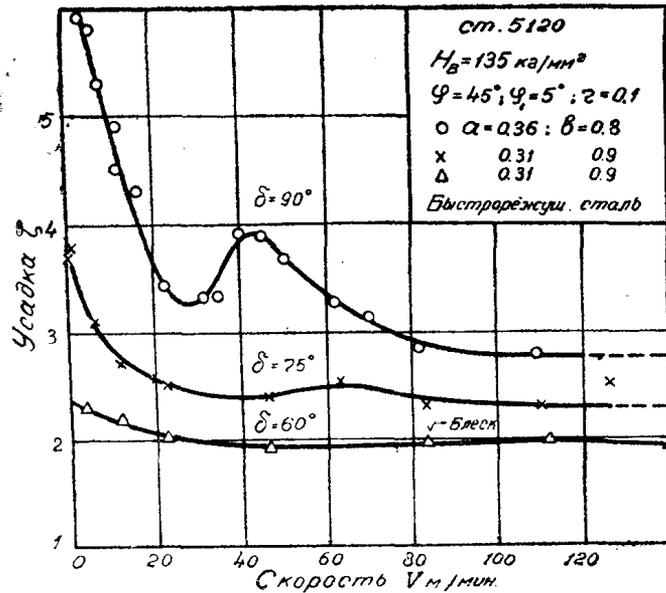
¹⁾ Температура на резце $t_1^\circ \approx 20^\circ\text{C}$, $t_2^\circ \approx 400^\circ\text{C}$, $t_{mp}^\circ \approx 580 - 600^\circ\text{C}$ и $t_{син}^\circ$ — температура в стружке $300 - 400^\circ\text{C}$, в зависимости от исходной твердости стали [2].



Фиг. 19



Фиг. 20

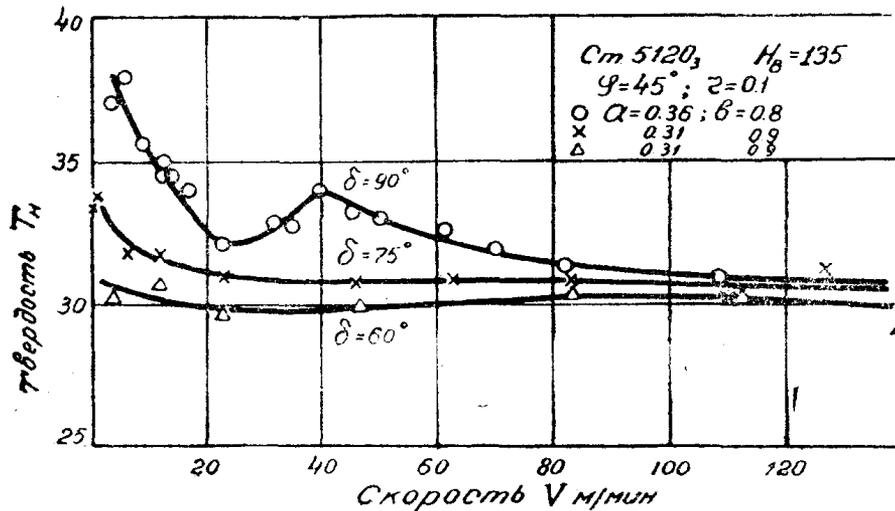


Фиг. 21

любую фазу изменения типичной кривой (фиг. 2д). Высокоскоростное резание есть частный случай резания при высоких температурах, свыше t°_{mp} (фиг. 2).

Не обнаружено заметного влияния скорости резания, как скорости пластической деформации, на усадку и твердость (упрочнение) стружки, на силу и напряжение резания, на момент исчезновения нароста на резце и на другие явления процесса резания.

Изменение усадки стружки и силы резания по закону типичной кривой (фиг. 2д) позволяет вскрыть причины существующих противоречий в вопросах о влиянии скорости резания на силу резания, на усадку стружки и о влиянии на усадку толщины среза ([5; 7; 8; 9; 10] и многие др.).



Фиг. 22

Наблюдаемые, часто противоречивые, отклонения в экспериментах у многих исследователей зависимости $P_z = f(v)$ объясняются исключительно различием пределов температурного режима резания, в которых проводились те или иные опыты. В зависимости от этих пределов все существующие опыты по силам резания (для железа и стали) хорошо укладываются в соответствующие фазы типичной кривой (фиг. 23). Линии на фиг. 23 показывают пределы температурного режима резания в данных исследованиях.

Толщина и ширина среза, как и скорость резания, влияют на усадку и твердость стружки и на напряжение резания лишь как температурные факторы. В зависимости от их сочетания может быть получена также любая зона изменения температур, а следовательно, и любая фаза изменения усадки стружки, ее твердости и напряжения резания по типичной кривой (фиг. 2д). [2]. Отсюда вытекает частный закон: для данного обрабатываемого материала и угла резания резца, режимам резания с постоянной температурой соответствует неизменное состояние обрабатываемого металла (σ_b, σ_s, H_B), постоянная величина коэффициента трения μ на гранях резца, постоянный действительный угол резания δ_1 (определяемый углом нароста), постоянная усадка ζ и твердость T_n стружки и постоянное напряжение резания σ_v .

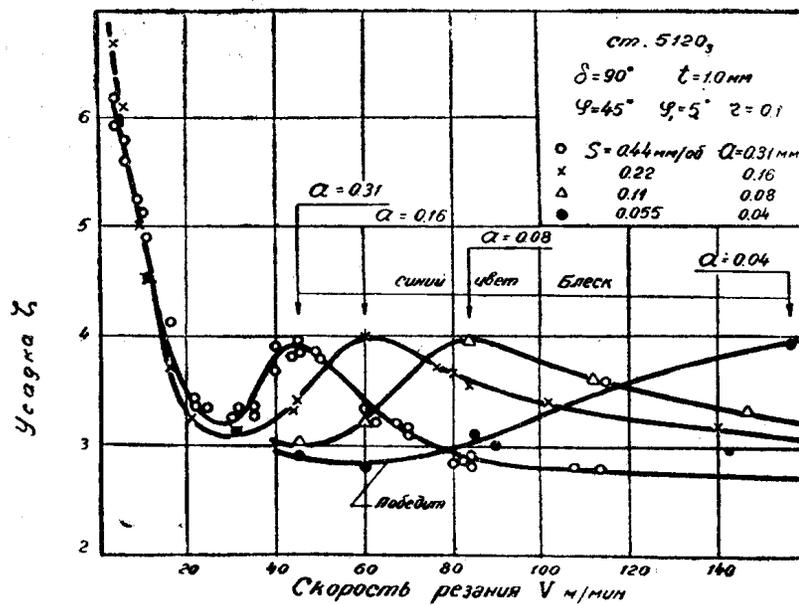
На фиг. 24 показана серия типичных кривых усадки стружки для стали 5120. Независимо от толщины среза и скорости резания, каждому значению усадки $\zeta = \text{const}$ взятому на одноименных фазах (ветвях) кривых соответствует определенная температура резания $t^{\circ} = \text{const}$, и наоборот. Так, например, линия, касательная к вершинам „горба“ (второго максимума)

кривых на фиг. 24, соответствует постоянной критической температуре t_{mp}^{*} (580—600°C) и постоянной величине усадки $\zeta \approx 4$.



Фиг. 23

Существующее мнение о том, что с увеличением толщины среза a усадка стружки ζ уменьшается [5], есть частный случай резания в зоне



Фиг. 24

температур $t_1^\circ - t_2^\circ$ или $t_{mp}^\circ - t_{сун}^\circ$ (фиг. 2д, 21, 24), т. е. уменьшение усадки в первой и третьей фазах типичной кривой под влиянием температуры, но не толщины среза.

Автором установлено, что твердость T_n по времени (по маятнику Герберта) является достаточно надежной характеристикой упрочнения металла в стружке при резании и в образце при пластическом сжатии. Упрочнение стружки при резании и образца при сжатии зависит от степени пластической деформации (усадки) и от исходных свойств деформируемого металла (табл. 1). Не обнаружено заметного влияния „отдыха“ на процесс упрочнения стружки и не замечено проявления „насыщения“ упрочнения стружки, несмотря на изменение скорости резания от 0,0007 до 640 м/мин и усадки стружки от $\zeta = 1,3$ до $\zeta = 10$.

Между твердостью (по времени) и усадкой стружки при резании сталей (табл. 1) имеется определенная зависимость вида

$$T_n = T_0 \zeta^m, \quad (2)$$

то же при пластическом сжатии образцов

$$T_n = T_0' \zeta^{m'}, \quad (3)$$

где T_0 и T_0' — константы, характеризующие исходные свойства деформируемого металла, соответственно при резании ($T_{исх}$) и при сжатии ($T'_{исх}$). Константы T_0 и T_0' названы условной твердостью.

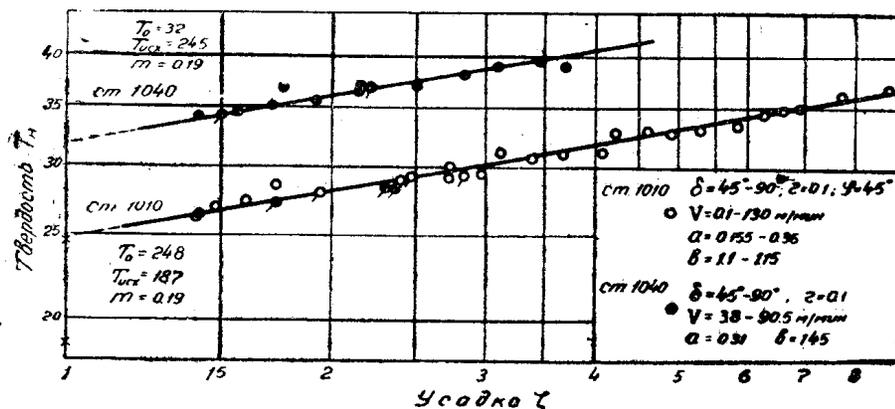
При одинаковой степени деформации (усадке) образца и стружки твердость стружки при резании всегда выше, чем у образца при пластическом сжатии, так как $T_0 > T_0'$. Можно предполагать, что это происходит в результате различных условий течения деформируемого металла в том и другом процессе. Значения T_0 , T_0' и m , m' приведены в табл. 1.

Между зависимостью (2) и (3) существует та же аналогия, как и в закономерностях политроп напряжения σ при сжатии для предварительно упрочненного (4) и неупрочненного образца (5) (Большанина М. А., Кушин Н. Ф. и др. [4]).

$$\sigma = \sigma_0 \zeta^n \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0' \zeta^{n'} \quad (5)$$

Для примера на фиг. 25 показана зависимость твердости стружки T от усадки ζ для углеродистых сталей 1010 и 1040 (табл. 1). Несмотря на значительное изменение режимов резания, расположение точек свидетель-

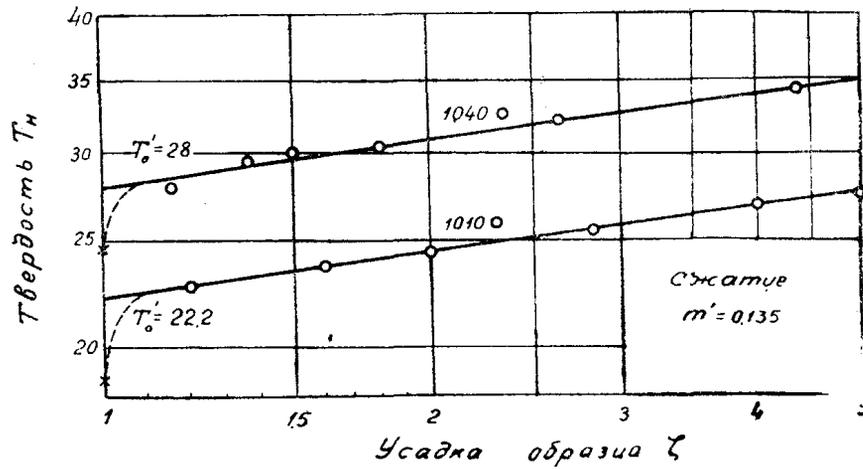


Фиг. 25

ствует о том, что твердость стружки зависит только от усадки, т. е. от степени упрочнения данного металла. Аналогичные зависимости при пластическом сжатии для тех же сталей приведены на фиг. 26.

Зная закономерность изменения и взаимосвязь явлений процесса резания, не трудно объяснить закономерность изменения и чистоты обработанной поверхности (фиг. 2е), так как последняя представляет по существу, завершающее явление процесса резания.

Основной характеристикой чистоты поверхности являются величины неровностей и шероховатостей на обработанной поверхности. При несво-



Фиг. 26

бодном резании величина неровностей H складывается из высоты остаточных гребешков $T_{ост}$ и высоты шероховатостей на поверхности среза $H_{шер}$.

$$H = H_{ост} + H_{шер} \quad (6)$$

При свободном резании

$$H = H_{шер}$$

$H_{ост}$ — геометрическая характеристика чистоты поверхности. Она зависит от профиля резца в плане (r, φ, φ_1), состояния режущей кромки и величины подачи S . $H_{шер}$ — является не только геометрической, но и физической характеристикой чистоты среза, так как зависит от температурного режима резания и исходных свойств обрабатываемого материала.

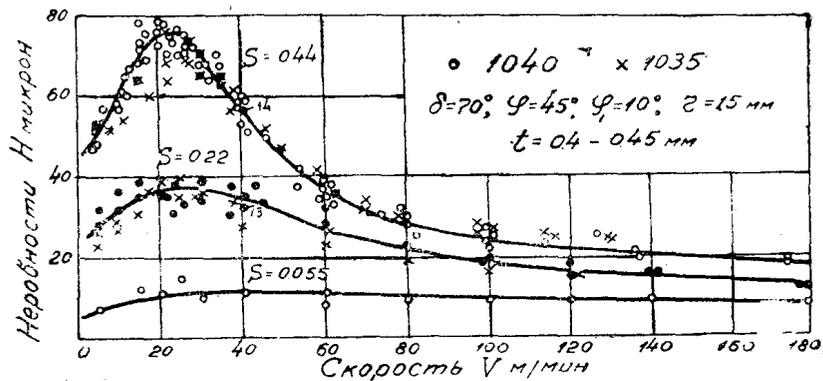
Как и все явления процесса резания (нарост, усадка и твердость стружки, коэффициент трения на резце и т. д.), чистота поверхности изменяется под влиянием температуры резания (на резце и в стружке), воздействующей на величину шероховатостей $H_{шер}$. Влияние температуры на величину $H_{шер}$ осуществляется через изменение трения на задней грани резца (или нароста), степени пластической деформации (усадки) стружки, высоты нароста на резце и сдвигов на поверхности среза.

В результате этого закономерность изменения неровностей H с повышением температуры резания выражается кривой (фиг. 2е), имеющей максимум при температуре t_2° , когда нарост на резце (нормальной геометрии, без фаски) достигает высоты h_2^{max} (фиг. 2г). Для подтверждения на фиг. 27 приведены экспериментальные кривые изменения неровностей H в зависимости от скорости резания v (а следовательно, и температуры, фиг. 2а, 3) и величины подачи S для стали 1035 и 1040 (табл. 1). Чем меньше S , тем ниже H , но тем выше v , соответствующая максимуму кривой. Для всех исследованных сталей (табл. 1) кривые имеют одинаковый (типичный) характер, показывающий четыре фазы изменения неровностей H (фиг. 2е, 27) в определенных зонах температур.

Первая фаза (при $t_1^\circ \approx 20^\circ\text{C}$). Высота неровностей $H = \text{const}$ и зависит от сдвигов (надрывов) на поверхности среза, величина которых определяется степенью деформации (усадкой) стружки.

Вторая фаза ($t_1^{\circ} - t_2^{\circ}$). Высота неровностей H возрастает до H_{2max} , в результате увеличения высоты нароста и коэффициента трения (фиг. 2г, б), уменьшения срыва вершин гребешков ($F_{ост}$) под влиянием резкого снижения усадки стружки¹⁾ (фиг. 2д).

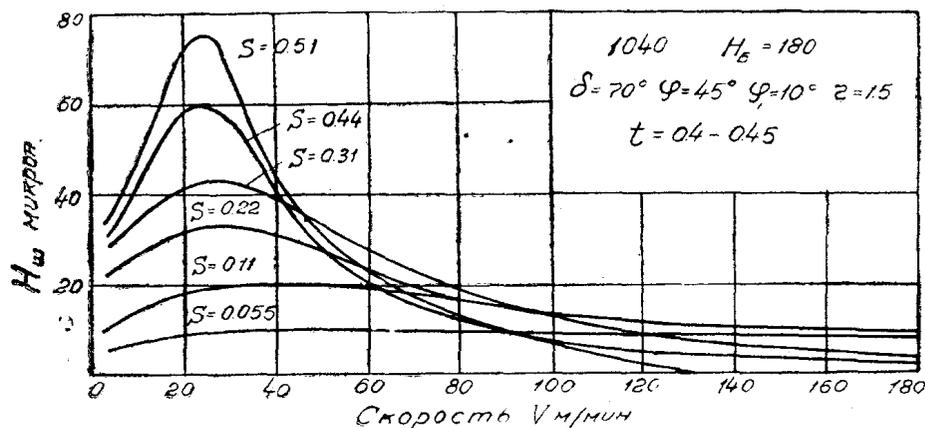
Третья фаза ($t_2^{\circ} - t_{зер}^{\circ}$, где последняя соответствует появлению зеркального блеска на поверхности среза). Высота H уменьшается до $H_{зер}$, сначала резко—под влиянием снижения высоты нароста (фиг. 2г) и увеличения срыва вершин гребешков с возрастанием усадки стружки до тем-



Фиг. 27

пературы $t_{тр}^{\circ}$ (фиг. 2д), затем медленно—за счет снижения коэффициента трения μ (фиг. 2б) и уменьшения $H_{шер}$ на поверхности среза.

Четвертая фаза ($t^{\circ} > t_{зер}^{\circ}$). Поверхность среза имеет зеркальный блеск. Шероховатости $H_{шер} = 0$. Высота неровностей $H = H_{зер} < H_{ост}$, в результате влияния срыва вершин гребешков от усадки стружки $\zeta_{син}^{min}$ (фиг. 2д). Чем больше угол резания резца δ , тем больше усадка стружки $\zeta_{син}^{min}$, тем меньше $H_{зер}$, и наоборот. Для получения чистоты поверхности наивыс-



Фиг. 28

шего качества, характеризуемой зеркальным блеском и высотой неровностей $H = H_{шер} = 0$, необязательно иметь высокую скорость резания, малую подачу и глубину резания, важно иметь температуру резания $t^{\circ} \geq t_{зер}^{\circ}$ и угол резца в плане $\mu_1 = 0^{\circ}$. С этой точки зрения, выгодно работать резцами с отрицательными передними углами и большими подачами. Из фиг. 28 отчетливо видно, что чем больше величина подачи S ,

¹⁾ Обнаружено интересное явление срыва вершин гребешков самой стружкой, вследствие усадки последней по ширине. Чем больше продольная усадка стружки, тем больше ее усадка по ширине, тем больше срыв гребешков, и наоборот [2].

тем выше температура резания, тем меньше скорость резания, соответствующая $H_{шер} = 0$, и наоборот.

Рассмотренное положение, вытекающее из самой сущности явлений процесса резания, отнюдь не отвергает применения на практике высокоскоростного резания, при температурах $t^o \geq t^o_{зер}$. При этом чистота поверхности среза хотя и остается фактически неизменной, так как $H_{шер} = 0$, однако производительность процесса резания увеличивается пропорционально возрастанию скорости.

Заключение

В итоге проведенного исследования процесса резания железоуглеродистых сплавов получены следующие результаты.

Во-первых, установлена закономерность изменения: коэффициента внешнего трения на гранях резца μ , геометрии нароста на резце (угла δ_1 и высоты h), усадки стружки ζ и ее твердости T_n , силы P_z и напряжения резания σ_v и величины неровностей на обработанной поверхности H .

Во-вторых, найдена единая взаимосвязь явлений в процессе резания и основная причина их изменения — температура.

Все это позволяет не только объяснить сущность явлений процесса резания, вскрыть причины существующих противоречий в современной литературе по резанию, но и наметить пути к дальнейшему исследованию процесса резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремин А. Н. Профилографирование поверхностей методом прерывистого ощупывания. „Изв. ТИИ“, т. 59, вып. 1, 1933.
2. Еремин А. Н. Деформация, твердость, сила и чистота поверхности в процессе резания. „Изв. ТПИ“, 1947.
3. Зимин Ю. П. Исследование высокоскоростного резания стали. „Изв. ТПИ“, 1948.
4. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том II, 1941
5. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Том III, 1944.
6. Кунин Н. Ф. Зависимость коэффициента внешнего трения раскаленного железа по чугуну от различных факторов. ЖТФ, т. 3, 1933.
7. Кривоухов В. А. Деформирование поверхностных слоев металла в процессе резания. Машгиз, 1945.
8. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металлов. Изд. АН СССР, 1944.
9. Касьян М. В. Скорость резания при оптимальной деформации стружки. „Изв. ГИИ“, книга № 14, 1941.
10. Клушин М. И. и Фельдштейн Э. И. Влияние скорости на усилия резания при положительных и отрицательных передних углах инструмента. „Станки и инструмент“, № 7—8, 1945.
11. Лашко Н. Ф. и др. Пластическая деформация сжатия при высоких температурах. ЖТФ, т. 7, 182, 1937.
12. Розенберг А. М. Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки. „Изв. СТИ“, т. 51, вып. 4. 1929.