

К ВОПРОСУ О СУЩНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРИ СКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ СТАЛИ

В. М. МОСТОВОЙ

Во всех областях нашей социалистической промышленности большое внимание уделяется скоростным методам работы. В области машиностроения развернулась большая творческая работа по внедрению и дальнейшему развитию методов скоростного резания металлов. За период с 1935 г. и по настоящее время работниками промышленности и нашими учеными накоплен большой опыт по скоростному резанию, на основании которого созданы уже некоторые теоретические предпосылки к объяснению явлений, происходящих при скоростном резании. Но, вместе с тем, физико-механические явления, происходящие при скоростной обработке металлов, в целом еще слабо изучены. Дальнейшее распространение скоростных методов обработки и повышение скорости резания являются вопросом первостепенной важности. Поэтому выяснение природы скоростного резания является совершенно необходимым. Дать ответ на этот вопрос, значит выяснить причины, под действием которых создаются благоприятные условия для осуществления и дальнейшего развития скоростных методов обработки.

Прежде чем перейти к разрешению поставленного вопроса, считаем необходимым остановиться на работе Э. И. Фельдштейна „К вопросу о сущности процессов скоростного резания сталей“. Автор этой работы более полно и более точно, по сравнению с другими исследователями, дал ответ на этот вопрос.

Прежде всего Э. И. Фельдштейн, по нашему мнению, делает правильную ориентацию на то, что дальнейшее развитие и усовершенствование методов скоростной обработки „невозможно без правильного понимания сущности процессов скоростного резания металлов, без выяснения природы явлений, определяющих характер взаимодействия обрабатываемого материала и режущего инструмента при скоростном резании“ [1].

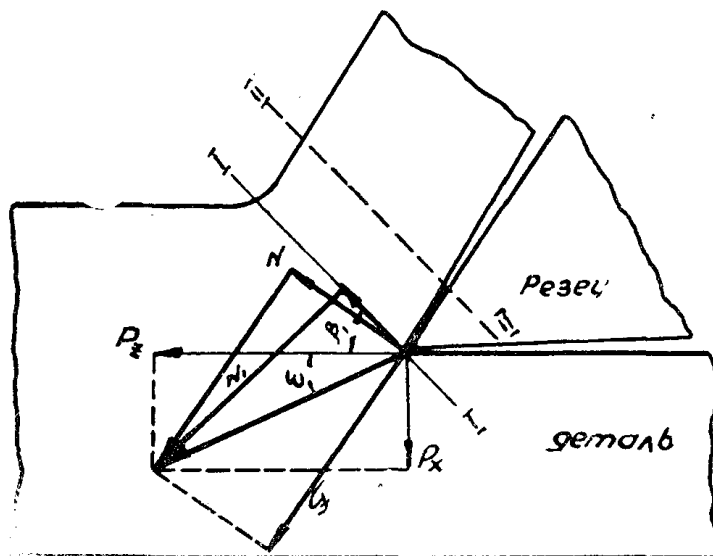
Автор в своих выводах приходит к принципиально правильному заключению, что перенесение механических характеристик, полученных при разрыве образца, на характеристики резания ошибочно.

Но вместе с тем мы не можем согласиться с другими утверждениями в выводах Э. И. Фельдштейна, а именно:

1. Обрабатываемый материал в выводах автора при скоростном резании оказывает влияние на стойкость инструмента только через механические воздействия: сходящая стружка истирает переднюю грань резца (механический износ передней грани). По нашему мнению, материал играет более активную роль: тепло, выделяющееся в результате происходящих пластических деформаций в момент формирования стружки оказывает активное влияние на равнодействующую силу $-R$, усаживающую стружку, через изменение коэффициента трения μ и силу трения F (фиг. 1).

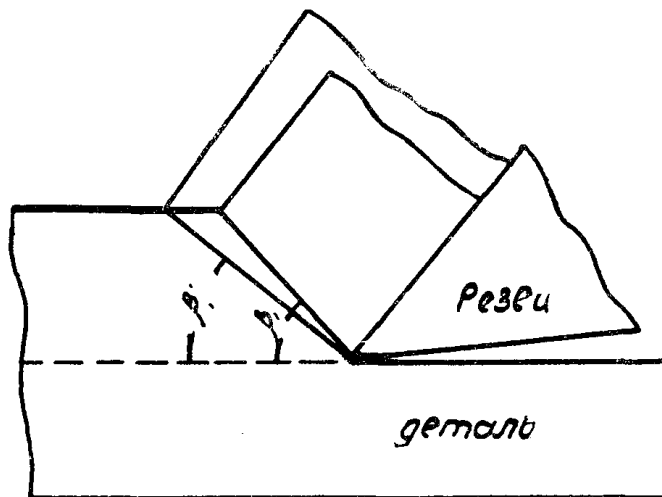
2. Далее в работе отмечается, что эффективность скоростного резания определяется, в первую очередь, красностойкостью и износоустойчивостью титано-вольфрамовых сплавов. С этим выводом нельзя не согласиться, так

же как нельзя не согласиться и с тем, что температура в зоне резания при скоростном точении достигает $700-800^{\circ}\text{C}$. Но когда автор отрицает, по существу, влияние температуры, возникшей в зоне резания, на дальнейший процесс резания, с этим мы согласиться не можем. По утверждению автора, стружка на передней грани резца не успевает прогреться по всей толще, так как нагрев ее происходит со стороны контактной поверхности в очень малый промежуток времени. Здесь автор недостаточно полно раскрыл физи-



Фиг. 1

ческую сущность явлений, имеющих место между плоскостью сдвигов и плоскостью, параллельной ей и проходящей через место контакта (конечное) стружки с резцом. Ограничившись констатацией факта наличия высоких температур в зоне резания, автор не показал того, что возникшая высокая температура в зоне резания оказывает существенное влияние на формиро-



Фиг. 1а

вание сил, действующих на передней грани резца, которые, в свою очередь, (в частности, равнодействующая сила— R) активно действуют на зону резания через изменение угла наклона плоскости сдвигов— β_1 (фиг. 1а).

В этой работе мы делаем попытку дать более полное объяснение природы скоростного резания. Основываясь на последних достижениях

в области металлофизики и экспериментальных данных в области резания металлов [2, 3], полагаем, что природу скоростного резания металлов можно объяснить следующими факторами:

а) красностойкостью и износостойкостью твердого сплава режущего инструмента;

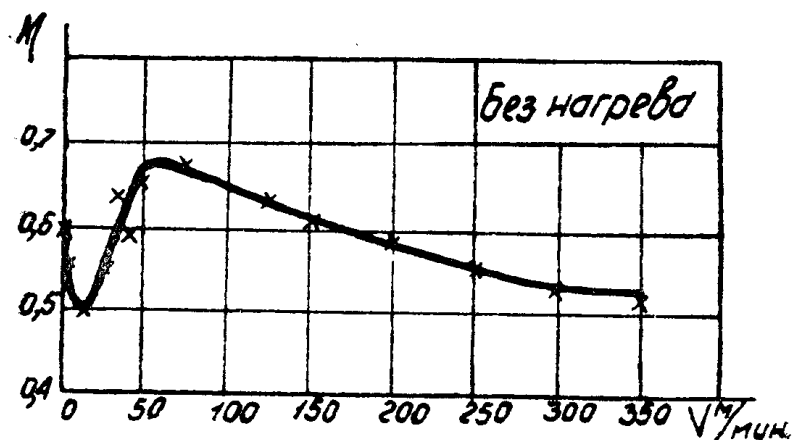
б) снижением коэффициента трения между контактными поверхностями стружки и резца;

в) изменением величины и направления равнодействующей силы R под действием коэффициента трения. Для выяснения влияния температуры на формирование стружки металл впереди резца и в зоне резания нами подвергался искусственному предварительному нагреву. Это дало возможность сравнить полученные результаты с результатами, полученными снятием стружки при обычных условиях течения.

При высокой скорости резания резец, внедряясь в металл, смещает стружку в момент образования ее относительно основного металла в направлении плоскости сдвигов. В результате пластических деформаций в зоне резания и относительного смещения формируемой стружки в плоскости сдвигов частицы металла по всей толще стружки подвергаются интенсивному нагреву до высокой температуры. Кроме этого, стружка, находясь в контакте с передней гранью резца, дополнительно нагревается в результате действия силы трения и наличия деформаций в контактном слое стружки, нагрев стружки здесь может быть только на незначительную глубину, в силу малой продолжительности контакта. Для наших напряженных условий опыта, т. е. при $V=218$ м/мин., $\zeta_l=1,5$, $l=1$ мм, время контакта стружки с резцом будет равно:

$$t = \frac{60 \cdot l \cdot \zeta_l}{1000 V} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 1,5}{1000 \cdot 218} = 0,0004 \text{ сек.}$$

За столь незначительное время стружка со стороны контактной поверхности прогреется только на незначительную глубину. Практически можно считать, что стружка по всей толще будет иметь температуру, приобретенную ею в зоне резания. Изменение температуры контактного слоя интересует нас, поскольку оно вызывает изменение коэффициента трения μ и, следовательно, силы трения F и равнодействующей R .



Фиг. 2

При обычных условиях обработки, т. е. без искусственного подогрева металла в зоне резания, с увеличением скорости резания от $V=50$ м/мин и выше коэффициент трения снижается (фиг. 2). С применением искусственного нагрева аналогичное снижение наблюдается при $T=600^\circ\text{C}$ (фиг. 3).

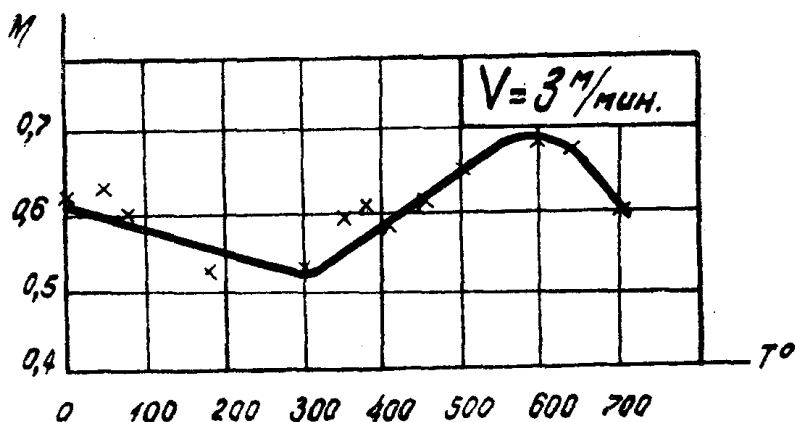
Со снижением коэффициента трения снижается сила трения, а также изменяет свою величину и направление равнодействующая сила R (фиг. 1).

С изменением направления равнодействующей силы увеличивается угол наклона плоскости сдвигов β_1 , и с увеличением угла β_1 изменяется положение плоскости сдвигов относительно плоскости резания, т. е. изменяется положение основания формируемой стружки относительно основного металла болванки. Увеличение угла β_1 приводит к уменьшению усадки, что так же

следует из фиг. 1а и выражения:
$$\operatorname{tg} \beta_1^\circ = \frac{\cos \gamma^\circ}{\zeta_a - \sin \gamma^\circ}, \quad (1)$$

где β_1° — угол, определяющий положение плоскости сдвигов, γ° — передний угол, ζ_a — усадка стружки по толщине.

Итак, из наших рассуждений следует, что стружка приобретает ту или иную температуру только в момент ее формирования в зоне резания. На пути ее схода, т. е. между плоскостью I—I и II—II (фиг. 1) стружка сохраняет приобретенную ею температуру. Контактный слой стружки подвергается дополнительному нагреву. Так обстоит дело, по нашему мнению, с теплообразованием в процессе резания металла без предварительного подогрева.



Фиг. 3

Что же произойдет в процессе резания, если мы искусственным путем подогреем металл в зоне резания и осуществим съём стружки при той же скорости резания, что и в первом случае? Предварительным подогревом мы снижаем механические свойства подлежащего съёму металла. Следовательно, в зоне резания до того, как резец начнет внедряться в металл, создана нами какая-то повышенная температура. Далее, в процессе резания, стружка по пути ее движения на участке между плоскостями I—I и II—II (фиг. 1) дополнительно нагреется со стороны контактной поверхности. И мы имеем основания предполагать, что температура на передней грани резца будет выше, по сравнению с предыдущим случаем.

Повышение температуры между контактными поверхностями, как известно, снижает коэффициент трения μ , равнодействующую силу R , увеличивает угол наклона плоскости сдвигов β_1° и, следовательно, снижает усадку стружки¹⁾. Основываясь на этих рассуждениях, мы считаем:

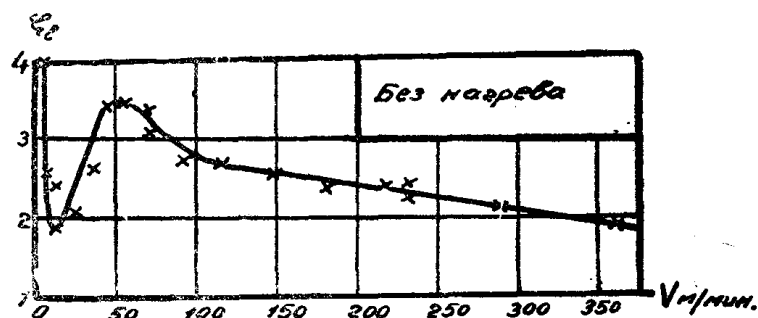
1) Коэффициент трения μ , усадка стружки ζ_a , усилия резания P_2 , напряжение в плоскости сдвигов σ_s будут иметь более низкие значения при срезании стружки с болванки, предварительно подогретой в зоне резания, по сравнению с теми значениями, которые были бы получены при

¹⁾ Имеются в виду конкретные температурные зоны, в пределах которых коэффициент трения снижается.

съеме стружки с болванки без предварительного подогрева ее в зоне резания при той же скорости резания.

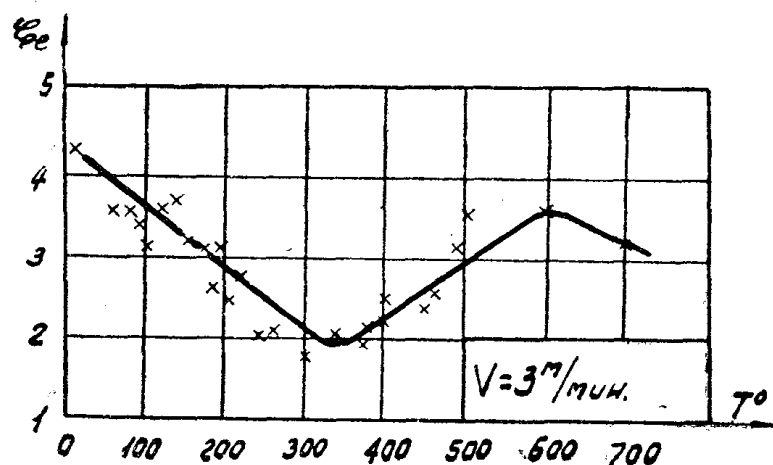
2) При соблюдении равенства температур на передней грани резца в том и другом случае, т. е. при искусственном подогреве и без подогрева металла в зоне резания, должно сохраниться равенство усадок стружки и коэффициентов трения между контактными поверхностями стружки с резцом.

Докажем эти предположения, основываясь на наших экспериментальных данных.



Фиг. 4

При выполнении опытов мы в одном случае снимали стружку с обрабатываемой детали с переменными скоростями. При этом тепловой режим в процессе резания обуславливался скоростным режимом. Температуру, полученную за счет изменения скоростного режима, мы обозначили через T^0 . В другом случае металл в зоне резания предварительно подогревался. Температуру предварительного подогрева мы обозначили через T^0 .



Фиг. 5

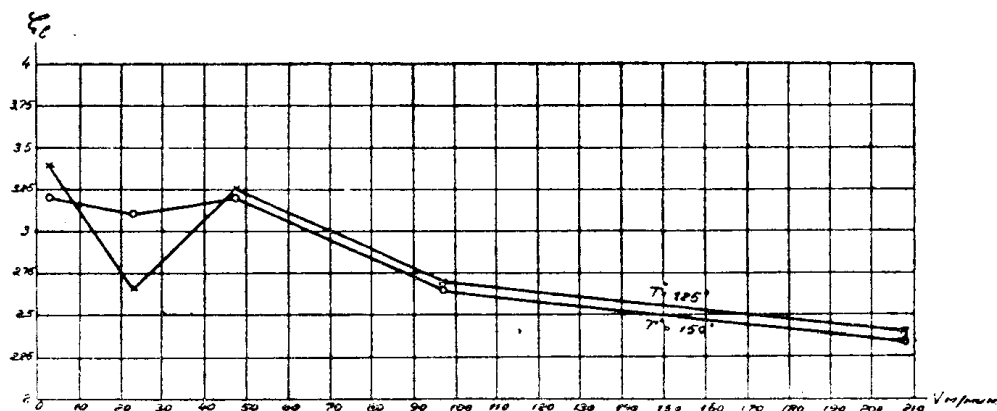
Приняв такую методику, мы смогли выяснить влияние температуры предварительного подогрева и установить долю ее воздействия на процесс резания.

При нагреве металла в зоне резания до $T = 550-600^\circ\text{C}$ и скорости резания, исключаяющей влияние на усадку стружки температуры резания, т. е. при $V = 3 \text{ м/мин}$, усадка стружки $\zeta_l = 3,5$ (фиг. 5).

В другом случае температура резания изменялась за счет изменения скорости резания. Из кривой (фиг. 4) следует, что при скорости резания $V = 50 \text{ м/мин}$ усадка стружки $\zeta_l = 3,5$.

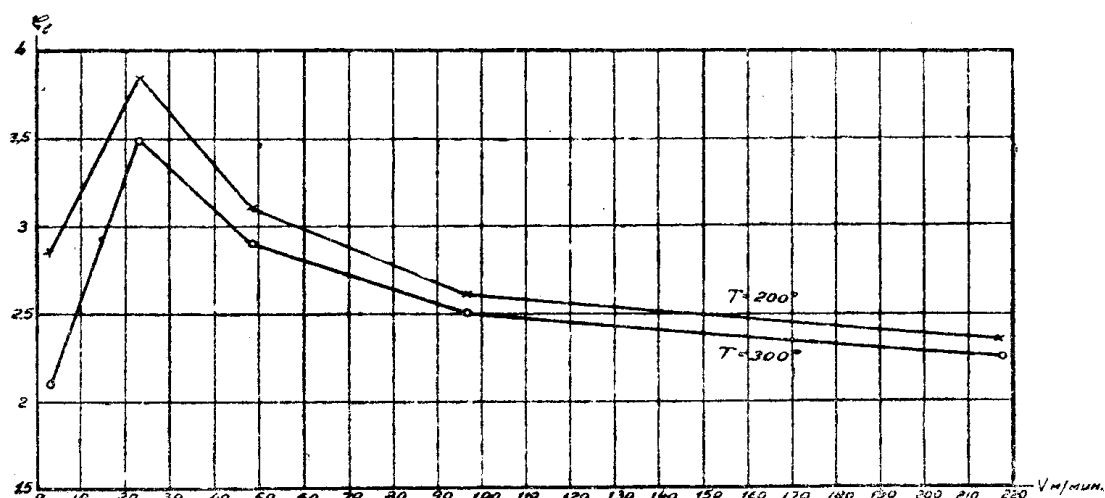
Основываясь на том, что режимы одинаковых температур на передней грани резца сопровождаются одинаковой геометрией нароста, одинаковыми

коэффициентами трения и усадками стружки, независимо от источника получения тепла, а также на наших экспериментальных данных, мы считаем, что при скорости резания $V=50$ м/мин и $T=0^\circ$ температура на передней грани резца была одинаковой, но более высокой по сравнению с температурой в зоне резания. Итак, на основании экспериментальных данных



Фиг. 6

мы приходим к выводу, заключающемуся в том, что усадка стружки при скорости резания $V=50$ м/мин и соответствующей этой скорости температуре на передней грани резца $T_v=550-600^\circ$ при $T=0^\circ$, равна усадке стружки при скорости резания $V=3$ м/мин ($T_v=0^\circ$) и $T=550-600^\circ$.



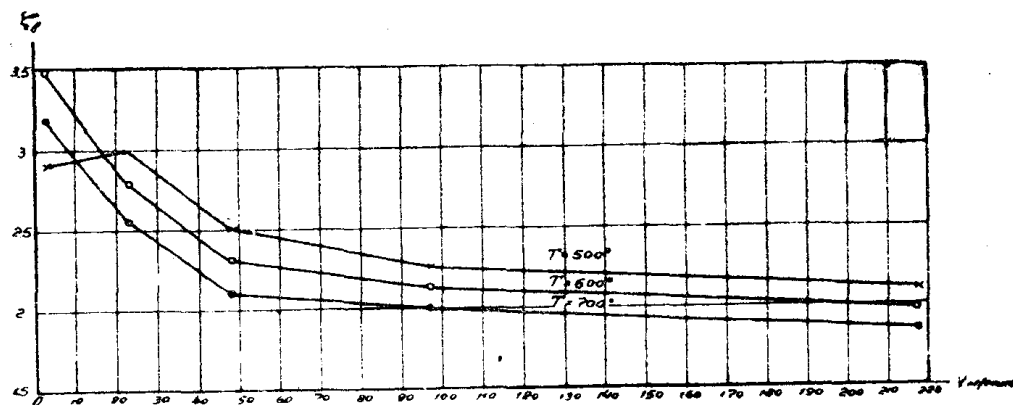
Фиг. 7

Далее мы провели опыты с переменными скоростями резания и температурами предварительного подогрева металла впереди резца и в зоне резания и получили при $V=50$ м/мин следующие результаты: с нагревом до $T=125^\circ$ (фиг. 6) усадка стружки снизилась до $\xi_l=3,2$.

С дальнейшим повышением температуры (фиг. 6, 7, 8) усадка соответственно снижается:

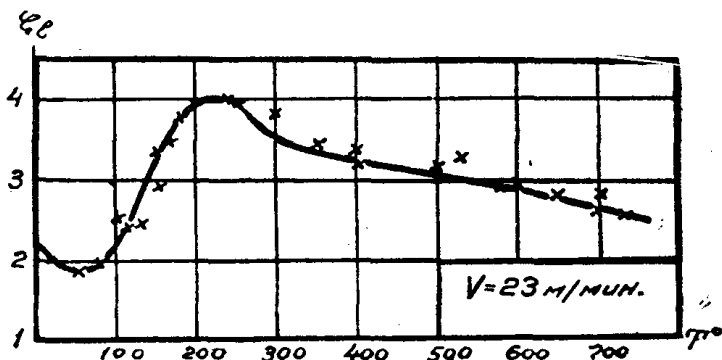
При температуре предварительного нагрева	$T=150^\circ$	$\xi_l=3,18,$
"	$T=200^\circ$	$\xi_l=3,10,$
"	$T=300^\circ$	$\xi_l=2,9,$
"	$T=500^\circ$	$\xi_l=2,5,$
"	$T=600^\circ$	$\xi_l=2,3,$
"	$T=700^\circ$	$\xi_l=2,1.$

Как видно из экспериментальных данных, усадка стружки неизменно снижается с повышением температуры предварительного нагрева (фиг. 6, 7, 8) и температуры резания (фиг. 9, 10, 11, 12). Равенство усадок сохраняется при равенстве температур на передней грани резца, независимо от того,



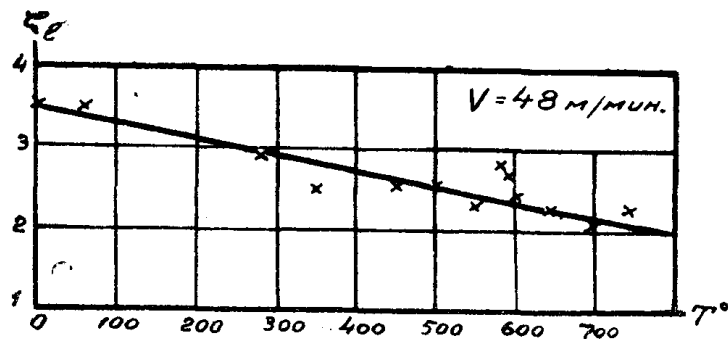
Фиг. 8

каким путем получена эта температура. Из экспериментального графика (фиг. 13) видно, что сила P_z при $T = 500 - 600^\circ$ и $V = 3$ м/мин имеет меньшее значение по сравнению с силой P_z при $V = 50$ м/мин и соответствующей этой скорости температуре на передней грани (фиг. 14).



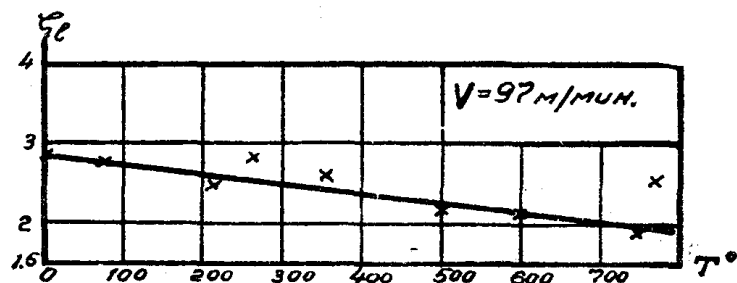
Фиг. 9

Так, при скорости резания $V = 50$ м/мин., но без предварительного подогрева металла в зоне резания, т. е. при $T = 0^\circ$, сила $P_z = 171$ кг. В другом случае съем стружки осуществлялся со скоростью резания $V = 3$ м/мин, т. е. при $T_v = 0^\circ$, но с предварительным искусственным подогревом металла



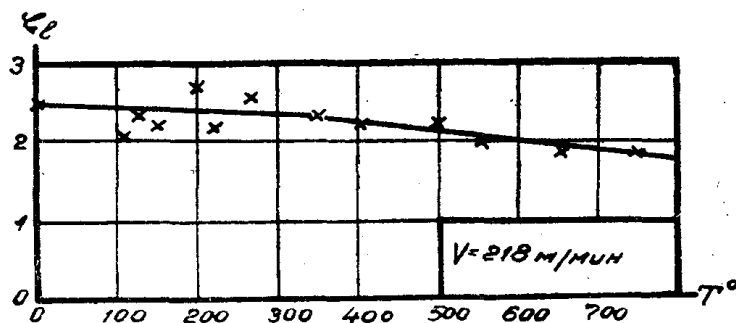
Фиг. 10

впереди реза и в зоне резания до $T = 550 - 600^\circ$. При этих условиях мы получили силу резания $P_z = 156$ кг. Таким образом, при одинаковых температурах на передней грани реза в том и другом случае мы получили



Фиг. 11

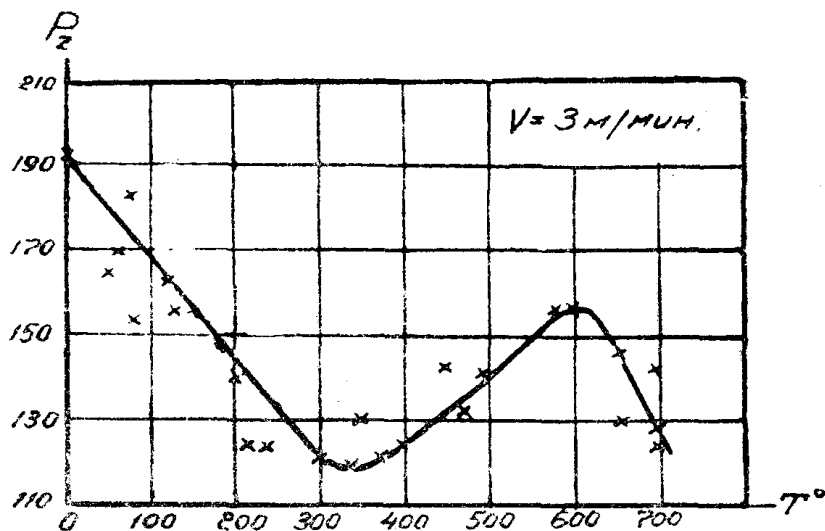
разные силы резания. Затем мы срезали стружку при переменных скоростях резания и температурах предварительного подогрева металла впереди реза и в зоне резания и получили при $V = 50 \text{ м/мин}$ следующие значения.



Фиг. 12

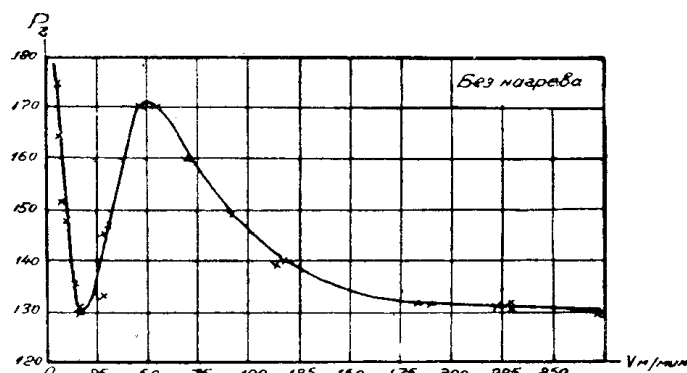
При $T = 225^\circ$ (фиг. 15, 16) сила $P_z = 142$ кг и соответственно:

при $T = 300^\circ$	$P_z = 132$ кг,
при $T = 400^\circ$	$P_z = 124$ кг,
при $T = 500^\circ$	$P_z = 114$ кг,
при $T = 600^\circ$	$P_z = 106$ кг,
при $T = 700^\circ$	$P_z = 95$ кг.



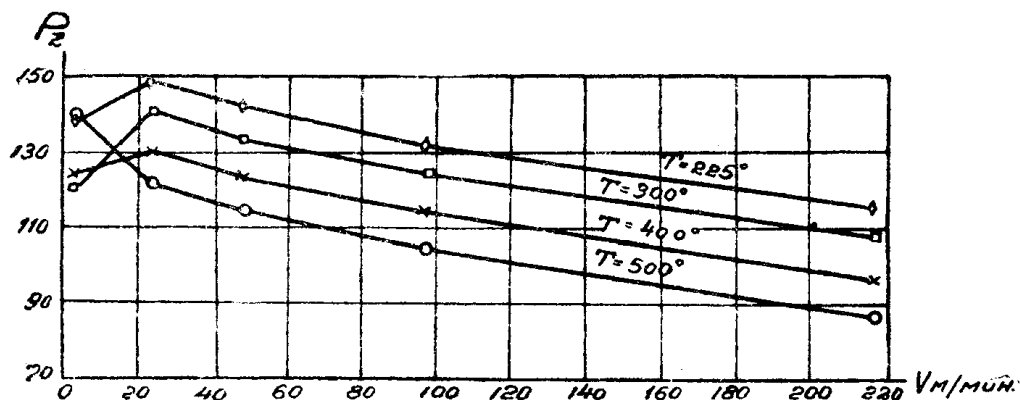
Фиг. 13

Как видно, сила резания P_z с повышением температуры за счет искусственного подогрева неизменно снижается. Значение силы резания P снижается также и с увеличением скорости резания.



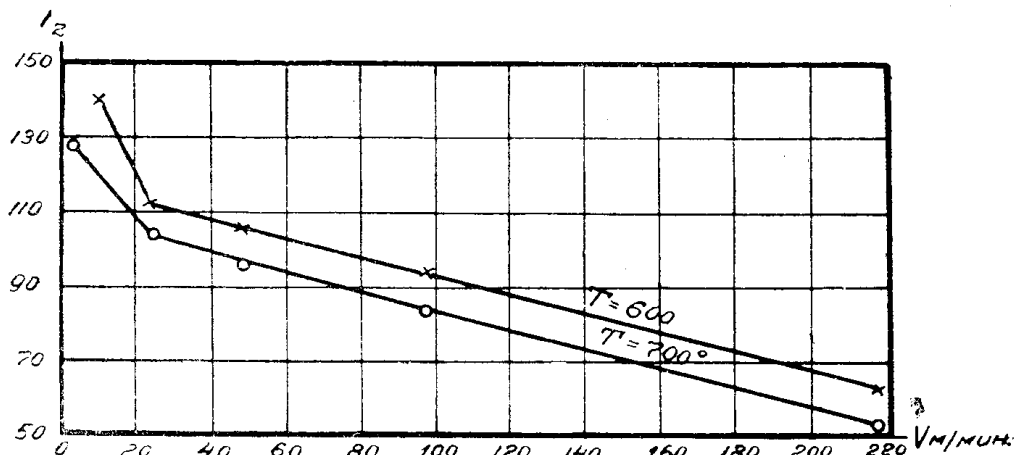
Фиг. 14

Итак, мы пришли к чрезвычайно важному выводу, заключающемуся в том, что при равенстве температур на передней грани резца сила резания P_z не сохраняет равенства.



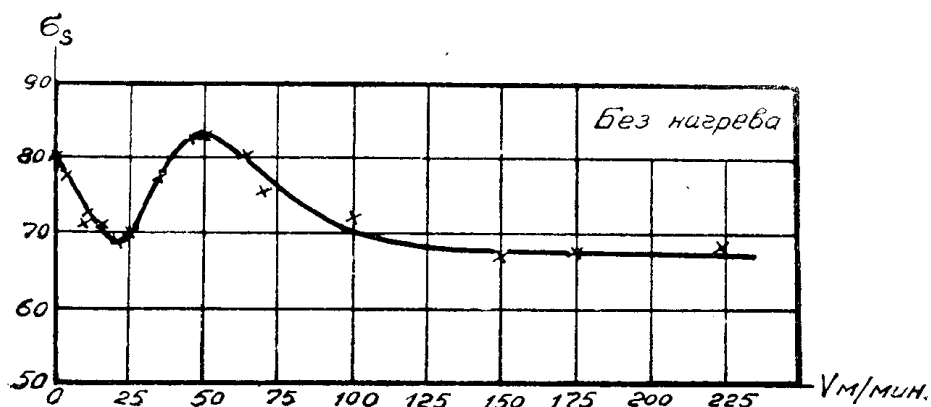
Фиг. 15

Заметим, что сила резания P_z также, как и усадка, с повышением температуры предварительного искусственного нагрева T° и температуры резания T_v неизменно снижается.



Фиг. 16

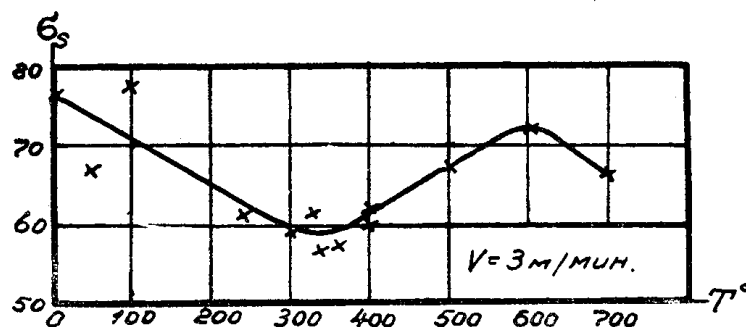
То же наблюдается и с изменением напряжения в плоскости сдвигов. Из графиков (фиг. 17, 18) следует, что максимальные значения напряжения σ_s соответствуют скорости резания $V=50$ м/мин и температуре предварительного подогрева $T=550-600^\circ$, то есть при одинаковых температурах на передней грани резца напряжение в плоскости сдвигов при срезе стружки без предварительного подогрева материала в зоне резания больше, чем с подогревом.



Фиг. 17

Чем же объясняется неравенство сил резания и напряжения в плоскости сдвигов при равенстве усадок и коэффициентов трения, если температуры в том и другом случае на передней грани одинаковы?

В первом случае, т. е. при искусственном подогреве металла в зоне резания, работа, затрачиваемая на перевод механической энергии в тепловую, обеспечивается от постороннего источника за пределами экспериментальной установки.



Фиг. 18

Во втором случае, чтобы обеспечить соответствующую температуру нагрева металла в зоне резания, необходимо совершить дополнительную механическую работу. Исходя из этого, можно написать равенство:

$$A_n = (A_v - A_T) - A_n, \quad (2)$$

где A_n — работа, затраченная за пределами экспериментальной установки на перевод электрической энергии в тепловую, A_v — работа, затраченная на перевод механической энергии в тепловую при снятии стружки без предварительного подогрева металлов в зоне резания, A_T — работа, затраченная на перевод механической энергии в тепловую при снятии стружки с предварительно подогретой болванки в зоне резания, A_n — работа, связанная с потерями на пути от источника электрической энергии до нагревательного

прибора (индуктора) включительно. Следовательно, для того чтобы довести температуру в зоне резания до температуры предварительного подогрева, мы должны были бы, основываясь на законе сохранения энергии, затратить дополнительную работу на перевод механической энергии в тепловую, причем по своей величине эта работа должна соответствовать той работе (Al), которая была затрачена на перевод электрической энергии в тепловую при предварительном подогреве металла в зоне резания.

Выводы

Сущность скоростного резания мы объясняем:

1. Значительным снижением абсолютного значения равнодействующей силы R и изменением ее направления под действием коэффициента трения μ , а также более низким значением нормальной силы, которая воздействует на силу R в сторону ее снижения.

В результате сдвигов элементов образующейся стружки относительно основного металла в момент формирования ее происходит интенсивный нагрев. Стружка между плоскостью сдвигов и плоскостью, параллельной ей и проходящей через конечное место контакта стружки с резцом, сохраняет в своей массе температуру, приобретенную в зоне резания. Но вместе с тем стружка, перемещаясь по передней грани, дополнительно нагревается на незначительную глубину и, таким образом, между стружкой и резцом создается очень тонкая прослойка из более размягченного металла стружки.

Наличие такой прослойки между стружкой и резцом изменяет через коэффициент трения направление равнодействующей силы R , усаживающей стружку.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что в зоне резания изменяются механические свойства металла стружки в момент ее формирования. А на передней грани создаются условия, определяющие величину и направление равнодействующей силы R , усаживающей стружку и определяющей положение плоскости сдвигов относительно плоскости резания.

2. Красностойкостью и износоустойчивостью твердого сплава режущего инструмента.

3. С повышением скорости резания выше $V = 50$ м/мин или температуры предварительного нагрева металла в зоне резания выше $T = 550-600^\circ$ все параметры резания: усадка стружки по длине ζ_l , ширине среза ζ_a , сила резания P_z , коэффициент трения μ , напряжение плоскости сдвигов σ_s — резко снижаются.

В заключение можно сказать, что борьба за дальнейшее развитие скоростного резания есть борьба:

а) за снижение коэффициента трения между стружкой и передней гранью резца,

б) за снижение нормальной силы N , действующей на переднюю грань резца,

в) за создание новых марок сплавов для режущих инструментов, обладающих более высокой красностойкостью,

г) за улучшение конструкции и геометрии режущих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдштейн Э. М. К вопросу о сущности резания стали. Станки и инструмент, № 12, 1950.
2. Розенберг А. М. Станки и инструмент, № 10, 1949.
3. Розенберг А. М. Станки и инструмент, № 9, 1951.