

812

812

621.9

K 82

В. А. КРИВОУХОВ

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
МЕТАЛЛА
В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ**

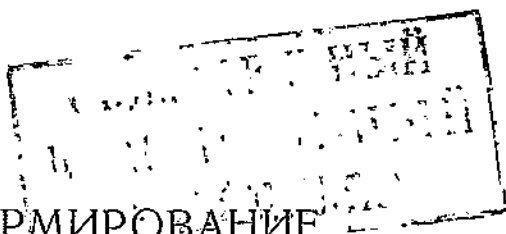
МАШГИЗ
1945

ЗАМЕЧАННЫЕ ОПЕЧАТКИ

<i>Стр.</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>	<i>По чьей вине</i>
18	фиг. 32	$\gamma = 75^\circ$	$\gamma = 7,5^\circ$	автора
88	7 снизу	$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T$	$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T$	издательства
85	9 снизу	$\operatorname{tg} \pi_k$	$\operatorname{tg} \beta_k$	"
87	1 снизу	$\frac{1}{e^{n\Gamma}}$	$\frac{1}{e^{-n\Gamma}}$	"

К р и в о у х о в В. А. Деформирование поверхностных слоев металла в процессе резания. Зап. 1017

Докт. техн. наук, профессор
В. А. КРИВОУХОВ



ДЕФОРМИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА
В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

1282050

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

НКТМ СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1945 Сverdловск

І. ВВЕДЕНИЕ

Внешние явления, наблюдаемые при обработке металлов резанием, а именно — усилия, действующие на инструмент, изделие и станок, характер изменения этих усилий, поведение инструмента в период его работы и т. д., происходят в результате процесса деформации, который возникает при резании металлов. Указанные внешние явления суть производные этого процесса. Поэтому основная проблема, подлежащая разрешению в области резания металлов, — это установление основных закономерностей, которым подчиняется процесс деформации.

Чтобы установить основные закономерности процесса деформирования при резании металлов, необходимо вскрыть механизм этого процесса, выявить и изучить сущность его, а затем уже производить и наблюдение и измерение тех параметров, которые характеризуют изменения этого процесса. Для разрешения же этой последней задачи следует иметь как-то зафиксированный процесс резания в определенной совершающейся последовательности и рассматривать его в динамике при помощи современных высокочастотных киноаппаратов. В предлагаемой работе¹ и была использована подобная аппаратура для макро- и микросъемов процесса резания как пластичных, так и хрупких металлов. Такая попытка у нас делается впервые. За границей подобные попытки имели место², но, к сожалению, от этих заграничных работ мы имели результаты только в виде нескольких фотографий с отдельных кадров киноленты.

В продолжение почти столетнего изучения процесса резания металлов было проделано большое количество экспериментальных работ, которые можно разбить на две группы. К первой группе относятся работы, имевшие целью получить только эмпирические зависимости между геометрическими параметрами стружки, с одной стороны, и скоростью резания, усилиями и геометрией инструмента, с другой стороны. Физическая сущность процесса резания в этих работах или совершенно не затрагивалась или этому вопросу уделялось весьма скромное внимание. Большая экспериментальная работа, проделанная Комиссией по резанию металлов при Бюро технических нормативов Наркомата станкостроения, в период с 1936 по 1944 г., на основе которой

¹ Это предложение автору было сделано директором Института машиноведения АН СССР академиком Е. А. Чудаковым.

² Клопшток (Германия), Шверд (Германия), Эрнст (Америка), Садаму Ишии (Япония).

и созданы нормативы по режимам резания для всех видов металлорежущих инструментов, полностью относится к первой группе.

Упомянутые работы, преследовавшие конкретные задачи и цели и отнесенные нами к первой группе, являлись в свое время безусловно необходимыми, так как необходим был практический материал для выбора марок инструментальных сталей, конструирования и эксплуатации инструментов, конструирования и эксплуатации металлорежущих станков и, наконец, для проектирования и нормирования технологических процессов по холодной обработке металлов резанием.

Ко второй группе работ можно отнести те, которые преследовали цель вскрыть физическую сущность явлений, происходящих в процессе резания металлов; подобные работы были проделаны и у нас и за границей. Характерной чертой работ второй группы является то, что в подавляющем большинстве своем они, во-первых, рассматривали отдельные явления без взаимосвязи с другими, а во-вторых, и то, что в них изучали почти исключительно только качественную сторону вопроса, не касаясь количественного соотношения.

Если на определенном этапе могла вполне находить себе оправдание первая группа работ, то в дальнейшем должна все больше и больше развиваться вторая группа работ, дающая физическое обоснование процессу резания металлов как с качественной стороны, так и с количественной. В противном случае получится эмпиризм перманентный, по существу приводящий к большому расходованию средств и не дающий перспективного развития науки.

В предлагаемой здесь работе ставились следующие задачи:

1. Рассмотрение механизма явлений процесса резания как пластичных, так и хрупких (малопластичных) металлов, при использовании для этого высокочастотных киноаппаратов.

2. Определение характера деформаций, имеющих место в процессе резания металлов, в зависимости от различного рода факторов.

3. Используя аналогию процессов резания и пластическое сжатие, а также данные физики твердого тела, теории пластических деформаций, теории упругости и пр., вывести теоретическим путем основные закономерности, которым подчиняется деформация металлов в процессе резания, и дать ряду явлений не только качественную, но и количественную оценку.

Последняя задача была облегчена тем, что в 1941 г. у нас появились новые работы в области пластических деформаций, которые вскрыли основной закон пластического сжатия, играющий такую же примерно роль в теории пластических деформаций, какую играет закон Гука в теории упругости¹.

Экспериментальная часть данной работы была проделана автором в Институте машиноведения АН СССР, а также в ла-

¹ Подразумеваются работы М. А. Большакиной, напечатанные в т. II, Физика твердого тела, В. Д. Кузнецова, а также сообщения, которые делал В. Д. Кузнецов в 1940 г. на заседаниях Комиссии по резанию металлов.

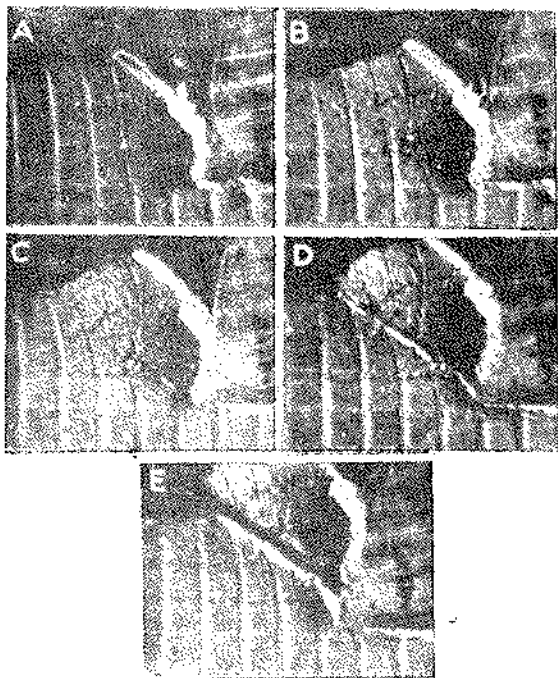
бораториях резания Московского станкоинструментального института и Московского авиационного института.

Изучая многие сотни метров кинолент, полученных при макро- и микросъемах процесса резания металлов, автор дал объяснение ряду явлений, руководствуясь своим многолетним экспериментаторским опытом в области обработки металлов резанием. Возможно, что другие специалисты, рассматривая те же кинокадры, вскрыют и иные явления и ряду из них дадут другие объяснения.

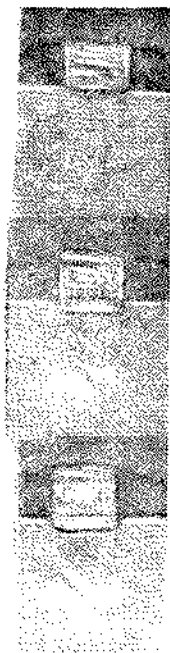
II. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О ЯВЛЕНИЯХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

1. АНАЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПЛАСТИЧЕСКОГО ОБЪЯТИЯ¹

Обработка металлов на металлорежущих станках сводится к тому, что с заготовки срезается вполне определенный ее слой



Фиг. 1.



Фиг. 2.

до размеров, указанных на чертеже, с соблюдением качества обработанной поверхности согласно заданным техническим условиям. Зафиксированные на киноленте при помощи высокочастотной камеры отдельные моменты процессов резания и вдавливания пуансона показаны на фиг. 1 и 2.

¹ Впервые эта мысль была высказана В. Д. Кузнецовым.

Слой металла, подлежащий срезанию, подвергается сжатию, и в этом случае, следовательно, должны иметь место те же деформации, которые сопровождали бы образец, подвергнутый обычному испытанию на сжатие, а именно: вначале имеют место упругие деформации, затем появляется текучесть металла, далее имеет место пластическая деформация и, наконец, происходит разрушение образца.

Отличие резания от обычного сжатия образца заключается в том, что срезаемый слой металла связан с остальной массой заготовки и это взаимодействие удаляемого и остающегося слоя усложняет происходящий процесс деформации, но несколько не изменяет принципиальных оснований, имеющих место при сжатии образца. Резание производится инструментом вполне определенной формы, имеющим для каждого частного случая оптимальную геометрию. Согласно фиг. 1, резец представляет собой клин. Эта форма, лежащая в основе всех без исключения металлорежущих инструментов, выработанная столетиями, многократно проверенная экспериментами, предназначается для того, чтобы уменьшить работу пластических деформаций в срезаемом слое, уменьшить внешнюю деформацию отделяемого слоя, уменьшить внешнее трение на передней и задней гранях инструмента, тем самым удлиняя срок службы его, и, наконец, зачищать оставшийся слой, т. е. обработанную поверхность.

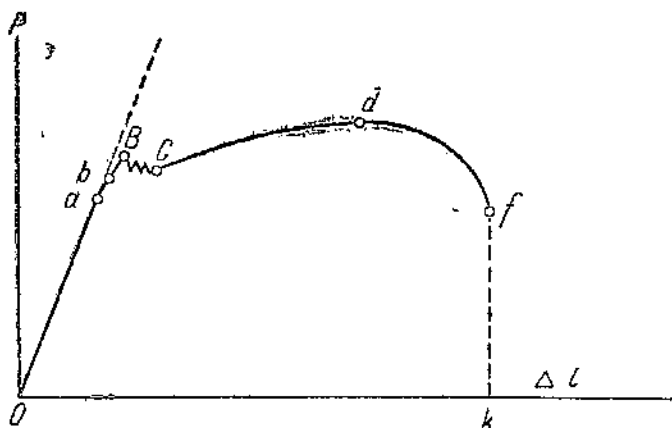
Остающийся слой, т. е. слой под обработанной поверхностью, вследствие взаимодействия со срезаемым слоем должен претерпевать деформирование сначала упругое, а затем и пластическое.

Указанные выше явления и отличают резание образца от обычного испытания его на сжатие. Следовательно, если обычное испытание образца на сжатие назвать свободным сжатием, то резание образца может быть названо несвободным сжатием. Теория резания металлов может быть создана только в том случае, если будут найдены предварительно законы этого несвободного сжатия. Если прежде обрабатываемостью металлов называли способность их поддаваться резанию, то с точки зрения приведенных выше сопоставлений обрабатываемостью металлов может быть названа сопротивляемость их несвободному сжатию.

Изложенная выше аналогия процессов резания и несвободного сжатия будет очевидной, если вскрыть механизм явлений, имеющих место при обработке металлов резанием. Всего очевиднее это будет, если процесс резания зафиксировать на киноплёнке при помощи высокочастотной кинокамеры, что нами проведено и в дальнейшем будет изложено.

Повидимому, в зависимости от свойств обрабатываемого металла, от его пластичности работа деформаций будет состоять или главным образом из работы пластических деформаций (при обработке пластических металлов), или же из работы упругих деформаций (при обработке хрупких металлов). Все существующие материалы обладают той или иной степенью пластичности. Провести резкую границу между хрупкими и пластичными те-

лами совершенно невозможно, так как одно и то же тело в зависимости от вида приложенной действующей силы может проявить себя и как хрупкое и как пластичное¹. Поэтому одни металлы будут обладать свойством пластичности (которое сводится к их способности получать остаточные деформации) в боль-



Фиг. 3.

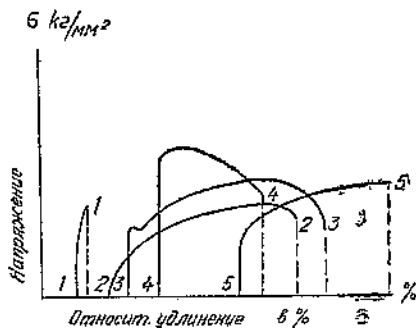
шей степени, другие — в меньшей степени, что в свою очередь будет всецело отражаться на протекании процесса резания.

Деформации, имеющие место в мягкой (дозвтектоидной) отожженной¹ стали, подвергнутой растяжению на разрывной машине (фиг. 3), представляются в следующем виде: в точке *a* заканчивается предел пропорциональности, в точке *b* — предел упругости, в точке *B* — предел текучести.

Вся площадь *OBCdfk* представляет собой, как известно, работу деформаций как упругих, так и пластических (остающихся), причем работа упругих деформаций составляет лишь незначительную часть всей работы.

Если же привести сопоставление кривых растяжения нескольких разнородных металлов, например чугуна 1, отожженной меди 2,

отожженной мягкой стали 3, холоднотянутой стали 4 и бронзы 5 (фиг. 4), то в зависимости от свойств обрабатываемого металла соотношение работ упругих деформаций и пластических в каждом отдельном случае будет различным². Так, например, при растяжении образца из отожженной меди почти полностью имеют



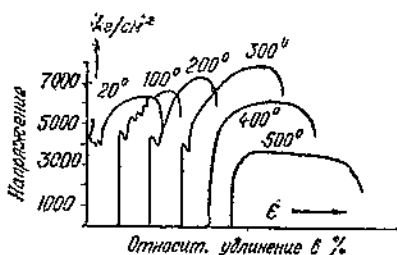
Фиг. 4.

¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, стр. 18, 1941.

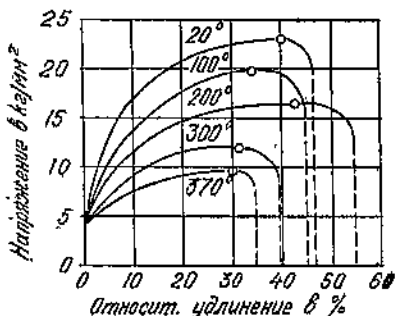
² Шапольников, Основы механических испытаний металлов, 1938.

место только пластические деформации. На фиг. 5 представлены диаграммы растяжения стали в зависимости от температуры, а на фиг. 6 — для меди. Отсюда можно видеть изменяющееся соотношение в работах упругих и пластических деформаций по мере изменения температуры.

Величина зерна изменяет механические свойства металла, а именно — с уменьшением величины зерна увеличиваются сопротивление.



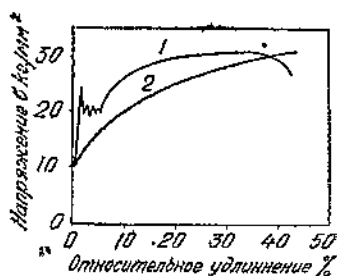
Фиг. 5.



Фиг. 6.

мелкозернистой 1 и крупнозернистой 2 стали. Здесь наблюдается большое изменение в их механических свойствах и в особенности в начальной стадии растяжения.

Причиной¹ образования пластических (остаточных) деформаций является напряжение сдвига, вызывающее скольжение одной части кристаллов металла относительно другой. Сдвиги происходят по тем направлениям, по которым действуют наибольшие сдвигающие напряжения. Но в процессе сдвига имеют место и сложные перемещения самих кристаллов, например, поворачивание кристаллов, разделение кристаллов на две части с перестройкой остальных систем разделившегося кристалла (двойникование). Предполагается, что наибольшее сопротивление сдвигу встречается у границ зерен благодаря пограничному состоянию между зёрнами и изменению кристаллографической ориентировки их.

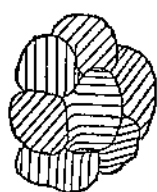


Фиг. 7.

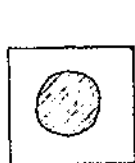
Сначала деформируются те кристаллы, у которых плоскости скольжения ориентированы наиболее благоприятно по отношению к действующей силе. Но в соседних зёрнах плоскости скольжения могут быть расположены иначе, поэтому деформа-

¹ З а к с, Практическое металловедение; На д а н, Пластичность; З и б е л ь и Г ю н е, Исследование процессов деформации при обработке давлением; Г у б к и н, Пластическая деформация металлов; Ш а п о ш н и к о в, Основы механических испытаний металлов; К у з н е ц о в, Физика твердого тела, т. II; О д и н г, Прочность металлов.

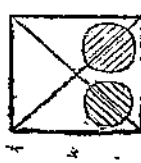
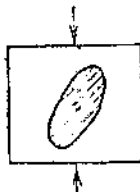
ция начинает затрудняться. На фиг. 8 показаны различные ориентации решеток в зернах поликристалла; штриховкой показано направление плоскостей скольжения в отдельных зернах. Вследствие этого каждое зерно может оказаться в сложном напряженном состоянии, затрудняющем сдвиг и вызывающем большое



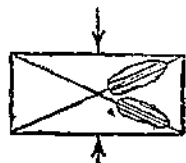
Фиг. 8.



Фиг. 9.

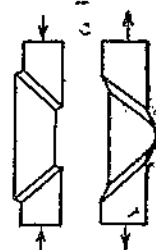


Фиг. 10.



сопротивление деформации. Металлы могут обладать одной или несколькими возможными плоскостями скольжения, в зависимости от системы. Например, металлы гексагональной системы обладают одной плоскостью скольжения; металлы кубической системы — несколькими плоскостями скольжения. В алюминии несколько плоскостей скольжения, а следовательно, деформация зерна может осуществляться в нескольких направлениях и разрыв происходит по зернам.

На фиг. 9 показаны изменения формы кристалла при деформации сжатия. Длинное зерно, получившее указанную форму, под влиянием растяжения может распадаться на два и, таким образом, происходит измельчение структуры. Кроме изменения формы и размеров зерна меняется также и их взаимное расположение, что указано схематически на фиг. 10.



а Фиг. 11.

Направление сдвигов можно наблюдать на отполированном образце, подвергнув его растяжению или сжатию. В этом случае, как только достигается предел текучести, на поверхности образца появляется узор линий (фиг. 11а, 11б), образующих с направлением действия силы угол примерно в 45° . Эти линии, носящие название линий Людерса, являются следами перемещений отдельных групп кристаллитов друг относительно друга и их направление совпадает с траекторией наибольших сдвигающих напряжений. В курсах сопротивления материалов¹ доказывается, что наибольшие касательные или скалывающие напряже-

¹ С. П. Тимошенко, Сопротивление материалов, ч. I, 1934.

ния действуют в плоскости, расположенной под углом $\varphi = 45^\circ$ (фиг. 12). Так как площадь сечения pq равна $\frac{F}{\cos \varphi}$, то напряжение в этом сечении будет

$$\tau_{\varphi} = \frac{P \cos \varphi}{\frac{F}{\cos \varphi}} = \sigma \cdot \cos \varphi,$$

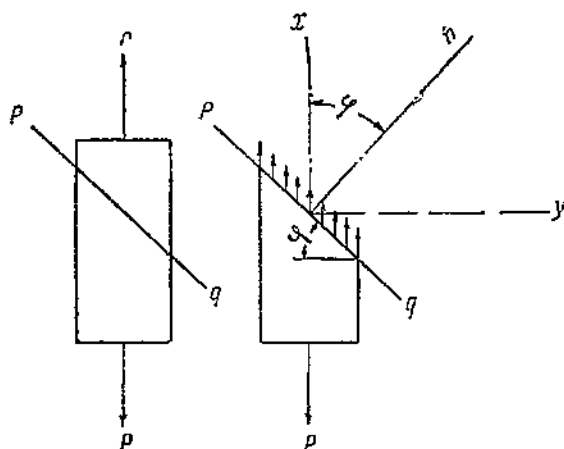
где $\sigma = \frac{P}{F}$.

Нормальное напряжение σ_n будет

$$\sigma_n = \sigma_{\varphi} \cos \varphi = \sigma \cdot \cos^2 \varphi = \sigma \cdot \left(\frac{1 + \cos 2\varphi}{2} \right).$$

Тангенциальное же составляющее выразится

$$\tau = \sigma \cdot \sin \varphi = \sigma \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = \frac{\sigma \cdot \sin 2\varphi}{2}.$$



Фиг. 12.

Таким образом при $\varphi = 45^\circ$ получим¹:

$$\tau_{\max} = 0,5 \cdot \sigma. \quad (1)$$

Однако следует заметить, что приведенные выводы и соображения достаточно хорошо согласуются при испытании на растяжение и сжатие пластичных металлов. Что же касается хрупких металлов, то в практике наблюдается заметное отклонение (линий Людерса) от направления

максимальных скалывающих напряжений. Рассматривая и анализируя существующие теории предельных напряжений, можно прийти к выводу, „что в настоящее время нет еще достаточно общей и хорошо удовлетворяющей опыту теории предельных состояний“².

Пластическое деформирование изменяет свойства металлов. Различные механические свойства металлов меняются по-разному, и не представляется возможным по величине изменения одного из них численно выразить изменения и других свойств³. Например, по величине упрочнения, которое получил материал, не представляется возможным выразить числовой величиной изменение других механических свойств. Основное и главное, что приобретает материал в результате пластического деформирования — это упрочнение, повышение твердости и появле-

¹ Эти выводы следуют из теории Кулона.

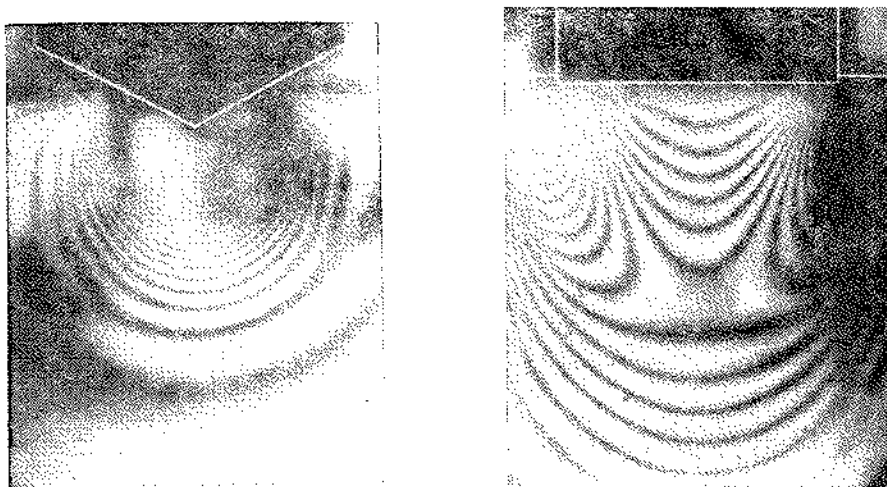
² В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, 1941.

³ Закас, Практическое металловедение.

ние хрупкости. На основании аналогии, которая проводилась нами между резанием металлов и несвободным сжатием, следует, что обработанная поверхность изменяет свои физические свойства благодаря произведенному процессу резания и это во многих случаях не безразлично для качества и прочности машин. Следует напомнить, что „современная теория твердого тела далека от того состояния, когда можно не только объяснить явления, но и предсказать новые. Она, например, почти бессильна в объяснении пластической деформации, которая заключается в скольжении одних слоев относительно других по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям“.¹

2. ПЛОСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Оптический метод исследования напряжений, широко применяемый в технике, дает возможность нарисовать картину упру-



a

Фиг. 13.

b

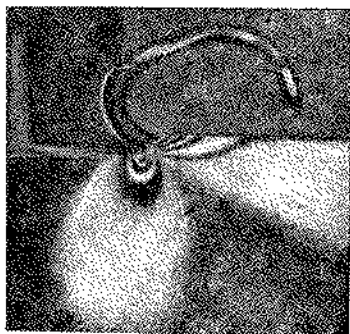
гих деформаций, возникающих в процессе резания прозрачных изотропных тел (целлулоида, бакелита и др.). Как известно, эти материалы становятся двоякопреломляющими, и если пучок поляризованного света проходит через прозрачную модель, находящуюся в напряженном состоянии, то получается окрашенное изображение, по которому находят распределение этих напряжений. Оптический метод применяют к разрешению плоских задач.

На фиг. 13а и 13б показаны упругие деформации, имеющие различный характер в зависимости от формы и периметра сжимающего тела. На фиг. 14 показаны изохромы, имеющие место

¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, 1941.

при строгании. На основании исследований деформаций в процессе резания¹ можно представить следующую картину: очевидно, что впереди резца в срезаемом слое имеют место деформации сжатия, а позади резца — деформации растяжения.

Распределение упругих напряжений сжатия и растяжения показано на фиг. 15. Так, например, при сжатии наибольшие напряжения доходят до размеров $0,8 \text{ кг/мм}^2$.



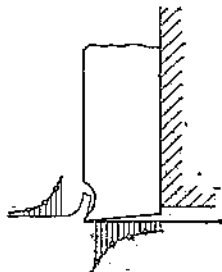
Фиг. 14.

До указанных размеров доходит также напряжение растяжения. Напряжения имеют затухающий характер. Повидимому, упругие деформации, имеющие место в верхних слоях обрабатываемой поверхности, на некоторые мгновения соответствующие продолжительности их действия, будут вызывать искажения обрабатываемой поверхности.

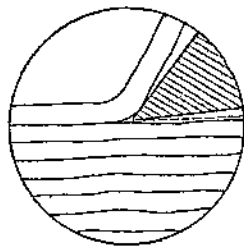
На фиг. 16 показано искажение линий, параллельных плоскости строгания. Эти явления имеют место по-

тому, что обрабатываемый материал во время работы инструмента получает местный подъем или понижение, которые исчезают при дальнейшем продвижении резца. Таким образом материал под обработанной поверхностью в периоды работы упругих деформаций растяжения как бы тянется за резцом. Как величина, так и направление упругих деформаций изменяется в зависимости от геометрии резца и величины срезаемого слоя.

На фиг. 17 и 18 показаны² деформации хорошо заточенным резцом и резцом, слегка притупленным. В стружке, снимаемой притупленным резцом (фиг. 18), наблюдается темное пятно, периодически повторяющееся, что указывает на наличие в ней пластических деформаций.



Фиг. 15.



Фиг. 16.

Влияние геометрии³ указано на фиг. 19 и 20.

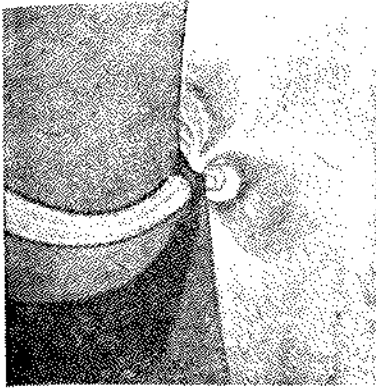
Ранее сообщалось нами, что форма клина лежит в основе всякого металлорежущего инструмента; поэтому указанное выше явление сопутствует процессу резания любым инструментом, с той только разницей, что специфика резания будет отображаться и на диаграммах деформаций. Для иллюстраций этого положения на фиг. 21 показаны деформации при обработке фрезой⁴.

¹ Кокер и Файлон, Оптический метод исследования напряжений.

² Кокер и Файлон, Оптический метод исследования напряжений.

³ Окоши и Фукуи, Research on the cutting Action on Planing Tool by Microkinematographic, Токио 1931.

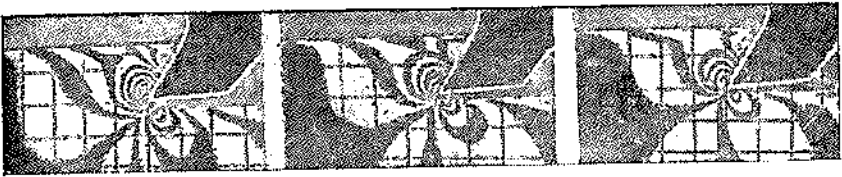
⁴ Кокер и Файлон, Оптический метод исследования напряжений.



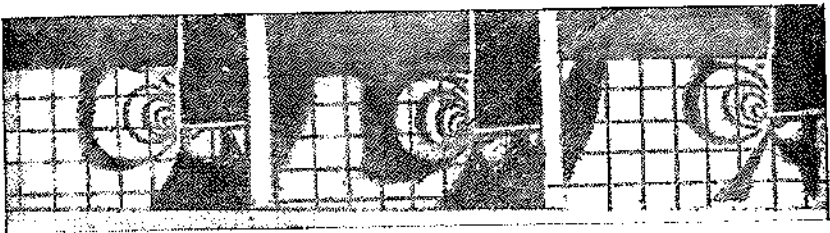
Фиг. 17.



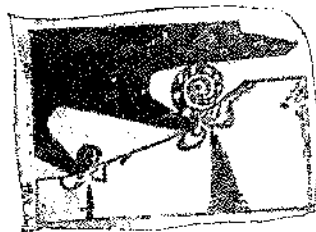
Фиг. 18.



Фиг. 19.



Фиг. 20.

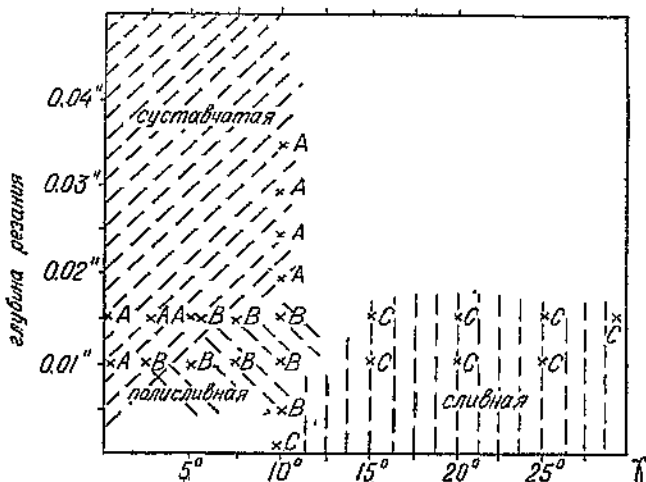


Фиг. 21.

3. ВНЕШНИЙ ВИД СТРУЖЕК И СТРУКТУРА ДЕФОРМИРОВАННЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА

По внешнему виду получающейся стружки можно с качественной стороны подходить к оценке явлений, связанных с процессом резания. Как известно, при обработке пластичных металлов различают три типа стружек: 1) элементную стружку, получающуюся при обработке с малыми скоростями резания, 2) суставчатую—при обработке со средними скоростями и 3) сливную, получающуюся при больших скоростях резания.

Но это не значит, что в процессе резания пластичных металлов имеют место только три типа стружек. Если обрабатывать



Фиг. 22.

пластичный металл с непрерывно повышающейся скоростью резания, то переход стружек от элементных к сливным будет происходить непрерывно, причем здесь имеют место также промежуточные формы стружек, скажем полусуставчатые, полусливные и т. д. Достаточно напомнить известную диаграмму (фиг. 22), показывающую изменение формы стружек в зависимости от глубины резания t и переднего угла γ и подтверждающую высказанные выше соображения¹.

При обработке хрупких металлов получается стружка надлома, состоящая из отдельных элементов, скалывающихся с обрабатываемого металла².

Приведенная номенклатура стружек, принятая в нашей и заграничной технической литературе, не является достаточно строгой и нуждается в существенных коррективах. Следует также указать, что внешняя форма стружек изменяется в процессе резания, поскольку изменяется с течением времени работы форма передней грани резца. Внешний вид процесса обработки³

¹ Розенгейн и Стэрней, Proceedings of the Inst. of Mech. Eng. 1925.

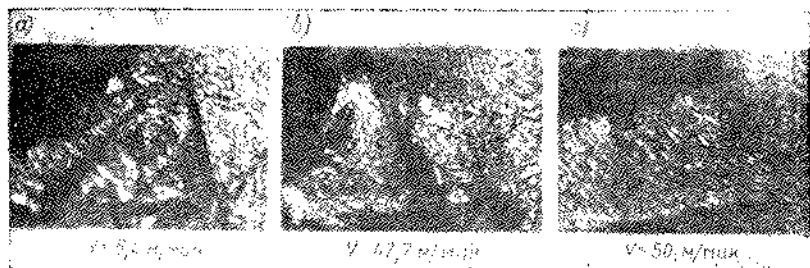
² Тиме, Сопротивление металлов и дерева резанию, 1865.

³ Клопшток, Untersuchung der Dreharbeit.

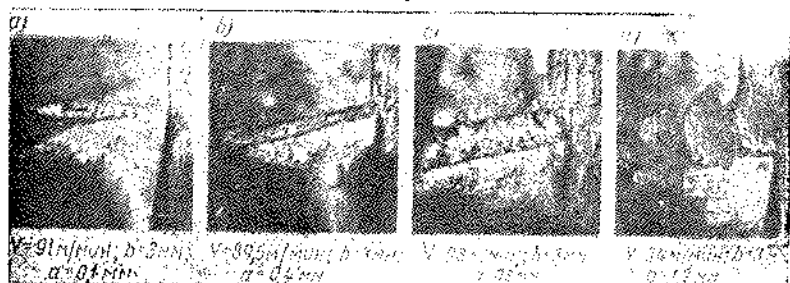
представлен на фиг. 23, где отдельные элементы стружки не теряют окончательной связи между собой, образуя в конечном итоге суставчатую стружку. Беспрепятственный переход одного типа стружек в другой¹ показан на фиг. 24 при обработке углеродистой стали $\sigma_b = 41 \text{ кг/мм}^2$ при толщине стружки $a = 1,33 \text{ мм}$ и ширине стружки $b = 4 \text{ мм}$ со скоростями резания $v = 6,4 \text{ м/мин}$, $v = 42,7 \text{ м/мин}$ и $v = 50 \text{ м/мин}$. Здесь стружка суставчатая, при возрастании скорости резания стремится переходить в сливную стружку. То же показано на фиг. 25 а, б, с, д при обработке той же углеродистой стали при одной и той же ширине стружки $b = 3 \text{ мм}$ и скорости резания $v = 90 \text{ м/мин}$, но с разной толщиной $a = 0,1 \text{ мм}$, $a = 0,4 \text{ мм}$, $a = 0,8 \text{ мм}$ и $a = 1,2 \text{ мм}$. При этом сливная стружка при обработке углеро-



Фиг. 23.



Фиг. 24.

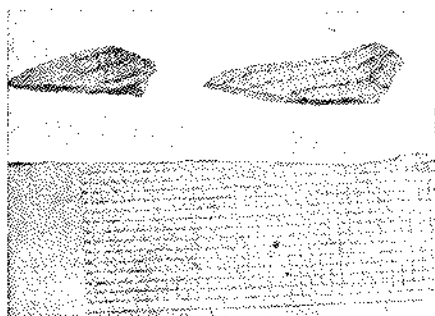


Фиг. 25.

¹ Шверд, „Stahl und Eisen“ №16, 1931.

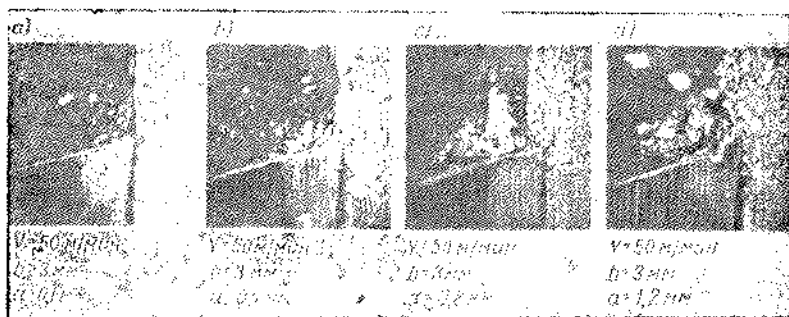
дистой стали $\sigma_b = 70,6 \text{ кг/мм}^2$ при малой скорости резания показана на фиг. 26.

Только одно внешнее сопоставление получающихся типов стружек уже заставляет предполагать о различии в деформациях, имеющих место в этих типах стружек, а следовательно, и о различии получающихся обработанных поверхностей. Это



Фиг. 26.

различие в деформациях полностью будет отображаться на величине усилий при резании, на характере изменения усилий, а также на колебании упругой системы, участвующей в процессе резания. При обработке хрупкого металла — чугуна¹ получается картина, показанная на фиг. 27 а, б, с, д. Чугун, имея твердость $H_B = 198 \text{ кг/мм}^2$, обрабатывался со скоростью резания $v = 50 \text{ м/мин}$ при ширине стружки $b = 3 \text{ мм}$, но с разной толщиной: $a = 0,1 \text{ мм}$, $a = 0,4 \text{ мм}$, $a = 0,8 \text{ мм}$ и $a = 1,2 \text{ мм}$. Здесь ясно видно, что чугун при обработке резанием дробится на отдельные кусочки, имеющие малые размеры при небольшой стружке (срезаемом слое) и большие размеры — при большем сечении стружки. Резкое различие, получающееся при обработке пластичных и хрупких металлов, вытекает, следовательно, из резкого разли-



Фиг. 27.

чия деформаций, имеющих место при обработке этих видов металлов.

Ранее указывалось на влияние геометрии резца (переднего угла) на тип получающихся стружек. На фиг. 28 а, б, с, д, е, ф, г, и показана обработка углеродистой стали¹ $\sigma_b = 41 \text{ кг/мм}^2$ с по-

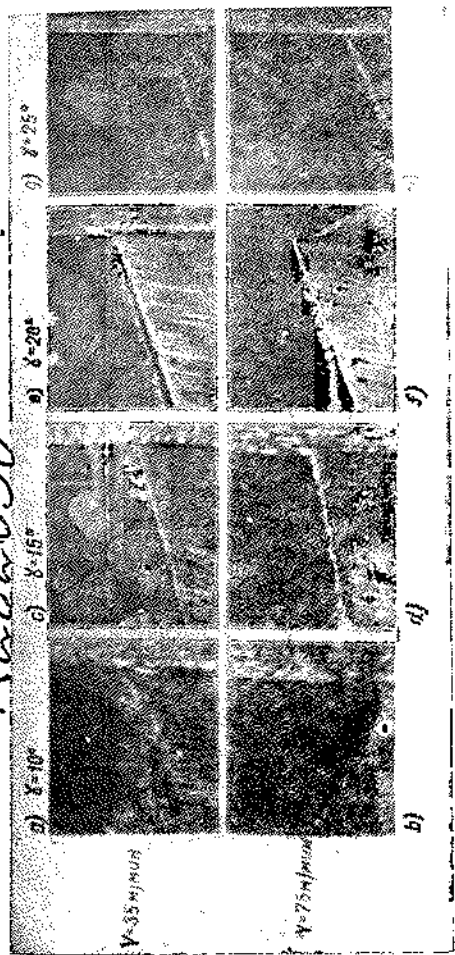
¹ Шверд, „Stahl und Eisen“ № 16, 1931.

1282050

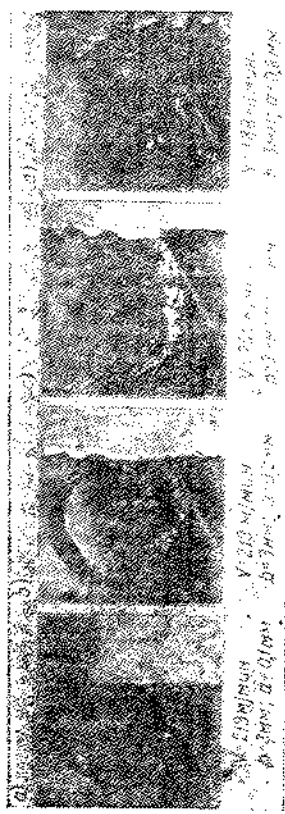
СМО
v =
3
как
ных
набл
Г
няю
2

стоянным сечением стружки, но при разных скоростях резания и разных передних углах реза. При сопоставлении фиг. 29 а и 29 б при обработке с одним и тем же передним углом $\gamma = 10^\circ$, но с разными скоростями резания $v = 35$ м/мин и $v = 75$ м/мин наблюдается резкая разница в получающихся стружках. По мере увеличения переднего угла (фиг. 28 а, б, с, д, е, ф, г, h) эта разница все больше и больше сглаживается и при $\gamma = 25^\circ$ внешний вид получающийся стружки разницы почти не имеет, не-

1282050



Фиг. 28.



Фиг. 29.

смотря на большое различие в скоростях резания ($v = 35$ м/мин и $v = 75$ м/мин).

Это обстоятельство заставляет предполагать, что имеются какие-то оптимальные передние углы, начиная с которых заметных различий в остаточных деформациях срезаемого слоя не наблюдается.

Приведенные выше соображения о типах стружек распространяются также на цветные металлы. На фиг. 29 а, б, с, д показаны

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

типы стружек, полученные при обработке алюминия¹ при следующих условиях: $b = 3 \text{ мм} = \text{const}$, $v = 200-180 \text{ м/мин}$ и $a = 0,1 \text{ мм}$, $a = 0,2 \text{ мм}$, $a = 0,4 \text{ мм}$ и $a = 0,8 \text{ мм}$.

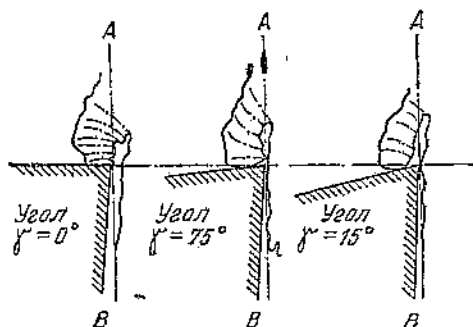
Внешняя форма рассмотренных стружек позволяет лишь предполагать о тех деформациях, которые имеют место в срезаемом слое. Рассмотрение микроструктуры последовательно срезаемых элементов слоя дает уже представление о самих деформациях. Другими словами, с качественной стороны (но не с количественной) о происходящих деформациях можно судить по характеру изменения структуры. На фиг. 30 представлены микрофотографии при последовательном положении резца в случае обработки углеродистой стали². Наряду с изменением структуры наблюдается образование опережающей



Фиг. 30.



Фиг. 31.



Фиг. 32.

щей трещины. На фиг. 31 представлена та же самая картина, причем опережающая трещина резко выражена³. Характер распространения трещины в зависимости от угла резания показан на фиг. 32.

В дальнейшем при рассмотрении наростов будут представлены различного рода фотоснимки с отдельных положений резца в процессе резания, но и из приведенных можно сделать ряд за-

¹ Шверд, „Stahl und Eisen“ № 16, 1931.

² Данные Садаму И шин, см. „W. T.“ № 3—4, 1932.

³ Розенгейн и Стэрней, „Proceedings of the Inst. of Mech. Eng.“ Лондон, 1925.

ключений, а именно: в срезаемом слое видоизменяется структура на всю толщину слоя. При сжатии элементов стружки имеет место „опережающая трещина“, которая в зависимости от обрабатываемого металла, геометрии инструмента и других факторов резания будет, очевидно, менять свой характер. Надо полагать, что наибольшая трещина получается при образовании элементной стружки, меньшая — при суставчатой и еще меньшая — при сливной стружке. Эти соображения имеют силу при обработке пластичных металлов. Что же касается хрупких металлов, то имеющиеся исследования не дают возможности сделать прямых указаний на наличие опережающих трещин, и лишь соображения общего характера позволяют сказать, что при обработке хрупких металлов трещина мгновенно распространяется на всю длину срезаемого элемента.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КИНОКАМЕРЫ

Общие соображения

Одна из основных задач данной работы заключалась в том, чтобы наглядным образом показать динамику процесса резания металлов, дав, тем самым, возможность рассмотреть явления, сопровождающие процесс резания. Большое разнообразие металлов, применяемых на практике при обработке резанием, предиктовало выбор следующих их марок: сталь 1045, серый чугун и железо Армо.

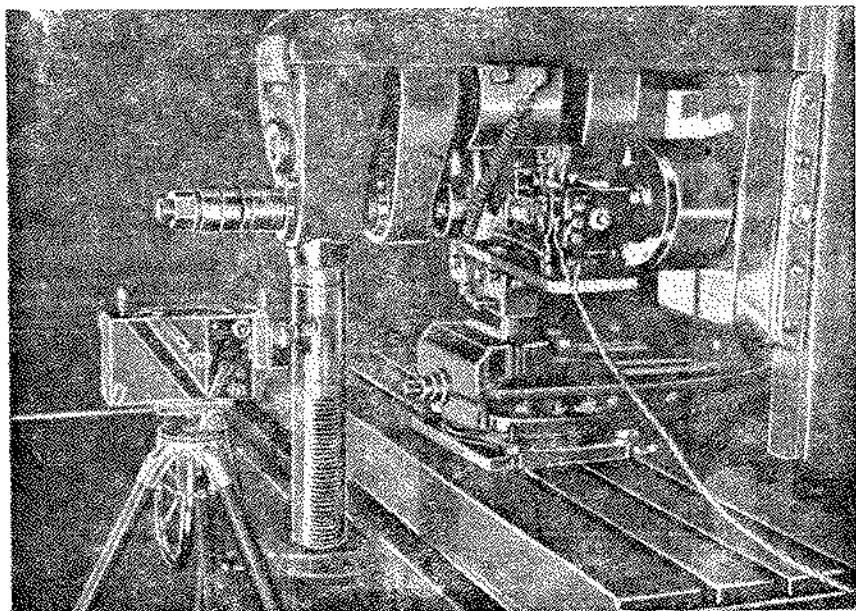
Внешнюю сторону процесса и те явления, которые с внешней стороны достаточно отчетливо выявляются, автор зафиксировал так называемой макрозасъемкой, т. е. не применяя особых увеличительных устройств, в виде микроскопов и пр. Таким методом был заснят процесс обработки стали 1045 и серого чугуна.

Чтобы глубже заглянуть в происходящие в процессе резания явления, автор произвел микрозасъемки при различных скоростях обработки стали 1045, серого чугуна и железа Армо, при увеличении через микроскоп Лейтца от 60 до 360 раз. Так как подобного рода засъемки в области изучения процесса резания металлов были произведены у нас впервые, то потребовалось затратить много времени и труда, чтобы добиться таких кинокадров, которые можно было бы изучить. Макрозасъемки и микрозасъемки дали возможность установить характер деформаций в срезаемом слое и обработанной поверхности, а также проследить характер распространения деформаций и величину проникновения их в обработанную поверхность. Засъемы дали возможность рассмотреть последовательно совершающийся процесс деформации, явления, связанные с образованием опережающей трещины и микротрещин, образование элементной стружки, стружки надлома, суставчатой и те особенности в деформировании металлов, которые сопровождают образование этих типов стружек.

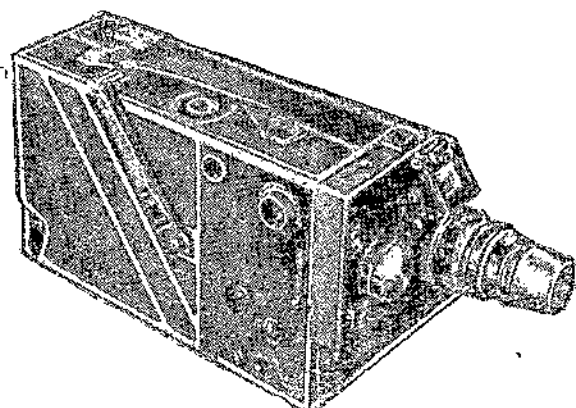
Макрозасъем процесса резания стали 1045

Станок, аппаратура и приспособление

Резание производилось на продольнофрезерном станке Горьковского завода, модель 6М55, мощностью 8,2 квт. Станок был использован как продольнотрогальный (фиг. 33).



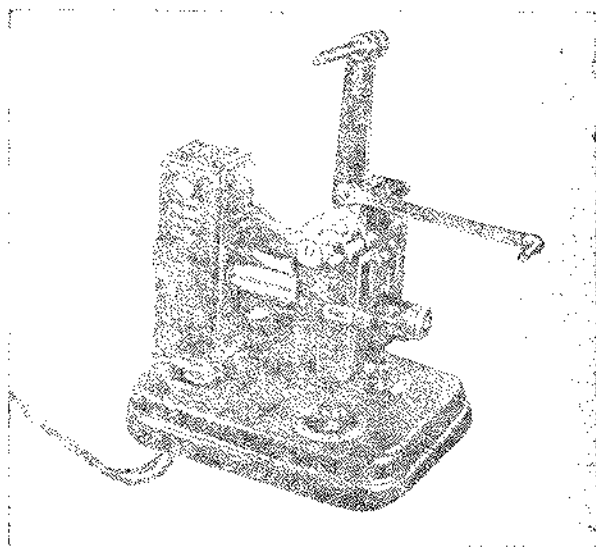
Фиг. 33.



Фиг. 34.

Для засъема на киноленту применялся узкоплечный киноаппарат фирмы Кодак (фиг. 34) (модель — специальная), который мог производить засъем 64 кадров в секунду с точностью ± 4 кадра. Для работы с малой скоростью резания он оказался вполне пригодным.

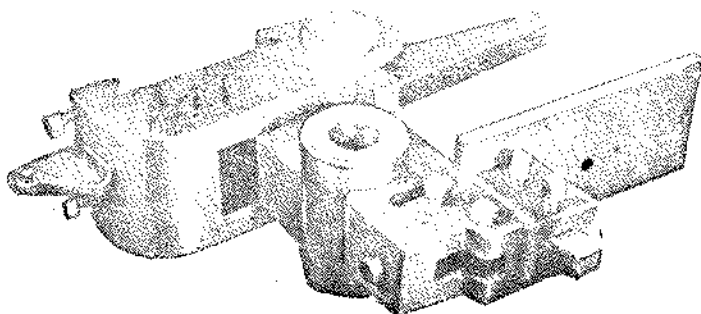
Проектирование киноленты на экран производилось аппаратом УП2 завода КИНАП; аппарат устанавливался в затемненной комнате, на постоянном расстоянии от экрана, что давало увеличение в 120 раз. К аппарату было сделано приспособление для плавного перемещения киноленты без боковых качаний (фиг. 35).



Фиг. 35.

Резец и обрабатываемая деталь

Резец закреплялся в специальном приспособлении, которое надевалось на оправку, и верхним своим концом, как рычагом,



Фиг. 33.

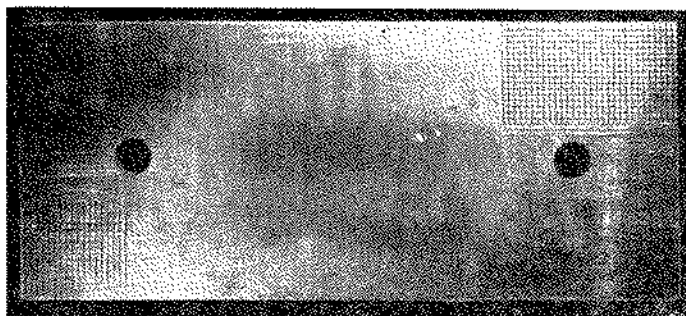
опиралось на консоль станка (фиг. 36). На приспособлении имелась площадка для установки вибрографа.

Резец применялся с наварной пластинкой из быстрорежущей стали РФ1. Тело резца—из стали 1045. Термообработка резца—нормальная—с однократным отпуском. Данные о резце помещены в табл. 1.

Таблица 1

Сечение резца	Геометрия резца						Твердость по Роквеллу (RC)
	α°	β°	γ°	δ°	λ°	r мм	
20×35	7	64	19	71	0	0,17.	65—66

Подвергавшаяся обработке деталь имела форму пластинки размером 5×60×140 мм (фиг. 37). Пластины имели отверстия, при помощи которых они фиксировались на штифтах губок параллельных тисков, для предупреждения от опрокидывания в процессе резания. Пластина предварительно шлифовалась со всех сторон и притиралась пастой ГОИ; на боковой стороне пластинки была нанесена сетка размером 1×1 мм².



Фиг. 37.

Чтобы соблюсти горизонтальность обрабатываемой плоскости и стола станка, верхняя плоскость пластины, подлежащая обработке, шлифовалась вместе с тисками на плоскошлифовальном станке. Проверка установки пластин производилась индикатором.

Механические свойства обрабатываемой пластины указаны в табл. 2.

Таблица 2

Марка стали	Механические свойства					Твердость по Роквеллу при $d = 5$ мм
	σ_b в кг/мм ²	δ в %	ψ в %	σ_s в кг/мм ²	H_B	
1045	70,6	20	40	33,2	179	74—76,8

Примечание. При определении твердости на приборе Роквелла вместо алмазного конуса применялся стальной шарик $d = 5$ мм.

Режим резания

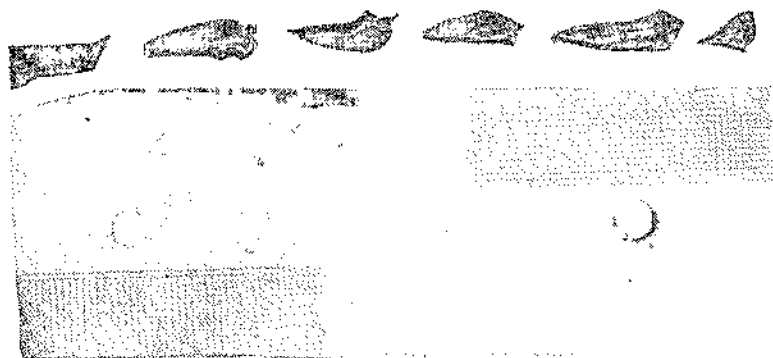
Обработка производилась всухую. Режим резания указан в табл. 3.

Таблица 3

Глубина (толщина) срезаемого слоя a в мм	Ширина срезаемого слоя b в мм	Скорость резания v в м/мин
4	5	0,625

Процесс резания

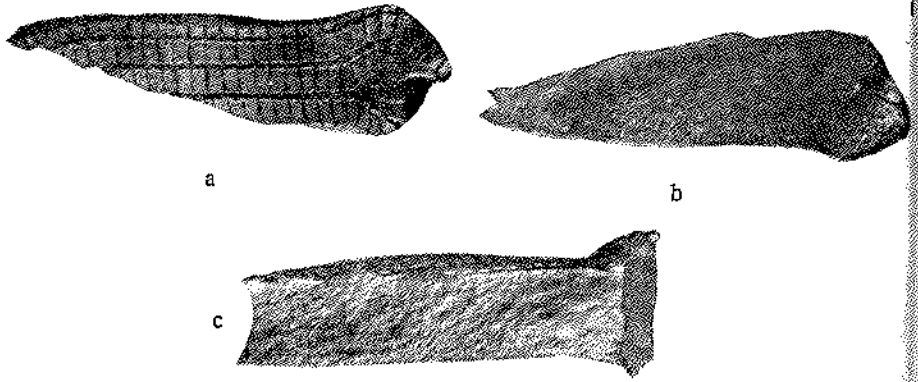
Процесс резания сопровождался образованием элементной стружки. По всей длине (140 мм) было получено шесть отдельных элементов (фиг. 38). В увеличенном масштабе элементы 2 и 3 представлены на фиг. 39 а, б, с и 40 а, б, с. На фиг. 39 а показана боковая сторона элемента 2, на фиг. 39 б — противоположная боковая сторона и на фиг. 39 с — вид снизу на эле-



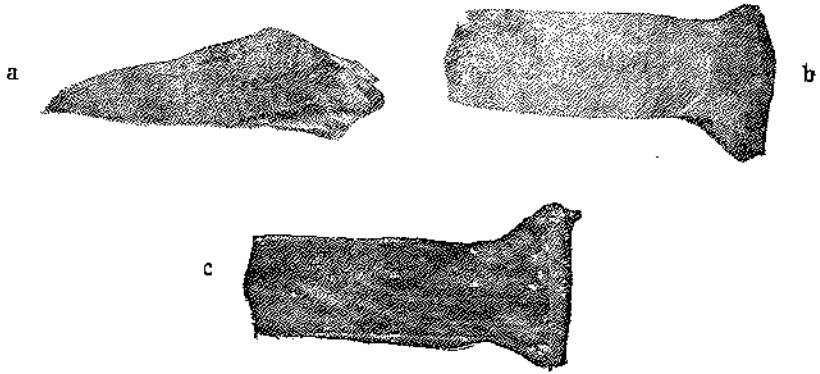
Фиг. 38.

мент 2. На фиг. 40 а показана боковая сторона элемента 3, на фиг. 40 б — вид сверху на элемент 3 и на фиг. 40 с — вид снизу на элемент 3. Внешнее рассмотрение этих элементов показывает, что срезаемый слой подвергается сжатию. Оставшееся искажение сетки и изменение формы элементов свидетельствуют о том, что эти деформации — пластические.

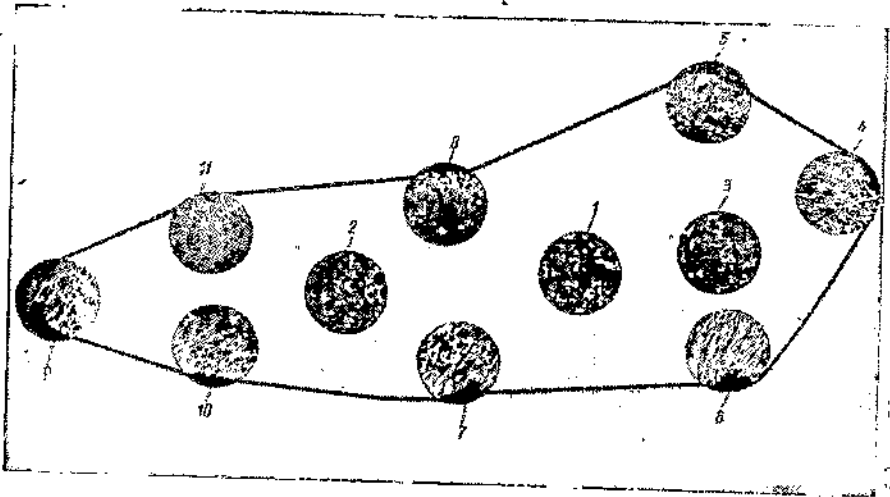
Таким образом срезаемый слой подвергается пластическому сжатию, и следовательно, законы, которым подчиняются деформации срезаемого слоя, аналогичны законам, которым подчиняются пластические деформации сжатия. Исследование структуры отдельных слоев элемента (фиг. 41) показало, что элемент в целом во всем своем объеме подвергается пластическому деформированию.



Фиг. 39.



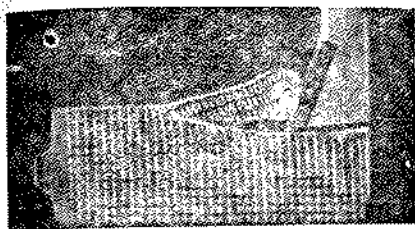
Фиг. 40.



Фиг. 41.

ко
Те.
лас
в
по
на
ми
ти
рас
ты

На фиг. 42—47 последовательно показан процесс образования одного элемента. На фиг. 42 один из элементов (второй) еще окончательно не отделен от остального слоя. На фиг. 43 элемент показан уже отделившимся, и резец приходит в сопри-



Фиг. 42.



Фиг. 43.



Фиг. 44.



Фиг. 45.



Фиг. 46.



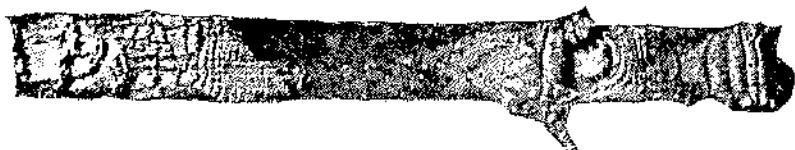
Фиг. 47.

косновение с новым слоем, не подвергавшимся еще резанию. Тем не менее, поверхностная часть этого слоя также подверглась пластическому деформированию на некоторую глубину в период образования предыдущего элемента (второго). Это подтверждается искривлением сетки, которое можно наблюдать на фиг. 43 и особенно отчетливо при увеличении в 30 раз под микроскопом. Дальнейшее продвижение резца сводится к сжатию и отрыванию тонкого слоя с поверхности образца, и эта работа продолжается до тех пор, пока резец не будет захватывать слой достаточной глубины.

во.
ро
Ту
в
бы

Следовательно, в некоторый период времени срезание металла представляет собой как бы самостоятельную стадию, и если бы при этом развивалась достаточно большая температура и стружка была бы непрерывной, то деформированный объем металла мог бы привариться к вершине резца, и мы имели бы процесс образования нароста на резце. Так как эти условия не соблюдены, то и нароста мы не наблюдаем. На фиг. 45 видно, что резцом уже снимается достаточно большой объем металла, который претерпел пластическую деформацию. Вследствие приобретенной хрупкости, в результате дальнейшего сжатия, получается опережающая трещина.

На фиг. 45 и 46 наблюдается, что пластические деформации распространяются далеко впереди резца. Одновременно опережающая трещина также распространяется впереди резца, причем на фиг. 46 уже отчетливо обрисовывается контур элемента (третий). В дальнейшем мы наблюдаем тенденцию трещины



Фиг. 48.

завертываться вверх под углом к направлению движения резца и таким образом обрисовывается начальное положение плоскости скалывания. Через некоторый промежуток времени (фиг. 47) уже более отчетливо обрисовывается контур элемента; опережающая трещина полностью перешла в плоскость скалывания. Элемент подвергся в течение этого периода времени быстрому отрыву от остального слоя металла. Элементы как второй, так и третий, за образованием которых мы наблюдаем, располагались один под другим, не являясь связанными между собой, будучи каждый в отдельности пластически деформированными во всем своем объеме.

Изучение кинокадров показало, что на образование одного элемента при заданных выше условиях требуется время в 3 сек., причем моменту образования опережающей трещины соответствует время 2 сек.; продолжительность отрыва элемента от остального слоя металла, соответствующая времени распространения опережающей щели в направлении плоскости скалывания, равна 1 сек. Как уже сообщалось, обработанная поверхность претерпевает также пластические деформации, вследствие чего она делается шероховатой. На фиг. 48 представлена обработанная поверхность всего образца, подвергавшегося резанию в описанных выше опытах.

Микросъем процесса резания стали 1045

Микросъем процесса резания стали 1045 производился при увеличении в 60 и в 360 раз. В том и другом случае обрабатываемая пластинка имела толщину 2 мм. Перед тем как произ-

но
ду
че
вл

п
м
в
у

ст
м

ме-
, и
ура
бем
бы
не
но,
ла,
ри-
ду-

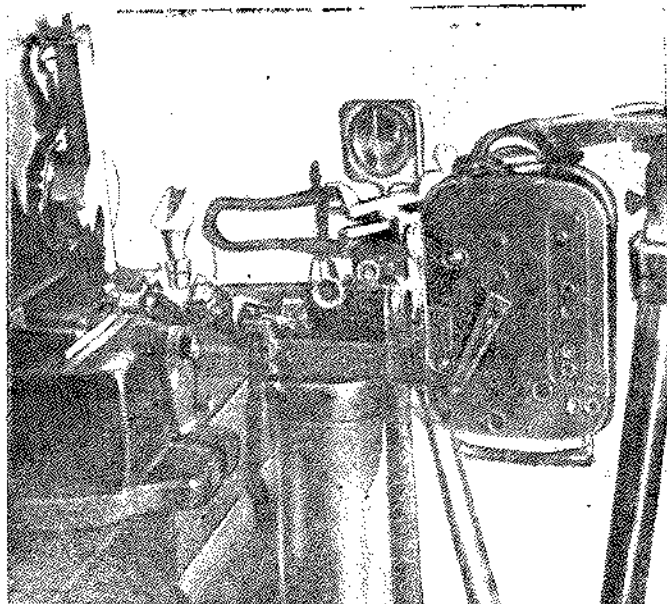
дин
ре-
нем
нта
сны

зпа
ко-
47)
ре-
ия.
му
как
ки-
ей,
ми

го
ж.,
ет-
та
ю-
ы-
ж-
не
за-
по

ри
из-

водить процесс резания, пластинка подвергалась шлифовке, полировке и травлению. Для увеличения применялся микроскоп Лейтца. Резание производилось на том же продольнофрезерном станке. Тубус микроскопа помещался на стойке фрезерного станка в особом приспособлении таким образом, чтобы ось тубуса была расположена перпендикулярно к боковой плоскости опы-



Фиг. 49.

ного образца. Освещение места резания производилось от дугового фонаря осциллографа; это освещение пропускалось через охладитель и двояковыпуклую линзу. Луч света направлялся в призму полного внутреннего отражения, вделанную

Таблица 4

Сечение резца	Геометрия резца				Твердость по Роквеллу R_C
	α°	β°	γ°	δ°	
15 × 22	9	63	18	72	65—66

при помощи особого приспособления в опак-иллюминатор микроскопа. Ранее упоминавшийся киноаппарат Кодак направлялся в окуляр микроскопа. Общее расположение описанной установки показано на фиг. 49.

Применялся резец с наварной пластинкой из быстрорежущей стали РФ1. Тело резца — из стали 1045. Термообработка — нормальная, с однократным отпуском. Геометрия резца указана в табл. 4

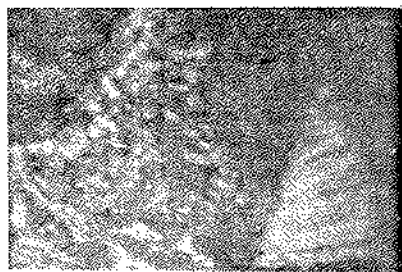
Засъем при увеличении в 60 раз

Резание производилось при толщине срезаемого слоя $a = 0,6$ мм, ширине $b = 2$ мм, с тремя различными скоростями резания: $v = 22,5$ мм/мин $= 0,0225$ м/мин; $v = 46,5$ мм/мин $= 0,0465$ м/мин и $v = 96$ мм/мин $= 0,096$ м/мин.

Процесс резания при $v = 0,0225$ м/мин последовательно показан на фиг. 50 и 51. Как видно из представленных фигур, срезаемый слой подвергается на всю толщину пластическому деформированию. Вследствие перехода срезаемого слоя в хрупкое состояние, здесь также наблюдается опережающая трещина. Опережающая трещина появляется периодически. Но срезаемый слой, оставаясь надорванным указанными трещинами, все же отделяется сплошной лентой. Здесь также видно, что в течение некоторого времени резу приходится срезать весьма тонкий



Фиг. 50.



Фиг. 51.

слой, расположенный под углом к направлению движения резца. Несмотря на то, что стружка в данном процессе получается непрерывной, появление наростов не наблюдается, так как при данных условиях резания работа трения и теплота на передней грани резца незначительны. Следовательно, неизменные условия для наростообразования здесь не имеют места. Встает вопрос, почему в этом процессе, происходящем с весьма малой скоростью резания, при пластическом деформированном слое на всю толщину не получается элементная стружка? Ответ надо искать в том, что усилия, связанные с внешней деформацией тонкой стружки, настолько незначительны, что не дают полного отрыва элементов срезаемого слоя от остальной его массы. Это подтверждается и последующими микрозасъемками, помещаемыми ниже.

Микрозасъем со скоростью резания $v = 46,5$ мм/мин $= 0,0465$ м/мин представлен на фиг. 52 и 53. Несмотря на то, что скорость резания была увеличена почти вдвое (даже несколько больше), картина получается совершенно аналогичная предыдущей. Наблюдаем, как и ранее, пластические деформации, распространяющиеся на всю толщину срезаемого слоя. Опережающие трещины периодически повторяются и переходят в направлении плоскости скалывания. По тем же причинам

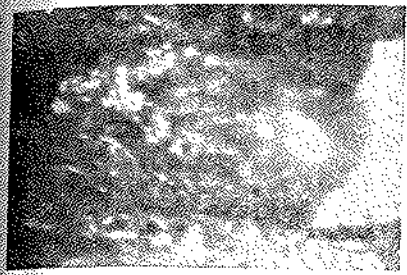
отде
межд
отсу
ния

С
малс
редв
кинс

л
разм
бокс
ниче
гуна
Г
же,
стал
(таб.
F
a =
v =
С
диле
С
F
гуна
сжа
(фи
дви:
Сре
име
оно

отдельные элементы срезаемого слоя остаются связанными между собой, образуя стружку, стекающую по резцу. Наросты отсутствуют. Та же картина повторяется и при скорости резания $v = 96 \text{ м/мин} = 0,096 \text{ м/мин}$.

а =
ям
н =
ока
гур
ому
дуп
ина
мый
же
ние
кий



Фиг. 52.

Фиг. 53.

Засвеем при увеличении в 360 раз

Опыты производились при $a = 0,5 \text{ мм}$, $b = 2 \text{ мм}$ и при весьма малой скорости резания, так как стол станка в этом случае передвигался при помощи ручного ворота. Полученные при этом кинокадры полностью подтверждают изложенное ранее.

Макрозасвеем процесса резания чугуна

Чугунная пластинка, подвергавшаяся резанию, имела те же размеры, что и стальные, а именно $5 \times 60 \times 140 \text{ мм}$ и также на боковой стороне была нанесена сетка размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Механические свойства чугуна указаны в табл. 5.

Таблица 5

Геометрия резца та же, что и при резании стальной пластины (табл. 1).

Режим резания:
 $a = 4 \text{ мм}$, $b = 5 \text{ мм}$,
 $v = 0,625 \text{ м/мин}$.

Обработка производилась всухую.

Марка чугуна	Механические свойства	
	H_B	Твердость по Роквеллу при $d = 5 \text{ мм}$
Серый	180	84—86

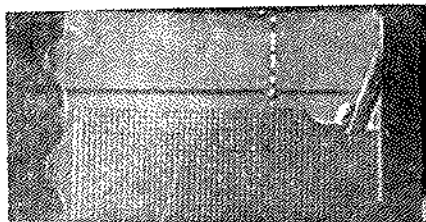
Общий вид установки показан на фиг. 33 и фиг. 49.

На фиг. 54—57 последовательно показан процесс резания чугуна. Все последовательные этапы, связанные с пластическим сжатием, которые наблюдались при обработке стального образца (фиг. 42—47), здесь отсутствуют. При незначительной скорости движения резца отрыв элемента происходит почти мгновенно. Срезаемый слой претерпевает лишь упругое сжатие, и, если и имеет место пластическое деформирование элемента слоя, то оно здесь настолько ничтожно по сравнению с пластическим

деформированием стали, что им можно пренебречь. На фиг. 58
указан один из элементов срезаемого слоя. Изучение как отдель-
ных элементов, так и кадров показывает, что нанесенная на бо-

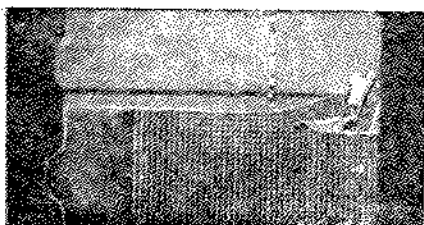


Фиг. 54.

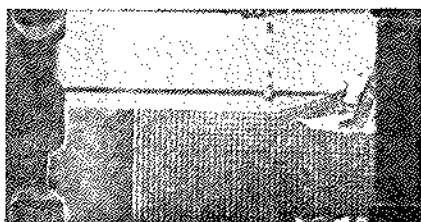


Фиг. 55.

ковой поверхности пластин сетка не подвергается искажениям,
как это имеет место при резании стальных пластин, и что эле-
мент подвергается разрушению в месте нажатия резца. После

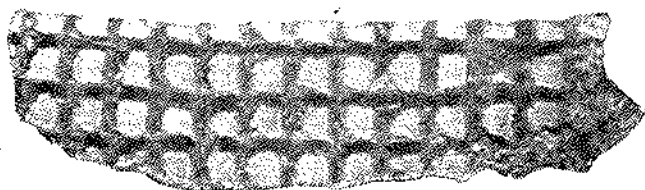


Фиг. 56.



Фиг. 57.

отрыва элемента обработанная поверхность делается весьма
шероховатой и резец при дальнейшем своем движении произво-
дит зачистку этой поверхности.



Фиг. 58.

На резце образуются наплывы от отдельных раздробленных
частиц металла, сжатых и срезанных с обработанной поверхности.
Задней грани резца приходится преодолевать большое трение,
что приводит к ее истиранию. После некоторого промежутка
времени, потребного для соприкосновения резца с впереди
лежащим слоем и в течение которого происходит зачистка

г. 58
цель,
а бо-

шероховатостей на обработанной части поверхности, происходит отделение второго элемента и т. д. Изучение кадров показывает, что промежуток времени, потребовавшийся на образование и отрыв элемента, значительно меньше, чем при обработке стали, и равен примерно 0,5—0,6 сек. Следует отметить, что эти промежутки являются все же не одинаковыми для всех срезанных элементов. Произведенный макроасъем совершенно отчетливо указывает, что сущность явлений при обработке чугуна резко отличается от таковых при резании пластин из стали 1045.

Микроасъем процесса резания чугуна

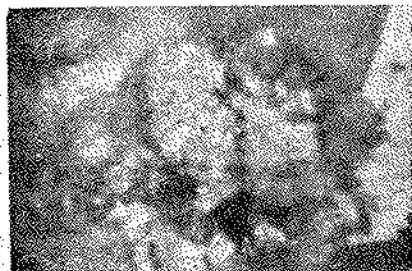
Пластинки того же чугуна, что и при макроасъеме, подвергались микроасъему при увеличении в 80 и 360 раз. Была использована установка, показанная ранее на фиг. 49. Геометрия реза дана в табл. 1. Обработка производилась всухую.

ням,
эле-
осле

Микроасъем при увеличении в 80 раз

Режим резания: $a = 0,4$ мм, $b = 2$ мм, $v = 18$ мм/мин = 0,018 м/мин.

На фиг. 59 и 60 показаны отдельные позиции с киноленты. Вследствие того, что срезаемый слой незначительной толщины,



Фиг. 59.



Фиг. 60.

отдельные элементы представляют собой кусочки металла малых размеров. Под влиянием усилия сжатия эти малых размеров элементы получают разрушение, что видно по оставшимся на них следам в виде пересекающихся трещин. Одновременно поверхностный слой получает разрушение на некоторую (незначительную) величину. В целом же картина процесса резания чугуна происходит хаотично.

сьма
изво-

Микроасъем при увеличении в 360 раз

Режим резания: $a = 0,12$ мм, $b = 2$ мм и $v \approx 18$ мм/мин (стол продольнофрезерного станка приводился в движение от ручного ворота). Последовательно рассмотренные кинокадры подтверждают, что элементы срезаемого слоя не претерпевают

ных
сти.
ние,
утка
еди
стка

сколько-нибудь заметных пластических деформаций. При нажатии реза происходит раздробление этого слоя на отдельные весьма мелкие частицы, и таким образом процесс резания чугуна можно представить, как состоящий из отдельных и следующих фаз: преодоления упругих деформаций, отрыва отдельных элементов и их разрушения. При этом процессе происходит большое трение по задней грани реза. Относительное скольжение элементов по передней грани реза весьма ничтожно.

Микрозасъем процесса резания железа Армо

Микрозасъем при увеличении в 80 раз

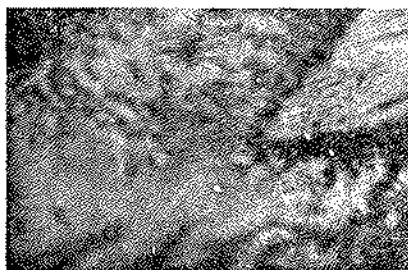
Резанию подвергалась пластинка размером $2 \times 40 \times 120$ мм, изготовленная из железа Армо.

Общий вид установки показан на фиг. 49. Геометрия реза указана в табл. 6.

Таблица 6

Марка стали	Углы в градусах			
	α°	β°	γ°	δ°
РФ1	9	46	35	55

Размеры стружки (срезаемого слоя): $a = 0,3$ мм и $b = 2$ мм. Исследование производилось при двух скоростях резания: $v = 22,5$ мм/мин $= 0,0225$ м/мин и $v = 46,5$ мм/мин $= 0,0465$ м/мин.



Фиг. 61.



Фиг. 62.

Результаты кинозасъема при резании со скоростью $v = 22,5$ мм/мин представлены на фиг. 61 и 62. Срезаемый слой, как видно из приведенных фигур, претерпел пластические деформации. Обработанная поверхность также подвергалась деформированию. Деформированный слой (срезаемый) сходит непрерывной лентой по передней грани реза, причем отделение его от оставшегося слоя происходит под некоторым углом к направлению движения реза, т. е. в направлении плоскости скалывания. Деформации срезаемого слоя происходят на расстоянии от вершины реза,

итин
ьма
жно
фаз:
тов
тре-
мен-

превышающем толщину срезаемого слоя. Процесс резания сопровождается появлением микротрещин, но характерной особенностью его является то, что при этом опережающая трещина не замечается в том виде, как это имело место при обработке стали 1045.

Резание со скоростью $v = 46,5$ мм/мин собственно только подтверждает высказанные выше положения, т. е. процесс, несмотря на увеличенную вдвое скорость резания по сравнению с предыдущим, происходит совершенно аналогично. Эта особенность обрабатываемости весьма вязкого металла была проверена нами при микросъеме с увеличением в 360 раз.

мм,
эпа

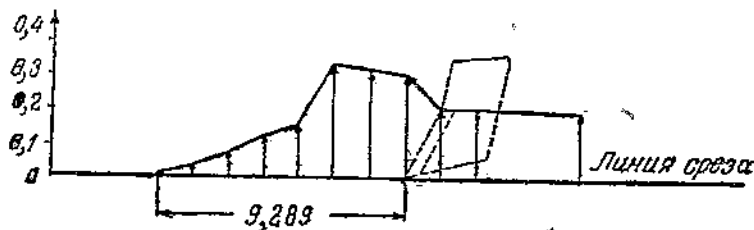
Микросъём при увеличении в 360 раз

Обрабатываемые пластинки имели те же размеры, что и в предыдущем случае. Резание производилось при $a = 0,10$ мм. Перемещение стола происходило ручным воротом. Рассмотрение последовательных кинокадров обнаруживает появление микротрещин, и весь процесс совершается аналогично описанному выше.

5. ХАРАКТЕР И ВЕЛИЧИНА ДЕФОРМАЦИИ

мм.
ния:
мин.

Если проследить за характером изменения сетки по кинокадрам (фиг. 42—47), то картина будет представляться в следующем виде: как в направлении движения резца, т. е. в направлении линии среза, так и выше и ниже линии среза дефор-



Фиг. 63.

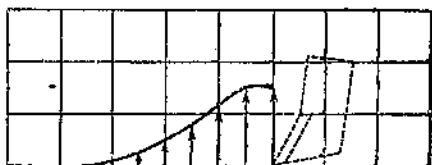
мин.
из
Об-
нюю.
той.
гося
ния
щии
эца,

мации по мере движения резца распространяются впереди его, имея затухающий характер. Именно в слоях, близко расположенных к резцу, получают наибольшие деформации.

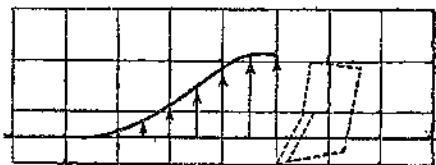
Характер изменения деформаций в направлении линии среза, полученный на основании замеров изменения сетки на универсальном микроскопе Цейсса, показан на фиг. 63. Как видно, деформации распространяются далеко впереди резца. При наличии элементарной стружки пластические деформации распространялись почти до половины длины элемента, в то время как сам элемент далеко еще не был образован. Таким образом в несколько идеализированном виде распространение деформаций может быть представлено фиг. 64.

Ту же картину можно наблюдать, если произвести замер изменения сетки выше линии среза. Если несколько идеализировать, как и в предыдущем, эту картину, то она представится, как указано на фиг. 65.

Ранее сообщалось, что обработанная поверхность тоже претерпевает пластическое деформирование. Рассматривая сетку на отдельных кинокадрах, можно убедиться, что изменения этой сетки распространяются за линию среза до 1 мм. Если, таким обра-

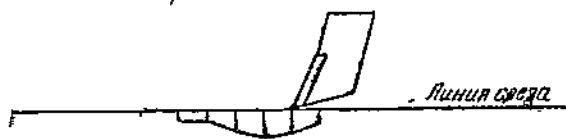


Фиг. 64.



Фиг. 65.

зом, можно по изменению сетки судить о глубине проникновения пластической деформации в верхние слои, то при толщине срезаемого слоя $a = 4$ мм деформированный слой получается до 1 мм. Деформации ниже линии среза представлены на фиг. 66. Сравнивая абсолютную величину этих деформаций с таковой же по линии среза и выше линии среза, убеждаемся, что эта величина является значительно меньшей. Если по линии среза и выше изменение сетки происходит в пределах до 0,3—0,4 мм и даже больше, то на расстоянии 1 мм ниже линии среза изменение сетки достигает не более 0,1 мм. Таким образом пласти-



Фиг. 66.

ческие деформации, происходящие в обработанной поверхности, носят также затухающий характер. Наибольшее их проникновение при заданных условиях достигает 1 мм.

Пластические деформации, как упоминалось ранее, распространяются далеко впереди резца. На основании изучения кинокадров можно прийти к следующему выводу: как только деформирование достигает наибольшего своего значения, дальнейшее его распространение происходит по мере перемещения резца. На фиг. 67 по оси абсцисс отложено перемещение резца, а по оси ординат — величина деформации по направлению линии среза, из которой можно получить указанные выше выводы.

Обработанная поверхность в результате пластического деформирования восприняла упрочнение, что следует из фиг. 68. Замер твердости производился на приборе Роквелла с диаметром шарика $d = 5$ мм. В дальнейшем будет более подробно показано исследование величины упрочнения; но даже и этот метод, приведенный выше, дал достаточно ошутимые результаты.

из-
ро-
гся,

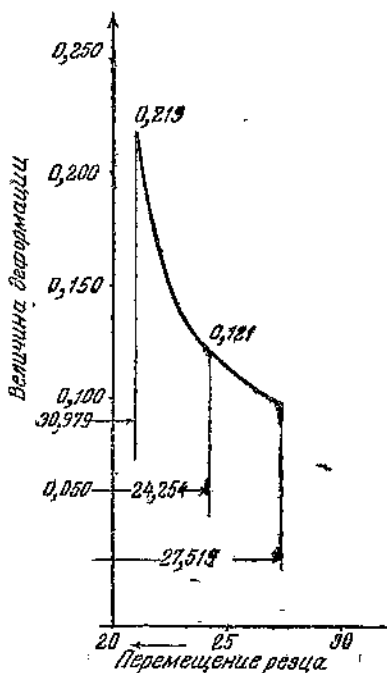
пре-
на
той
гра-

ния
ине
тся
66.
вой
эта
на
и
м
и
ме-
ти-
ни,
гра-
ти,
аю-
ак-
но-
ых
ает

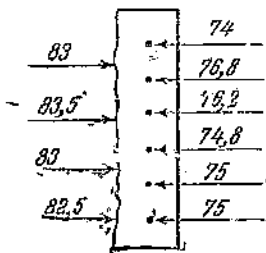
ро-
но-
ор-
нее
ща.
по
нии

юр-
мер
ика-
ле-
ный

Известно, что прочность тела в весьма большой степени обуславливается состоянием его поверхности. Вследствие этого весьма важным фактором является глубина, на которую проникают пластические деформации в обработанную поверхность. Микрогеометрия обработанной поверхности также зависит от величины пластических деформаций. Таким образом качество поверхности и прочность также зависят от пластических деформаций и глубины их проникновения в обработанную деталь. Несмотря на то, что в области изучения граничного слоя имеются в настоящее время работы, все же их недостаточно, чтобы иметь необходимые нормативы для отделки поверхностей¹. На фиг. 69



Фиг. 67.



Фиг. 68.

представлена глубина граничного слоя в зависимости от глубины резания и подачи при обточке отожженной латуни². Следует, что при $t=1,27$ мм и $s=0,5$ мм на один оборот глубина слоя доходит до 0,5 мм.



Фиг. 69.

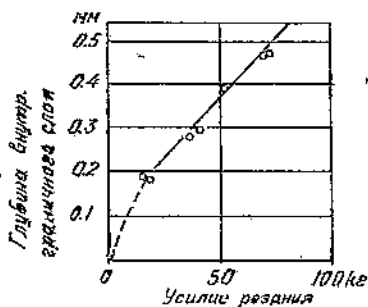
В зависимости от усилия резания, возникающего в процессе обточки отожженной латуни, глубина граничного слоя указана

¹ Подробно, см. Г. Шмальц, Качество поверхности, 1941.

² Томасен и Катчон, „Mach. Eng.“ v. 56, 1934.

на фиг. 70, из которой следует, что при $P=75$ кг глубина доходит до 0,5 мм и возрастает почти прямо пропорционально усилию резания.

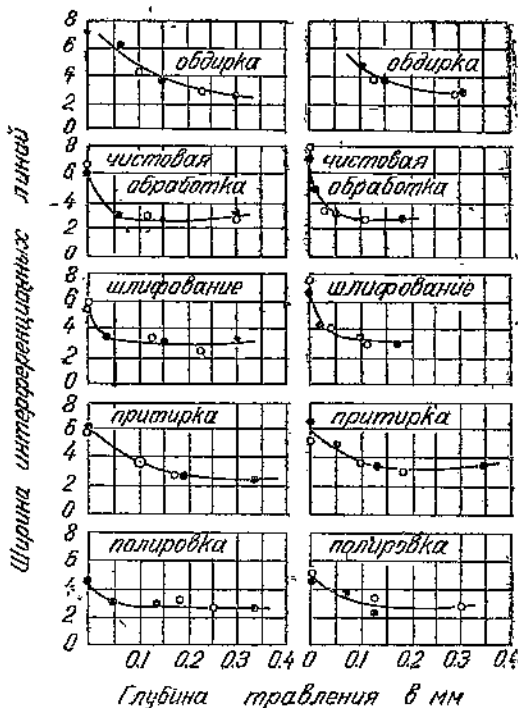
В зависимости от вида операции глубина деформированной зоны будет изменяться. На фиг. 71 показаны результаты обра-



Фиг. 70.

ботки валов из стали 1061 и 3561 обдирочной и чистовой стружками, шлифовкой, притиркой и полировкой¹, на фиг. 72 показаны результаты обработки втулок из тех же сталей сверлением, зенкерованием, развертыванием на сверлильном станке, то же — на токарном станке и притиркой. Из рассмотрения этих фигур следует², что при обработке валов полировкой глубина деформации проникает до 0,1 мм; при шлифовке — до 0,15 мм; при чистовой обработке резцом — до 0,3 мм. При обработке втулок наибольшая глубина деформации имеет место: при сверлении до 0,6—0,7 мм, при развертывании до 0,2 мм.

Таким образом все виды обработки металлов резанием, включая и самые тонкие обработки, например полировку, вызывают остаточные деформации, с той лишь разницей, что при более грубой обработке глубина проникновения деформации получается больше, при более тонкой обработке — меньше. Отсюда становится ясным, насколько важным фактором при обработке ответственных деталей являются последние чистовые проходы инструментом и насколько важным вопросом является выбор методов чистовой



Фиг. 71.

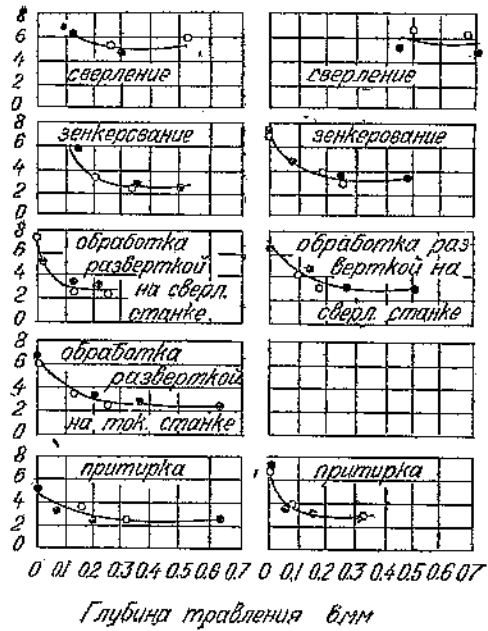
¹ Меллер и Рот, Mitteilungen Kais. Willh. Inst. Eisenforsch., Bd. XIX, 1937.

² По оси ординат отложены ширины интерференционных линий, по оси абсцисс — глубина травления. Постоянство ширин интерференционных линий говорит об отсутствии напряжений.

до
ня.
ной
ра-
561
ми,
ли-
ре-
тех-
ва-
ль-
юм
мо-
что
кой
до
мм,
—
ток
до

(отделочной) обработки. Таким образом обрабатываемый металл, метод обработки, глубина резания t , подача s и скорость резания v влияют на величину остаточных деформаций, глубину их проникновения и на характер распределения упрочнения. Но среди многих факторов, влияющих на остаточные деформации, геометрия инструмента и состояние его лезвий должны играть также не последнюю роль. В дальнейшем влияние этого фактора будет показано на основании произведенных нами исследований, но сейчас можно предположить, что оптимальная геометрия инструмента по стойкости не всегда может вызывать и наименьшие деформации. В особых случаях для получения поверхности высокого качества необходима и особая геометрия, возбуждающая наименьшие остаточные деформации. Также можно предположить, что большая притупленность инструмента вызывает и большие остаточные деформации. Поэтому в приведенных случаях работать необходимо при иных стойкостях, чем это общепринято (экономической и пр.), а именно при таких, при которых остаточные деформации получаются минимальными.

Ширина интерференционных линий



Фиг. 72.

6. ГЛУБИНА ДЕФОРМИРОВАННОГО СЛОЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ

Отмечалось ранее (рассматривая кинокадры при свободном резании), что если судить о глубине проникновения деформаций по изменению сетки на боковой стороне испытуемых пластин, то при $a = 4$ мм деформирование при обработке стали 1045 проникает до 1 мм. Это обстоятельство мы проверили при несвободном резании той же стали, пользуясь получающим в настоящее время применение рентгенографическим методом. Процесс обработки осуществлялся следующим образом: из круглой болванки были нарезаны кольца размером $D = 100$ мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм. Указанные кольца были затем отожжены при 800° в течение 4 час. при охлаждении с печью. Полученная структура — крупные зерна феррита (до 0,01 мм). После этого кольца были подвергнуты обработке, при $s = 0,6$ мм на 1 оборот, $v = 21,6$ м/мин и при различной глубине резания:

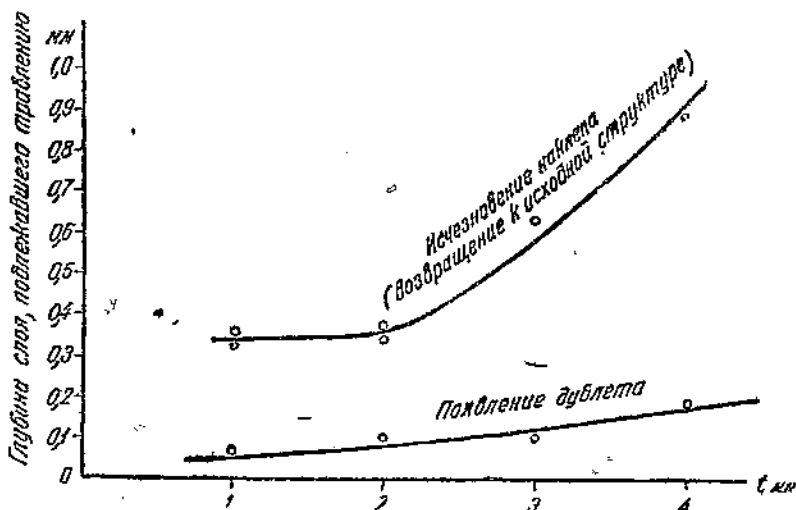
937
оси
нии

$t=1$ мм, $t=2$ мм, $t=3$ мм и $t=4$ мм. Резание производилось только острым резцом из стали РФ1. Геометрия резца дана в табл. 12, стр. 45. При установке колец на оправку для производства резания были приняты все меры предосторожности, чтобы избежать нажатий, вызывающих остаточные деформации. Приме

Таблица 7

№ образцов	Глубина резания t в мм	По рентгенограммам		Результат травления	
		Появление дублета на глубине в мм	Появление крупных зерен на глубине в мм	Точка В	Точка А
1	1	0,07	0,32	0,07	0,35
2	1	0,10	0,30	0,08	0,33
3	2	0,10	0,37	0,09	0,36
4	2	0,10	0,38	0,10	0,35
5	3	0,10	0,64	0,12	0,65
6	4	0,18	0,89	0,18	0,90

нялась камера Закса. Было получено 86 рентгенограмм¹. Как известно, критерием исчезновения наклепа служит появление дублета и выявление структуры, идентичной исходной. Последовательное травление совершалось каждый раз свежей кислотой (царской водкой), и толщина стравленного слоя измерялась инди-



Фиг. 73.

катором. Если построить зависимость стравленного слоя от времени травления $h=f(t)$, то точки перегиба будут соответствовать переходу от деформированного слоя металла к исходному. Лучше всего это может быть показано на кривой, производной

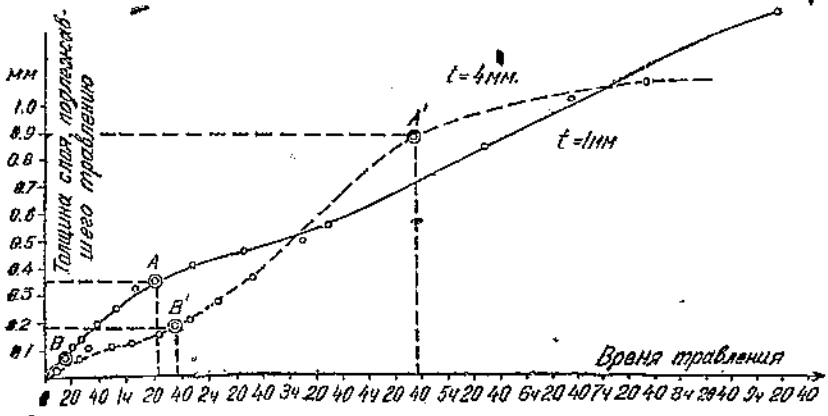
¹ Произведено в Институте машинноведения АН СССР.

ось
а в
из-
бы
ме

от этой, т. е. $\frac{dh}{dL}$. Переход производной к постоянной величине характеризует постоянную скорость травления и неизменность металла. В табл. 7 суммированы результаты, полученные при исследованиях.

Эти же результаты изображены на фиг. 73 и 74. На фиг. 74 кривая для $t=4$ мм имеет перегиб в точке A' , что соответствует глубине травления 0,9 мм. Это значение соответствует исчезновению наклепа и переходу к неизменной структуре. Выводы из приведенных выше исследований могут быть сведены к следующему:

как
не
дой
ци-



Фиг. 74.

1) глубина упрочненного слоя возрастает с возрастанием глубины резания;

2) можно, с некоторым приближением, сказать, что глубина проникновения остаточных деформаций $h = (0,25 \div 0,35) t$, где t — глубина резания. Так, например, при $t=1$ мм, $h=0,35$ мм и при $t=4$ мм $h=0,90$ мм.

Эти исследования подтверждают те основные выводы, которые были сделаны в результате изучения нами кинокадров.

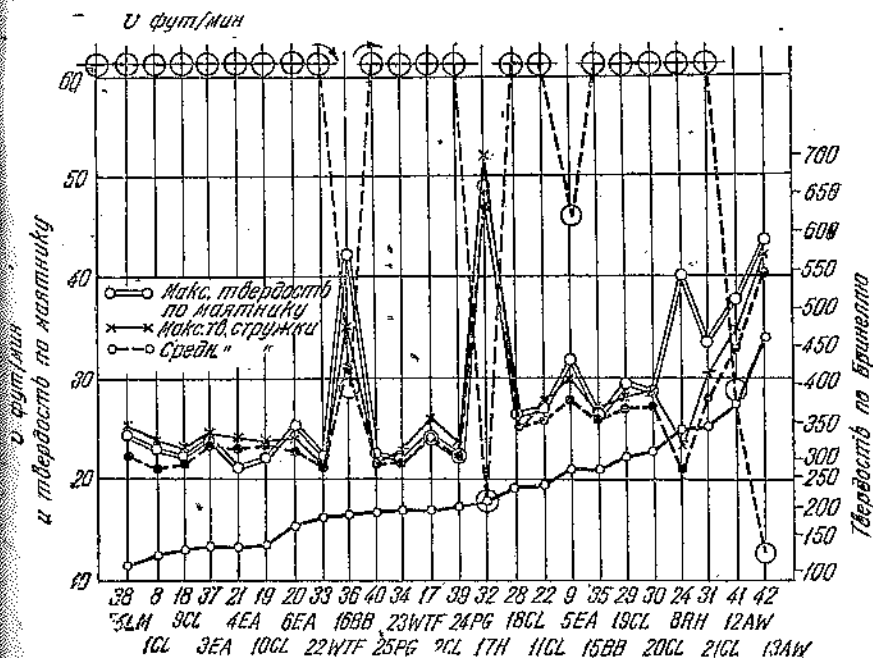
7. УПРОЧНЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Исследования характера и величины упрочнения, возникающего в процессе резания, показали, что различные металлы различно воспринимают упрочнения или обработочную твердость и что хрупкие металлы, например чугун, почти совершенно не воспринимают упрочнения. В табл. 8 приведены металлы, подвергнутые обработке резцом¹, и на фиг. 75 — результаты исследования твердости стружки (срезанного слоя). Из фиг. 75 видно, что срезанный слой всех металлов, подвергнутых обработке, воспринял достаточно большое упрочнение за исключением чугуна (8RH). Так, например, мягкая сталь (26 LM) восприняла

е-
ю-
у.
ой

¹ Герберт, „Proceedings of the Inst. of Mech. Eng.“ № 4, 1928.

упрочнение до $H_B = 300 \text{ кг/мм}^2$ против первоначальной твердости $H_B = 100 \text{ кг/мм}^2$ т. е. на 200% . Так же следует, что чем больше первоначальная твердость металла, тем в процентном отношении меньше воспринимаемое упрочнение. Например, хромоникельмолибденовая сталь (13 AW) с первоначальной твердостью $H_B = 475 \text{ кг/мм}^2$ восприняла упрочнение до $H_B = 575 \text{ кг/мм}^2$, т. е. только на 21% . Распределение воспринятого упрочнения как в срезанном слое (стружке), так и в обработанной поверхности, так сказать, упрочненное поле, показано на фиг. 76 и 77.



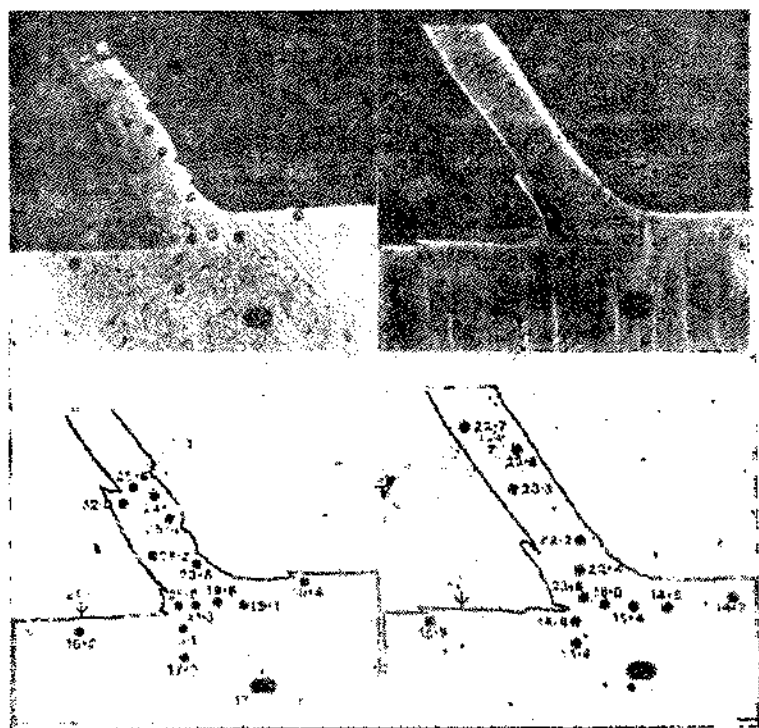
Фиг. 75.

Влияние скорости резания на упрочнение представлено на фиг. 78 и 79 при обработке стали 9 CL: на фиг. 78 — при скорости резания $v = 2,24 \text{ м/мин}$ и фиг. 79 при скорости резания $v = 18,3 \text{ м/мин}$.

Таким образом способность воспринимать упрочнение является индивидуальным свойством каждого металла. Абсолютная же величина воспринятого упрочнения одним и тем же металлом будет зависеть (при одной и той же геометрии реза) от режима резания (t), (s) и (v). Способностью воспринимать упрочнение обладают не только черные, но и цветные металлы. В табл. 9 и 10 приводятся данные, касающиеся упрочнения, получаемого алюминием, в зависимости от глубины резания¹.

¹ Костылев, Известия Сиб. ф.-т. института, 1940 (под руководством В. Д. Кузнецова).

Из указанных табл. 9 и 10 отчетливо видно, что толщина срезаемого слоя (глубина резания t) влияет на хрупкость материала (уменьшение удлинения), но не влияет на σ_B . Это объяс-



Фиг. 76.

Фиг. 77.

няется тем, что на деформацию, получаемую от резания, накладывается значительно превышающая ее деформация растяжения, уничтожая все следы первой.

Таблица 9

№ аб-разца	Глубина резания t в мм	δ в %	σ_B в кг/мм ²
1	0,00	36,9	17,0
2	0,5	32,25	17,0
3	1,0	34,8	17,0
4	1,5	31,1	16,2
5	2	27,4	17,3
6	2,5	22,3	17,0

В области резания металлов принято характеризовать деформацию срезаемого слоя (деформацию стружки) коэффициентом усадки, представляющим отношение длины пути, пройденного резцом, к длине стружки, измеренной по гладкой ее стороне, т. е.

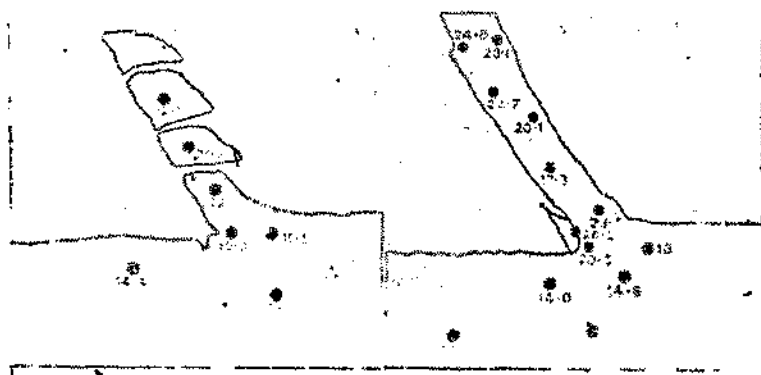
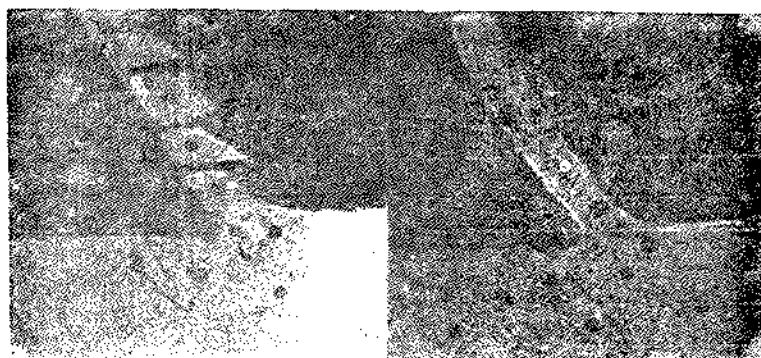
$$K = \frac{L_0}{L}, \quad (2)$$

где L_0 — длина пути, пройденного резцом, в мм;
 L — длина стружки в мм.

стр.
тытв

мет
тиб
гео

Иногда за коэффициент усадки принимают и обратное отношение. Необходимо указать, что измерение коэффициента усадки K представляет практически большие трудности, так как?



Фиг. 78.

Фиг. 79.

стружка завивается в спираль, а при малых сечениях она закручивается. В этой области был ряд предложений, касающихся

Таблица 10

Глубина резания t в мм	0	0,2	0,6	0,8	1,5
δ в %	89,2	38,3	29,1	33,3	27,5
σ_b в кг/мм ²	9,2	9,3	9,4	9,3	9,2

методов измерения величины K , а именно: производить замер гибкой связью, при изучении K применять инструмент особой геометрии, проектировать стружку на экран и т. д. В конечном

итоге вопрос с измерением величины K нельзя считать окончательно разрешенным.

В дальнейшем мы касаемся метода, который был нами применен при исследовании K . Исследования показали, что усадка стружки для заданного металла и заданной геометрии инструмента зависит от скорости резания, от толщины стружки (подачи) и почти совершенно не зависит от ширины срезаемого слоя (глубины резания). Эти положения достаточно отчетливо

Таблица II

Свинец		Олово	
Скорость прокатки в см/сек	Напряжение σ_0 в кг/мм ² (предел текучести)	Скорость прокатки в см/сек	Напряжение σ_0 в кг/мм ² (предел текучести)
0,02	1,84	0,85	4,06
0,06	2,07	1,85	4,35
0,90	2,68	—	—
1,60	2,92	2,50	5,05
2,50	3,16	7,76	6,45
5,00	3,40	—	—
30,00	3,64	—	—
188,50	3,85	22,5	6,69
300,00	4,16	—	—

установлены отдельными экспериментаторами, но причины влияния не были вскрыты. Теория пластической деформации дает возможность объяснить причины, влияющие на коэффициент усадки K . Экспериментами показано, что с увеличением скорости резания величина K уменьшается, т. е. усадка стружки уменьшается. Причиной здесь является то, что с увеличением

скорости резания предел текучести возрастает, обрабатываемый материал становится более хрупким, т. е. менее пластичным, а потому усадка срезаемого слоя уменьшается. В табл. II приводятся данные¹, полученные при прокатке свинца и олова, подтверждающие рост предела текучести с повышением скорости, с которой производилось деформирование.

8. ДЕФОРМАЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 1045

При обработке резец изнашивается и меняет свою геометрию. Ввиду этого была поставлена цель при несвободном резании выявить:

1) характер внешних деформаций, т. е. изменение внешней формы стружек, в зависимости от продолжительности работы резца;

2) характер упрочнения как срезаемого слоя (стружки), так и обработанной поверхности от продолжительности работы резца;

3) влияние скорости резания, глубины и подачи на упрочнение как срезаемого слоя, так и обработанной поверхности.

Для разрешения этих вопросов автором были поставлены специальные эксперименты, результаты которых и помещаются ниже.

¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, 1941.

Станок, аппаратура и реэцы

Резание производилось на токарном станке ДИП-300 мощностью 8 квт.

Упрочнение замерялось маятником Герберта.

Реэцы из стали РФ1, нормально термически обработанные, имели геометрию, приведенную в табл. 12.

Таблица 12

Сечение реэца	Углы							Твердость по Роквеллу в R_C
	α°	β°	γ°	δ°	φ°	φ_1°	λ°	
20×30	6	66	18	72	45	15	0	64—65

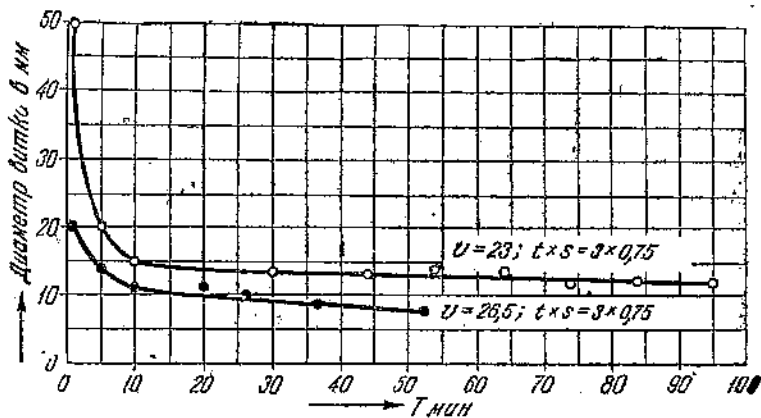
Условие обработки

Обработка производилась всухую.

Для удобства замеров твердости и прочего из болванки вырезались отдельные кольца.

Изменение внешней формы стружек

Как известно, в первые моменты работы реэца стружка отделяется лентой, имеет шпалообразный вид, затем по мере появления лунки на передней грани стружка начинает завиваться



Фиг. 80.

спираль. На фиг. 80 представлены результаты замера диаметров витков стружки в зависимости от скорости резания v и продолжительности работы реэца T .

Диаметр витка сначала резко уменьшается, затем остается почти стабильным, вплоть до начала более резкого притупления реэца.

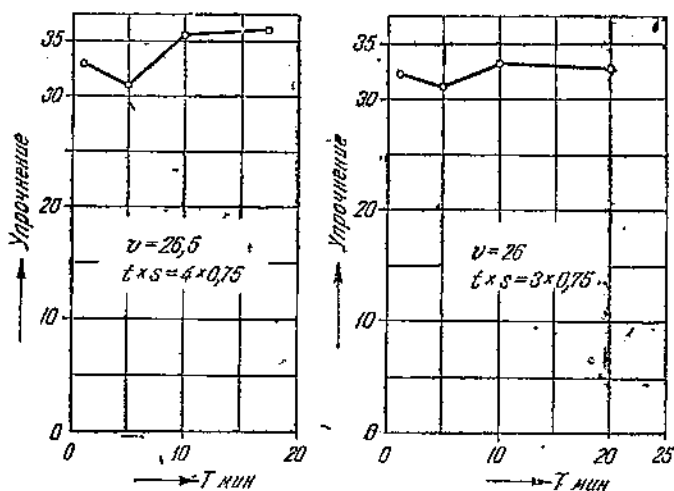
Взаимодействие реэца и срезаемого слоя сводится к тому, что срезаемый слой, производя работу трения, изменяет геометрию реэца, в то же самое время подвергается в каждый послед-

дующий момент со стороны резца несколько иному деформированию по сравнению с тем, какое имело место в предыдущий момент.

Поэтому следует ожидать, что в тот момент, когда диаметр витка резко уменьшился и геометрия резца приняла форму более выгодную для данного обрабатываемого металла, деформация срезаемого слоя должна уменьшиться и, следовательно, упрочнение также должно уменьшиться. Но в дальнейшем по мере некоторой стабилизации диаметра витка, но при непрекращающемся притуплении резца, упрочнение будет возрастать. Это подтверждается дальнейшим исследованием.

Упрочнение срезаемого слоя

На фиг. 81 представлены результаты замера упрочнения срезаемого слоя маятником Герберга в зависимости от параметров резания v , t , s и периодов работы инструмента T .



Фиг. 81.

Высказанные выше соображения относительно упрочнения срезаемого слоя в зависимости от состояния резца весьма наглядно подтверждаются этими результатами, а именно: наибольшее упрочнение имеет место в первые моменты резания, в дальнейшем, по мере образования лунки на передней грани, упрочнение уменьшается и в последующие периоды работы резца, по мере его режущего притупления, упрочнение опять начинает увеличиваться. Одновременно с этим диаграммы, изображенные на фиг. 82 и 83, показывают изменения упрочнения срезаемого слоя в зависимости от v , t и s , т. е. с увеличением каждого из данных параметров упрочнение срезаемого слоя неизменно увеличивается. Следовательно, наибольшая работа пластического деформирования происходит, в первый период резания, когда процесс совершается еще острым инструментом, и в последующие, когда инструмент начинает режко

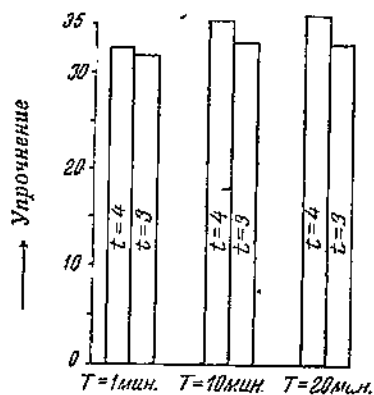
притупления
связано
стиче
указать
измени
это
инструмент

А
ния
метр

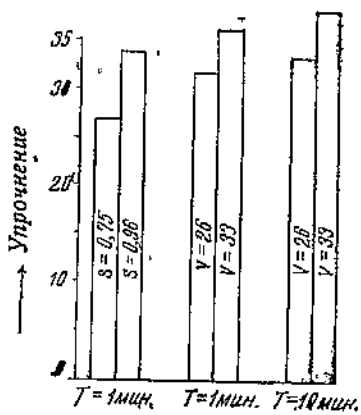
Упрочнение

карта
зам
пов
ней
нач
это

притупляться. Существует также промежуточное положение, связанное с образованием лунки на передней грани, когда пластические деформации в срезаемом слое уменьшаются. Все это указывает на то, что резание представляет собой непрерывно изменяющийся с течением времени процесс деформирования, и это изменение является результатом меняющейся формы инструмента в период его работы.



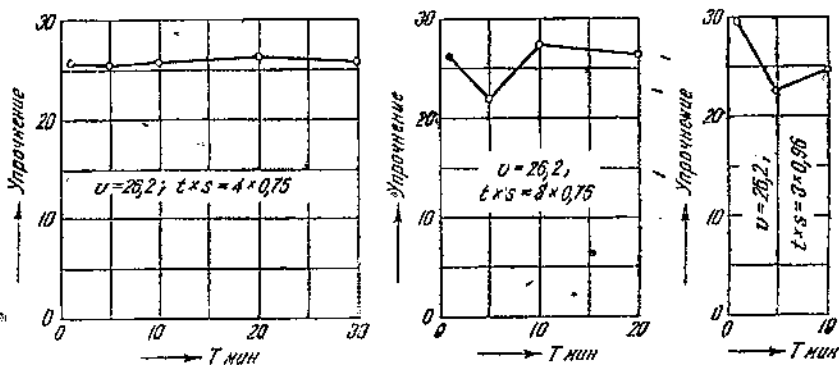
Фиг. 82.



Фиг. 83.

Упрочнение обработанной поверхности

Аналогичная работа была проделана по измерению упрочнения обработанной поверхности в зависимости от тех же параметров. На фиг. 84 помещены результаты измерения. Общая



Фиг. 84.

картина представляется в том же виде, как и в предыдущих замерах, а именно: в первые моменты упрочнение обработанной поверхности наибольшее, затем несколько уменьшается и в дальнейшем, по мере резкого притупления инструмента, упрочнение начинает опять все больше и больше увеличиваться. Все это указывает на то, что для получения возможно мень-

ших изменений поверхностных слоев обрабатываемого изделия необходимо резание производить инструментом соответственной геометрии и, конечно, только острым. Поэтому там, где упомянутая задача поставлена как первостепенная, период стойкости инструмента должен быть в основном подчинен этой цели, а следовательно, здесь могут не подойти общепринятые оптимальные и экономические стойкости инструмента. В этих случаях обработки должны назначаться такие периоды работы инструмента, при которых имеет место еще допускаемая величина пластического деформирования обработанной поверхности. С точки зрения полученных здесь результатов вполне целесообразными являются те выкружки на передней грани резцов, которые производятся заранее особой заточкой и представляют собой имитацию образующейся луночки. На фиг. 84 показано известное уже влияние параметров резания на величину упрочнения обработанной поверхности. Можно также утверждать, что упрочнение срезаемого слоя больше упрочнения обработанной поверхности.

Действительное сечение и усадка стружки

Под действительным сечением стружки подразумевается то сечение, которое имеет срезанный слой, т. е. уже деформированный. Величина этого сечения по отношению к первоначальному, еще не деформированному, дает количественную оценку произведенным деформациям. Дело в том, что обычное вычисление коэффициента усадки стружки

$$K = \frac{L_0}{L}$$

связано с большими трудностями измерения величин (L), что отмечалось нами ранее. Несмотря на проведенную нами большую и кропотливую работу по измерению усадки стружки обычным упомянутым методом, нам пришлось от этих результатов все же отказаться и оценивать величину усадки отношением

$$K = \frac{f_g}{f_0}, \quad (3)$$

где f_g — действительное сечение стружки в $мм^2$ и $f_0 = t \times s$ — номинальное сечение стружки в $мм^2$.

Указанное выражение следует непосредственно из постоянства объемов, сохраняемых в процессе деформаций, а именно:

$$f_g \cdot L = f_0 \cdot L_0 = \text{const},$$

откуда

$$\frac{f_g}{f_0} = \frac{L_0}{L} = K. \quad (4)$$

Для получения действительного сечения стружки (f_g) мы поступали следующим образом: стружки заливались сплавом Вуда в угольники, будучи гладкой своей стороной прижаты к одной из сторон угольника. В таком виде стружки подверга-

лись
уголь
нием
этого
каль
тивни
поме
тели
(s),
оцен

Н
тель
плод

мог
нап

№
об-
раз-
цов

8

9

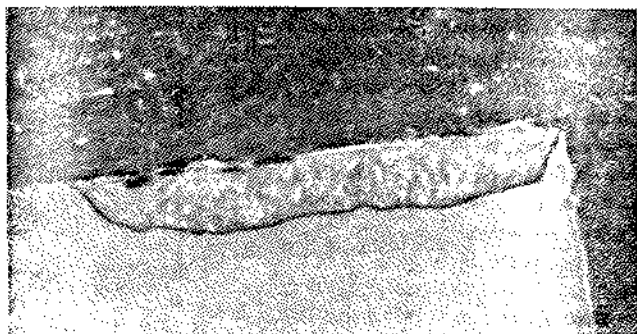
10

4

лись шлифовке в направлении, перпендикулярном к стороне угольника. Полученное сечение фотографировалось с увеличением в определенное число раз, и далее измерялась площадь этого сечения или планиметром, или простым наложением кальки с сеткой $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Этот метод оказался весьма эффективным и достаточно точным. Используя его, мы получили помещаемые ниже результаты, касающиеся изменения действительного сечения стружки как от параметров резания (v), (t), (s), так и от периода резания (T). Величина усадки стружки оценивалась количественно отношением

$$K = \frac{f_g}{f_0}$$

На фиг. 85 представлено полученное таким образом действительное сечение стружки при увеличении в 12 раз. Подсчет площадей, а также и прочие данные сведены в табл. 13.



Фиг. 85.

Отношение площадей $\left(\frac{f_g}{f_0}\right)$ показывает, что ширина срезаемого слоя не влияет на величину деформации в поперечном направлении (в направлении толщины слоя). Между тем, тол-

Таблица 13

№ об-разцов	Режим обработки					Действительная площадь сечения стружки f_g в мм^2	Коэффициент усадки $K = \frac{f_g}{f_0}$
	Глубина резания t в мм	Подача s в мм	Номинальное сечение стружки $f_0 = t \cdot s$ в мм^2	Скорость резания v в м/мин	Продолжитель. резан. T в мин.		
8	2	0,48	0,96	26,5	1,0	1,74	1,81
9	3	0,48	1,44	26,5	1,0	2,54	1,77
10	4	0,48	1,92	26,5	1,0	3,38	1,76

щина срезаемого слоя резко влияет на величину поперечных деформаций. Для подач $s=0,75$ и $s=0,48$ в табл. 14 даны численные величины отношения $\frac{f_g}{f_0}$.

Таблица 14

№ обработки	Режим обработки					Действительная площадь сечения стружки f_g в мм ²	Коэффициент усадки $K = \frac{f_g}{f_0}$
	Глубина резания t в мм	Подача s в мм	Номинальное сечение стружки $f_0 = t \cdot s$ в мм ²	Скорость резания v в м/мин	Продолжительность резания T в мин.		
2	3	0,75	2,25	26,5	1,0	3,55	1,57
9	3	0,48	1,44	26,5	1,0	2,54	1,77

Данные табл. 14 показывают, что при меньшей толщине срезаемого слоя удельная величина деформаций больше, т. е. при меньшей толщине стружки деформации совершаются более полно.

В табл. 15 показаны изменения действительных площадей в зависимости от скорости резания.

Таблица 15

№ обработки	Режим обработки					Действительная площадь сечения стружки f_g в мм ²	Коэффициент усадки $K = \frac{f_g}{f_0}$
	Глубина резания t в мм	Подача s в мм	Номинальное сечение стружки $f_0 = t \cdot s$ в мм ²	Скорость резания v в м/мин	Продолжительность резания T в мин.		
1	3	0,75	2,25	23	1,0	4,45	1,9
2	3	0,75	2,25	26,5	1,0	3,55	1,57
3	3	0,75	2,25	33	1,0	3,27	1,45

Здесь наблюдается довольно отчетливая картина уменьшения действительной площади по мере увеличения скорости резания. Другими словами, величина пластических деформаций уменьшается с увеличением скорости резания.

Приведенные выше данные, касающиеся деформирования срезаемого слоя, относятся к определенному моменту, т. е. к продолжительности работы резца $T=1$ мин.

Ранее приводились данные, касающиеся изменения указанных деформаций в зависимости от продолжительности работы резца, т. е. состояния его геометрии. В табл. 16 приводятся действительные площади сечения в зависимости от периода работы резца.

Таким образом приходим к выводам, которые были уже нами сделаны, а именно: большие деформации совершаются в первые минуты работы резца; по мере образования лунки на передней грани резца деформации срезаемого слоя уменьшаются и затем, по мере резкого притупления резца, деформации опять

увеличиваются. Можно также сделать заключение, что наиболее опасным периодом работы металлорежущих инструментов являются первые минуты их работы, когда совершается наибольшая деформация срезаемого слоя. Облегчение первых минут аботы инструмента, повидимому, благотворно должно отразиться на его стойкости. Поэтому применение станков с периодически изменяющейся подачей, хотя бы в первые минуты работы инструмента, является целесообразным, а в ряде случаев и необходимым.

Таблица 16

№ обработки	Режим обработки					Действительная площадь сечения стружки f_g в $мм^2$	Коэффициент усадки $K = \frac{f}{f_0}$
	Глубина резания t в $мм$	Подача s в $мм$	Номинальное сечение стружки $f_0 = t \cdot s$ в $мм^2$	Скорость резания v в $м/мин$	Продолжительн. резания T' в мин.		
2	3	0,75	2,25	26,5	1,0	3,55	1,57
4	3	0,75	2,25	26,5	10,0	3,0	1,33
5	3	0,75	2,25	26,5	26,0	2,67	1,18
6	3	0,75	2,25	26,5	37,0	3,17	1,41

Обращает также на себя внимание то обстоятельство, что изменение формы действительных сечений стружек происходит наиболее интенсивно на участке, ближе расположенном к вершине резца, и при некотором накопленном опыте можно по характеру этих изменений следить за интенсивностью износа инструментов.

9. ТЕОРИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ

Современная физика твердого тела¹ трактует, что пластическое деформирование сопровождается двумя конкурирующими процессами: упрочнением и отдыхом, причем под отдыхом понимается снижение или частичное снятие упрочнения с течением времени. Поэтому напряжения в процессе пластического деформирования будут складываться из повышения напряжения вследствие упрочнения и понижения напряжения вследствие отдыха.

Пусть $d\sigma_1$ — повышение напряжения вследствие упрочнения; $d\sigma_2$ — понижение напряжения вследствие отдыха.

Тогда

$$d\sigma = d\sigma_1 + d\sigma_2.$$

Предполагая, что прирост напряжения вследствие упрочнения пропорционален самому напряжению и относительной деформации, получим:

$$d\sigma_1 = b \cdot \sigma \cdot \frac{dl}{l},$$

где b — коэффициент, зависящий от вещества и температуры.

¹ Работы М. А. Большакиной, напечатанные в т. II, Физика твердого тела, В. Д. Кузнецова.

Понижение напряжения вследствие отдыха за промежуток времени dt выразится

$$d\sigma_0 = -a \cdot \sigma \cdot dt,$$

тогда

$$d\sigma = b \cdot \sigma \cdot \frac{dl}{l} = a\sigma dt.$$

Так как скорость деформации может быть выражена зависимостью

$$v = \frac{dl}{l \cdot dt},$$

откуда

$$dt = \frac{dl}{vl},$$

то имеем:

$$d\sigma = b\sigma \cdot \frac{dl}{l} - a \cdot \sigma \cdot \frac{dl}{vl}$$

или

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \left(b - \frac{a}{v}\right) \cdot \frac{dl}{l}.$$

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получим:

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = \left(b - \frac{a}{v}\right) \cdot \int_{l_0}^l \frac{dl}{l}$$

или

$$\ln \sigma - \ln \sigma_0 = \left(b - \frac{a}{v}\right) \cdot (\ln l_0 - \ln l),$$

следовательно,

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{l_0}{l}\right)^{b - \frac{a}{v}}$$

или

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^{b - \frac{a}{v}}. \quad (5)$$

Если допустить $v = \infty$, т. е. резание производится при весьма больших скоростях, то

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^b, \quad (6)$$

т. е. пластические напряжения при резании с большой скоростью стремятся к некоторому стабильному состоянию.

1
Во
работ,
необх

Пр
верхн
котор
ность;
отдел

Пр
ным д
этих
на ре

Пр
косне
зани
талло

1.

Одна
часть
ной и
быва

ряда
от по

може
бота

назо

2.

ней

стру

тыва

назо

С

талл

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

где

10. ТЕПЛОТА И НАРОСТЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛА

Вопросу о наростах был посвящен ряд экспериментальных работ, так как знание причин образования нароста диктовалось необходимостью борьбы с ним.

При чистовой обработке степень гладкости обработанной поверхности будет зависеть от наличия наростов на инструменте, которые не дают возможности инструменту зачищать эту поверхность; поэтому наличие наростов на инструменте при чистовой отделочной операции является всегда нежелательным.

При обдирочной работе наличие наростов не является вредным для качества поверхности, и даже возможно, что наросты в этих случаях до некоторой степени уменьшают действие тепла на резец.

Прежде чем перейти непосредственно к затронутому вопросу, коснемся несколько тепловых явлений, имеющих место при резании металлов. Причины образования тепла при резании металлов следующие:

1. Тепло¹ выделяется при пластическом деформировании. Однако не вся затрачиваемая работа выделяется в виде тепла; часть работы превращается в потенциальную энергию искаженной кристаллической решетке. Эта скрытая энергия деформации бывает различной для различных металлов, но на основании ряда исследований можно утверждать, что она составляет 10—15% от полной работы деформации; в ряде случаев этот процент может быть и выше. Таким образом в срезаемом слое и обработанной поверхности возникает теплота; эту теплоту условно назовем внутренним теплом.

2. Вторая причина—это внешнее трение на передней и задней гранях инструментов. В результате работы стекающей стружки по передней грани и трения задней грани об обрабатываемую поверхность возникает теплота. Эту теплоту условно назовем внешним теплом.

Общее количество теплоты, выделяющейся при резании металлов, складывается следующим образом:

$$Q = Q_{\text{пд.л}} + Q_{\text{т.п}} \pm Q_{\text{т.з}}, \quad (7)$$

где Q — общее количество теплоты;

$Q_{\text{пд.л}}$ — теплота при пластическом деформировании;

$Q_{\text{т.п}}$ — теплота трения стружки о переднюю грань резца;

$Q_{\text{т.з}}$ — теплота трения задней грани резца об обрабатываемую поверхность.

Образовавшееся тепло распространяется в окружающую среду. Большая часть внутреннего тепла идет на нагревание стружки; в частности, тепло переходит и в резец. Следовательно, в зависимости от степени пластичности обрабатываемого металла и величины происшедшего пластического деформирования внутреннее тепло будет различным. Таким образом при обработке хруп-

¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, 1941.

ких материалов внутреннее тепло образуется в незначительных количествах по сравнению с пластичными металлами.

При обработке пластичных металлов часть тепла, образующегося в стружке, на передней и задней гранях резца направляется в головку резца. В этих случаях большая часть тепла направляется в резец через переднюю грань. При обработке же малопластичных хрупких металлов перехода тепла от стружки в переднюю грань резца ожидать не приходится. Таким образом в резец переходит лишь тепло от работы внешнего трения, причем следует ожидать образования большего количества тепла на задней грани, чем на передней. Причины здесь следующие: при обработке малопластичных, хрупких металлов имеют место стружки надлома, которые соприкасаются с резцом прерывисто, по мере их образования. Благодаря стружкам надлома обработанная поверхность делается шероховатой, что вызывает большое трение на задней грани. Наблюдения за износом инструментов при обработке, например чугуна, показали, что задняя грань их изнашивается больше, чем передняя. Тепло, притекающее в инструмент постепенно, в нем аккумулируется, вследствие этого повышается температура инструмента, что приводит к потере его твердости и еще более интенсивному износу.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что напряженность тепловых потоков в процессе резания не остается постоянной, а изменяется. Это обусловлено следующими явлениями: работа пластических деформаций в каждый данный момент изменяется, возрастая от некоторого минимума до максимума для каждого срезаемого (сдвигаемого) элемента. Работа внешнего трения также изменяется по мере продолжительности службы инструмента, потому что меняется характер соприкасающихся поверхностей; следовательно, меняется коэффициент трения. Изменению коэффициента трения способствует также изменение температур соприкасающихся поверхностей. Таким образом тепловыделение рисуется следующим образом.

В деформируемых слоях металла выделяется тепло, изменяя свою напряженность в интервалах сжатия каждого последующего элемента и несколько изменяя свое количество, поскольку изменяется геометрия инструмента в процессе резания. Теплота работы трения постоянно возрастает, и эта теплота главным образом и влияет на режущие свойства инструмента.

В области исследования теплоты, возникающей при резании, было проделано много работ¹, но мы этот вопрос затронули лишь в общих чертах, в связи с дальнейшим рассмотрением процесса наростообразования.

Работа трения

Выше упоминалось о той роли, которую играет работа трения при резании металлов. Для различного рода подсчетов возникает необходимость в оценке работы трения. Поэтому

¹ Усаचेv, „Вестник инженеров“ № 1, 1916; Саввиц, „Вестник О-ва технологов“, 1909; Гатвейн, Die Messung der Schneiden temperatur beim Abreihen

Вих
ю-
ла-
ла
ке
ки
а-
я,
та
е:
ю
о,
о-
е
в
о
э

воснемся основных параметров этой работы и, хотя бы прибли-
женно, установим значение коэффициента трения при резании ме-
таллов.

Работа трения на передней грани резца может быть выра-
жена следующим образом:

$$A_{т.п.г} = \frac{P \cdot \mu \cdot v}{60} \text{ кгм/сек.} \quad (8)$$

Работа трения на задней грани

$$A_{т.з} = \frac{P_1 \mu_1 v}{60} \text{ кгм/сек.} \quad (9)$$

где P и P_1 — нормальные усилия соответственно на передней
и задней гранях резца;

μ и μ_1 — коэффициенты трения;

v — скорость резания.

Поставленная выше задача для более или менее точного своего
разрешения является с физико-математической стороны весьма
сложной¹. Начиная с XV века, когда впервые Леонардо-да-Винчи
пытался установить коэффициент трения, и до наших дней, изуче-
нием вопросов трения и износа в машинах занимаются не только
отдельные экспериментаторы, но и научно-исследовательские
институты. Но этот вопрос и в настоящее время еще не имеет
полной ясности, так как работа трения сопровождается сложным
физическим процессом.

Особенно в сложных условиях протекает работа трения при
резании. Поверхности трения не остаются постоянными, а не-
прерывно изменяются. Продукты трения при сухом резании не
удаляются; при смазке это удаление можно считать лишь ча-
стичным. На поверхностях трения развиваются высокие темпе-
ратуры (300, 400° и более). На передней грани любых инстру-
ментов имеют место так называемые наросты, которые также
меняют и поверхность соприкосновения и условия течения
стружки, да и сами наросты непрерывно изменяются с измене-
нием условий резания. Словом, если в идеальных условиях, в
которых протекают эксперименты, при изучении законов трения
пока не представляется возможным дать количественную оценку
различного рода параметрам, то при резании это и подавно на
сегодня не представляется возможным. Вследствие этого силы

von Flusselsen, „Maschinenbau“, 1925 — 1926; Герберт, „Proceedings of the
Mech. Ing.“ 1926; Воксен, „Tools Proceedings“, Стокгольм 1932; Рейхель,
Das Temperaturfeld beim Zerspannen, „Maschinenbau“, 1936; Клейн, W. T. Heft
21, 1937; Клущин, Закон постоянства стойкости резца; Беспрованникий,
Физические основы теории резания металлов.

¹ Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах, т. I и II, изд.
АН СССР, 1940, а также „Трение и износ в машинах“, т. I, 1941, Инсти-
тута машиноведения АН СССР и В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела,
т. I.

трения, возникающие на гранях инструмента, мы будем рассчитывать приближенно по формуле:

$$T = \mu P, \quad (10)$$

где μ — коэффициент трения;
 P — сила, перпендикулярная поверхности трения,

или

$$T = \mu \sigma f, \quad (11)$$

где f — площадь соприкосновения двух трущихся поверхностей
в мм^2 ;
 σ — давление, прижимающее трущиеся тела друг к другу,
в кг/мм^2 .

На основании анализа имеющихся в литературе материалов по трению и износу коэффициент трения мы оцениваем следующими числами:

- 1) при обработке сталей всухую $\mu = 0,42$;
- 2) при обработке сталей со смазкой $\mu = 0,38$;
- 3) при обработке чугуна всухую $\mu = 0,38$ на передней грани и $\mu = 0,45$ на задней грани резца.

Многочисленные наблюдения над износом инструментов в процессе резания позволяют совершенно твердо сказать, что при обработке пластичных металлов резцами из быстрорежущей стали и из сталей-заменителей главная работа трения происходит на передней грани. Работа трения на задней грани составляет лишь часть этой работы. Можно установить, что при обработке пластичных металлов износ по задней грани составляет 15—00% от износа по передней грани, т. е. $T_1 = 0,2T$.

Процесс наростообразования

Первоначально полагали, что нарост состоит из мельчайших частиц металла (соскобленных резцом с обработанной поверхности), которые, будучи спрессованы стекающей стружкой в виде комочка металла, привариваются на передней грани резца¹. Дальнейшее исследование под микроскопом нароста и отдельных стадий его образования привело к следующему заключению:

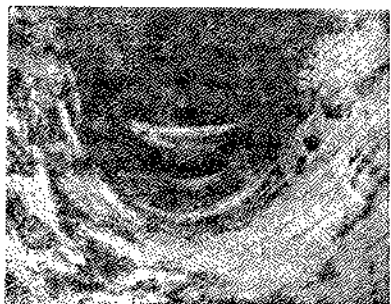
- 1) нарост не является скоплением частиц, а представляет собой застой металла при его деформировании²;
- 2) нарост целесообразен, так как он стремится к уменьшению угла резания;

3) образование нароста на резце является тем условием, при котором процесс совершается с наименьшей затратой энергии³. Приведенные здесь отдельные положения вытекают как будто из рассмотрения следующих картин: на фиг. 86 представлен застой металла, получающийся при вдавливании пуансона в угле-

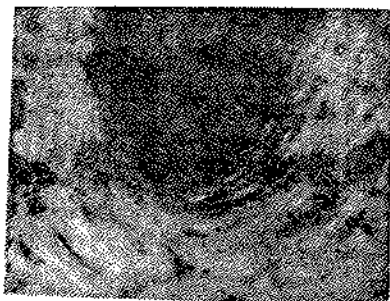
¹ Те й л о р, Искусство резать металлы; Р и п е р и Б а р л и, Cutting power of the turning, „Engineering“, 1913, а также „Proceedings of Inst. Mech. Eng.“, 1913; „Machinery“, 1914.

³ У с а ч е в, „Вестник инженеров“ № 1, 1916.

родистую сталь, причем пуансон не имел закругления концов, на фиг. 87 представлен процесс вдавливания пуансона с закругленным концом, вследствие чего застоя не замечается.

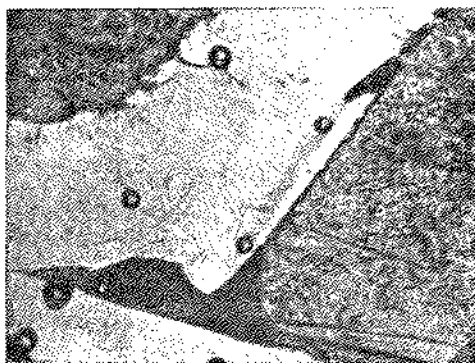


Фиг. 86.



Фиг. 87.

Представленные фигуры касались обработки машиноподелочной стали, и исследования эти относятся к 1912 г. Результаты позднейших исследований (1928 г.) по внешнему виду весьма напоминают предыдущие¹. Так, на фиг. 88 представлена одна из стадий образования элемента стружки с наличием большой опережающей трещины; на фиг. 89 представлены последующие стадии с наличием уже нароста.



Фиг. 88.



Фиг. 89.

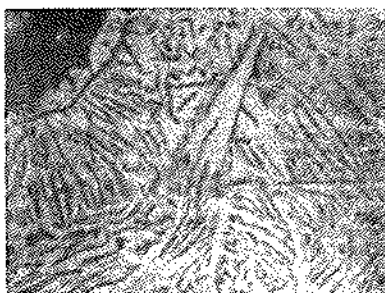
Согласно этим данным¹ схема образования наростов рисуется в следующем виде: у вершины резца образуется широкая трещина; часть стружки, прилегающей к передней грани, задерживаясь трением, начинает спрессовываться в твердый слой, струж-

¹ Герберт, „Proceedings of the Inst. of Mech. Eng.“ № 4, Лондон, 1928.

тура которого одинакова со структурой стружки. Нарост имеет форму треугольной призмы и характеризуется наибольшим упрочнением. Таким образом резание производится при помощи этого нароста. На фиг. 90 и 91 показано уменьшение нароста в зависимости от угла резания¹. Согласно этим исследованиям

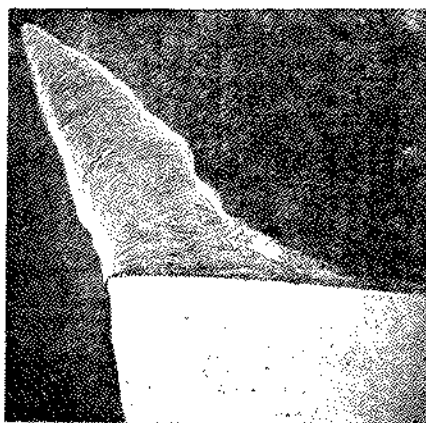


Фиг. 90.



Фиг. 91.

нарост, названный „деформированной зоной стружки“, отсутствует при угле резания в 60° и образуется при углах резания больше 60° . Для иллюстрации того, что невыгодный угол резания вызывает образование большого нароста, приводится фиг. 92 при обработке алюминия² резцом с углом резания 90° . Как видно из



Фиг. 92.

этой фигуры, нарост дал возможность резцу образовать передний угол примерно 45° , т. е. таких размеров, при которых обычно совершается резание алюминия.

Засъемки, произведенные при помощи высокочастотной камеры, дают возможность установить следующую схему образования и схода наростов³ (фиг. 93). Этими же исследованиями установлено, что, начиная с определенной скорости резания, характерной для каждого обрабатываемого металла, наросты не образуются. На фиг. 94 показаны отдельные моменты процесса резания в случае обработки углеродистой стали $\sigma_b = 41 \text{ кг/мм}^2$,

из которых видно, что, начиная со скорости резания $v = 48,2 \text{ м/мин}$, наросты не образуются. Вследствие этого обработанная поверх-

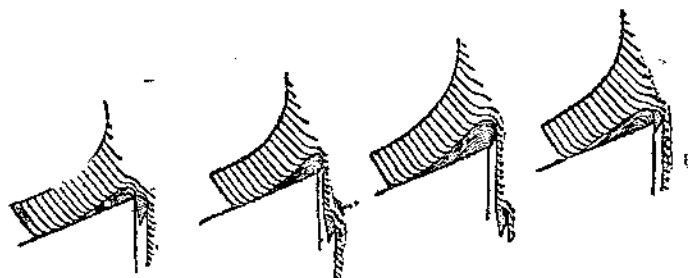
¹ Розенгейн и Стэрней, „Proceedings of the Inst. of Mech. Eng.“, Лондон, 1925.

² Эрикс, „Machining of Metals“, 1931.

³ Шверд, „Stahl und Eisen“ № 16, 1931.

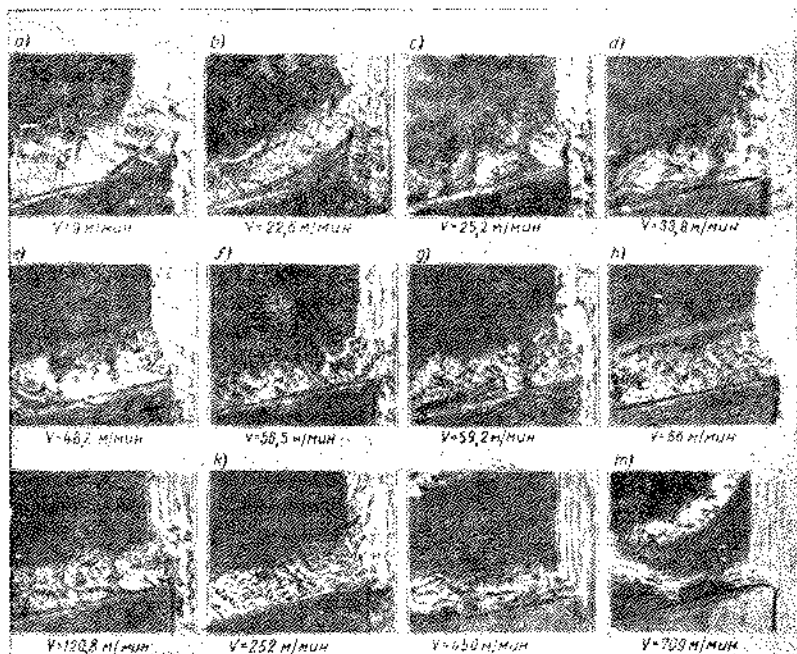
ность лучше зачищается резцом, приобретая большую степень гладкости¹ (фиг. 95).

Мы здесь привели исследования, достаточно уже известные в области резания металла и касающиеся образования наростов²,



Фиг. 93.

добавив в некоторых случаях лишь новый иллюстративный материал. Если подытожить результаты, то природа образования наростов по данным различных исследований сводится к следующему:



Фиг. 94.

¹ Шверд, „Stahl und Eisen“ № 16, 1931.

² В. А. Кривоухов, Резание металлов; Глебов, Теория наимыгоднейшего резания металлов; Резников, Теория резания металлов, и др.

1) наросты — мелкие частицы металла, спрессованные и приварившиеся к передней грани резца (Тейлор, Риппер);

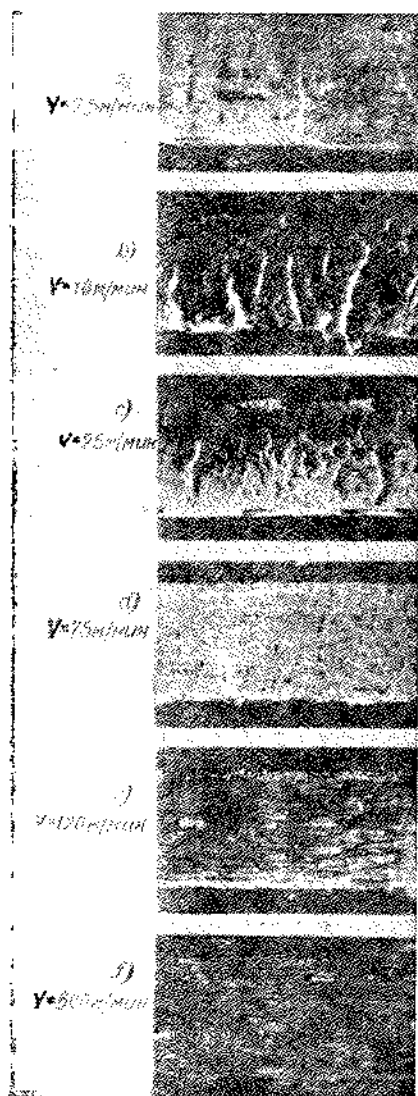
2) наросты — застой металла во время его деформации, образующийся всегда, если форма резца не соответствует условиям резания (Усачев);

3) наросты — часть стружки, задерживаемой на резце трением о переднюю грань и спрессованной в твердый слой (Герберт);

4) наросты — деформированная зона металла, прилипшего к передней грани резца. При некоторой геометрии резца наросты не образуются (Розенгейн, Эрнст);

5) наросты периодически образуются и, образуясь, они частично сходят со стружкой, частично с изделием. При определенных скоростях резания наросты не образуются, благодаря чему поверхность обработки делается чище (Шверд).

Если первые объяснения природы наростов (Тейлор, Риппер) вытекают только из внешнего осмотра инструмента, а не из наблюдения процесса резания, то последующие объяснения и наблюдения (Усачев, Герберт, Розенгейн, Эрнст, Шверд) сделаны на основе рассмотрения процесса резания. Но все же нельзя полностью согласиться ни с одним из приведенных выше объяснений. Если рассматривать нарост как «застой металла во время его деформации, образующийся всегда, если форма резца не соответствует условиям резания» (Усачев), то, с одной стороны, имеются полные подтверждения этому мнению (фиг. 90, 91, 92), с другой же стороны, имеются и полные опровержения сказанного, а именно: при больших скоростях наросты

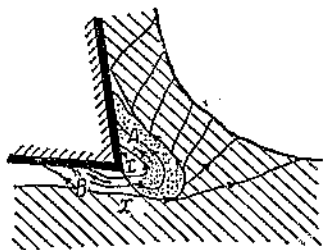


Фиг. 95.

отсутствуют, что следует из фиг. 94. Следовательно, это объяснение не соответствует в полной мере явлениям резания. Последующие объяснения (Герберт, Розенгейн, Эрнст, Шверд) не стремятся, в буквальном смысле, вскрыть причины образования наростов,

а ограничиваются лишь констатацией фактов и анализом отдельных явлений процесса наростообразования.

Используя материалы по наростообразованию, приводившиеся выше, а также учитывая аналогичные явления из области пластических деформаций, Шмальц предложил следующую гипотезу¹: соответственно проникновению обеих граней резца в обрабатываемый металл образуется листовидное тело сжатия и, так же как при вдавливании штемпеля в пластичное тело², возникает стремление к выдавливанию пластически деформируемого листовидного тела сжатия, с одной стороны, вдоль передней грани резца по стрелке *A*, с другой стороны, в направлении задней грани по стрелке *B*, что показано на фиг. 96. При продвижении лезвия все новые частицы материала будут пластически деформироваться и упрочняться. Когда листовидное тело примет такую форму, при которой действующие на него силы заставят его разъединиться на две части, то обе части двинутся в направлении передней и задней граней резца, большая из них — по передней грани и меньшая — по задней грани. Этот процесс протекает периодически, причем трение между гранями резца и листовидным телом стремится удерживать последнее на резце. Применяемая при резании смазка, уменьшая трение, уменьшает и эти возможности. Для образования наростов требуется некоторый минимум времени, поэтому



Фиг. 96.

при малых скоростях резания наросты образуются, при больших — не образуются. Если скорость деформации отдельных зерен структуры имеет ту же порядковую величину, что и скорость движения резца, то наросты имеют место; если же это условие не соблюдено, то наросты не образуются.

Приведенная выше гипотеза все же в полной мере не охватывает всех явлений наростообразования. Согласно нашим исследованиям, нарост не образуется при резании пластичных металлов, когда имеет место элементная стружка. Только при наличии стружек непрерывных — суставчатых или сливных — наросты образуются, причем для каждого обрабатываемого металла имеются такие интервалы скоростей резания, когда наростообразование происходит интенсивно; вне этих интервалов и при более высоких скоростях резания наростообразование уже не имеет места. Если производить одновременно замер усилий, замер колебаний упругой системы, участвующей в процессе резания, замер температур на резце, то при всех интервалах скоростей резания показания будут изменяться в зависимости от состояния наростов, а именно: горизонтальная составляющая усилия резания будет повышаться, амплитуда колебания будет

¹ Г. Шмальц, Качество поверхности, 1941.

² Прандтль, „Z. angew. Math. Mech.“, Bd. 1, 1921.

увеличиваться и кривые температур на резце будут в этот период наростообразования иметь незначительные повышения, несмотря на большую работу трения на передней и задней гранях резца. Даже тангенциальная составляющая (P_2) — усилие резания — будет повышаться при увеличении наростообразования, если работать с небольшими стружками.

Наше мнение сводится к следующему: нарост состоит из материала, соскобленного резцом с обработанной поверхности и со срезаемого слоя. Шероховатость образуется, потому что при резании пластичных материалов имеет место разрыв в направлении движения резца (опережающая трещина). Непременным условием образования нароста является непрерывность стружки. Накапливающийся на передней грани ком металла спрессовывается стекающей стружкой, прилипает к передней грани под действием тепла и сил трения и принимает обтекаемую форму согласно форме течения стружки относительно передней грани резца.

При повышении скорости резания повышается предел текучести, вследствие чего деформация металла уменьшается (это обстоятельство нами было показано ранее). Поэтому сдвиг отдельных элементов относительно друг друга уменьшается, стружка из суставчатой формы переходит в сливную, разрыв в направлении движения резца (опережающая трещина) уменьшается, доходя при сливных стружках до мельчайших размеров. Обработанная поверхность и поверхность стружки, прилегающие к резцу, делаются более гладкими, и на передней грани резца кома металла не наблюдается. Но это не значит, что передняя и задняя грани инструментов будут абсолютно чистыми; с течением времени грани будут изношены, на них появятся и приварившиеся частицы — продукт работы трения, и частицы металла, соскобленные в незначительных количествах с обработанной поверхности — то, что обычно называют налипками.

Объяснения причин образования наростов, которые мы изложили, следуют из рассмотрения явлений процесса резания, воспринятого нами при рассмотрении киноленок, которые нам удалось сделать в процессе наших исследований. Здесь уделялось достаточное внимание явлениям наростов, потому что наросты, являясь производной процесса пластического сжатия при резании, в то же самое время сами оказывают большое влияние на процесс пластического деформирования.

III. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ РАБОТЫ РЕЗАНИЯ

1. УПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ

Работа упругих деформаций имеет весьма простое выражение, так как изменение удлинений (δ) в зависимости от усилий (P) происходит по закону прямой линии.

Следовательно, работа будет представлять собой площадь треугольника, а именно:

$$A_y = \frac{P \cdot \delta}{2}, \quad (12)$$

но так как

$$\delta = \frac{P \cdot l}{E \cdot F},$$

то работа упругого деформирования

$$A_y = \frac{P^2 l}{2EF}. \quad (13)$$

Удельная работа упругих деформаций будет иметь следующий вид¹:

$$a_y = \frac{P^2 l}{2E \cdot F \cdot Fl} = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (14)$$

где σ — допускаемое напряжение в $кг|мм^2$;

E — модуль упругости в $кг|мм^2$.

Работа упругих деформаций в процессе резания совершается в весьма незначительный промежуток времени, после которого уже следует работа пластических деформаций, совершающаяся в отрезок времени, во много раз больший, чем первый.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ СЖАТИИ МЕТАЛЛОВ

При свободном сжатии образца законы пластического сжатия могут быть выражены уравнением политропы, а именно²

$$P \cdot h^m = C, \quad (15)$$

где P — нагрузка на образец, под действием которой он получает остающуюся высоту h ;

C — некоторая константа;

m — показатель степени, зависящий от скорости деформации, от способности металла воспринимать упрочнение и от отношения длины образца к его первоначальной форме.

Как пример, в табл. 17 приведены значения показателя степени m в случае сжатия образцов из железа при одной длине образца и одной и той же площади поперечного сечения.

В двойной логарифмической сетке кривая сжатия имеет две ветви (фиг. 97): прямолинейную AB и криволинейную AC . Показатель степени m представляет собой тангенс угла наклона линии AB . Постоянную в формуле (15) возможно определить, если продолжить прямую AB до пересечения с ординатой, соответствующей $\lg h_0$, где h_0 — начальная высота образца. Пря-

¹ С. П. Тимошенко, Сопроотивление материалов, ч. 1.

² М. А. Большанина, Пластическое сжатие, т. II; В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела.

мая AB отсекает на ординате отрезок, обозначенный через $\lg P_0$. Применяя к точке D уравнение политропы, получим

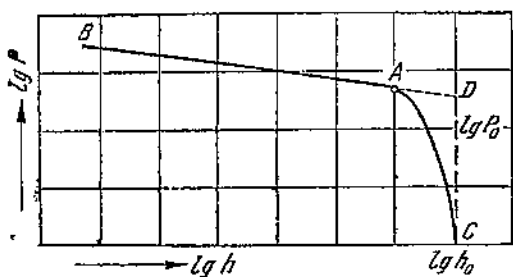
$$P_0 \cdot h_0^m = C,$$

следовательно

$$P \cdot h^m = P_0 h_0^m = C. \quad (16)$$

Очевидно, что P_0 есть та нагрузка, начиная с которой появились бы первые остаточные деформации, если бы уравнение (16) было справедливо с самого начала сжатия. Заменяя усилие через напряжение, получим:

$$\sigma \cdot F \cdot h^m = \sigma_0 \cdot F_0 \cdot h_0^m;$$



Фиг. 97.

Таблица 17

Форма сечения	Показатель степени m
Круг	1,44
Квадрат	1,45
Прямоугольник	1,44

из условия постоянства объема, а именно,

$$F \cdot h = F_0 \cdot h_0 = V_0 = \text{const}$$

имеем

$$\sigma \cdot V \cdot h^{m-1} = \sigma_0 V_0 h_0^{m-1}$$

или

$$\sigma \cdot h^n = \sigma_0 h_0^n, \quad (17)$$

где $n = m - 1$.

Обозначая деформацию сжатия через

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0},$$

получим

$$h = h_0(1 - \varepsilon)$$

или

$$\sigma(1 - \varepsilon)^n = \sigma_0 = \text{const}. \quad (18)$$

Обозначив через ψ относительное увеличение площади поперечного сечения при сжатии образца, получим

$$\frac{\sigma}{1 + \psi^n} = \text{const}. \quad (19)$$

Таким образом сложный процесс пластического сжатия получает математическое выражение, вытекающее непосредственно

из опытов, так же как и закон Гука для упругого деформирования.

На основании полученных закономерностей уже не представляет труда аналитически подсчитать работу, затрачиваемую на пластическое сжатие,

$$A = \int_{h_1}^{h_2} P \cdot dh; \quad (20)$$

так как

$$P \cdot h^m = P_1 h_1^m = P_2 h_2^m = C,$$

то

$$P = \frac{C}{h^m},$$

а следовательно,

$$A = \int_{h_1}^{h_2} \frac{C \cdot dh}{h^m} = \frac{C(h_2^{1-m} - h_1^{1-m})}{1-m}.$$

Подставляя вместо C значение $P_1 h_1^m$ и $P_2 h_2^m$, получим

$$A = - \frac{P_2 h_2 - P_1 h_1}{m-1}. \quad (21)$$

Знак (—) указывает на работу сжатия. Таким образом при сжатии в области пластических деформаций работа может быть подсчитана по уравнению (21).

Так как уравнение доплитропической кривой неизвестно, то для вычисления работы на оставшейся части прибегают к следующему приему.

Если назвать через A_p^1 работу, которая потребовалась бы, если бы с самого начала сжатия имел место политропический закон, то истинная работа A_p выразилась бы

$$A_p = x A_p^1, \quad (22)$$

где x — коэффициент полноты, следовательно,

$$A_p = \frac{x}{m-1} \cdot (P_p h_p - P_0 h_0).$$

Сумма работ равна

$$A = \frac{1}{m-1} \cdot [P \cdot h - P_p \cdot h_p] + \frac{x}{m-1} \cdot [P_p h_p - P_0 h_0].$$

Обозначив

$$\delta = \frac{h_0}{h}; \quad \delta_p = \frac{h_0}{h_p},$$

а также $n = m - 1$, после преобразования получим:

$$A = \frac{P_0 \cdot h_0}{n} \cdot [\delta^n - (1-x) \delta_p^n - x]. \quad (23)$$

по
а
де
пе

сс
у
п
с

Отметим еще ряд положений, имеющих большое значение при пластической деформации металлов, и в первую очередь влияние скорости деформации на механические свойства металлов. Под скоростью пластической деформации можно понимать скорость, с которой возрастают напряжения в $кг/мм^2$ в 1 сек. или скорость увеличения деформации в $мм/сек$. Многочисленными исследованиями¹ установлено, что напряжения возрастают при увеличении скорости деформации и что упрочнение испытываемых образцов увеличивается. Объяснения этим явлениям надо искать в следующем.

При пластическом деформировании имеет место упрочнение, как отмечалось ранее, и отдых, сводящийся к частичному снятию упрочнения. Таким образом в наличии имеются два противоположных фактора. Если два образца деформируются до одной и той же степени деформации, но скорости деформации одного v_1 , скорости другого v_2 , причем $v_1 > v_2$, то упрочнение должно быть неодинаковым, а именно: при меньшей скорости v_2 отдых успевает произойти, а потому упрочнение будет меньше. Но по всей вероятности имеются такие пределы скоростей, когда отдых вообще не может уже успевать действовать и, таким образом, не может оказать какого-либо существенного влияния на снятие упрочнения. Показатель политропы сжатия зависит от скорости деформации, а именно:

$$n = b - \frac{a}{v}, \quad (24)$$

где $n = m - 1$;

- b — характеристика металла к упрочнению;
- a — способность к отдыху;
- v — скорость деформации.

Для сравнения работы деформаций имеет значение термин „удельная работа деформации“, т. е. работа, приходящаяся на единицу объема,

$$\alpha_v = \frac{A}{V_0},$$

где

$$V_0 = F_0 h_0.$$

Если разделить выраженное формулой (23) на V_0 , то получим

$$\alpha_v = \frac{\sigma_0}{n} \cdot \left[\delta^n - (1-x) \cdot \delta_p^n - x \right]. \quad (25)$$

Изложенные выше законы пластического сжатия относились к свободному образцу. Но оказывается, что при сжатии несвободного образца также имеет место закон политропы.

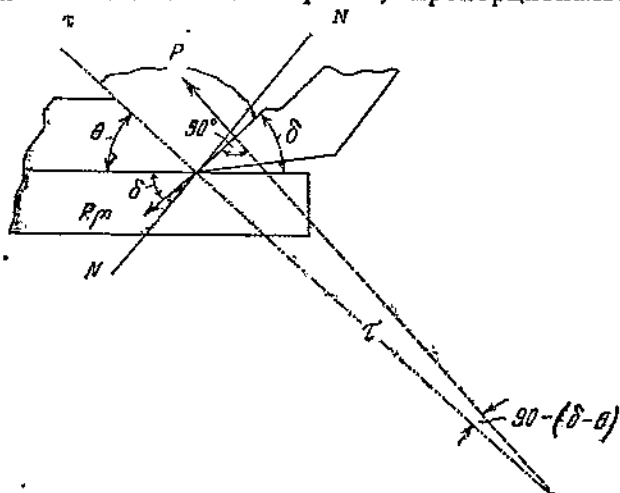
Для того чтобы воспользоваться уравнениями упругого и пластического деформирования для определения работ упругого и пластического сжатия при резании металлов, необходимо знать

¹ Шмидт, Людвик, Поляни, Максвелл и др.

положение плоскости скальвания (сдвига) в процессе резания, а также длину (высоту) элемента стружки h_s , подвергающуюся деформированию. К определению указанных факторов мы теперь и приступим.

3. ПОЛОЖЕНИЕ ПЛОСКОСТИ СКАЛЫВАНИЯ (СДВИГА) ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Исследования показывают, что направление линий Людерса составляет с направлением действия силы угол не 45° . Этот угол меньше при растяжении и больше при сжатии. Согласно предположению, что в поликристаллическом теле в плоскости скольжения возникают силы трения, пропорциональные нор-



Фиг. 98.

мальному давлению¹, получится, что тангенциальное напряжение в случае растяжения является как разность напряжения течения τ_s и трения $\mu_1 \sigma_n$. Для сжатия же имеем:

$$\tau = \tau_s + \mu_1 \sigma_n \quad (26)$$

или

$$\tau_s = \tau - \mu_1 \sigma_n \quad (27)$$

Проектируя силы, согласно фиг. 98, на направление плоскости скальвания и на направление, ей перпендикулярное, получим:

$$\begin{aligned} n p_{\tau} = \tau(P) + n p_{\tau} = \tau(P \cdot \mu) = F_{\tau} = \tau \cdot \tau_s + \mu_1 [n p_N = N \cdot P + \\ + n p_N = N \cdot (P \cdot \mu)], \end{aligned} \quad (28)$$

где μ — коэффициент трения на передней грани резца и μ_1 — коэффициент трения в плоскости скальвания.

В правой части равенства сложены усилия от возникающего напряжения и трения в плоскости $N-N$.

¹ По Л ю д в и к у.

Назвав

$$P_{\tau} = n p_{\tau-\tau}(P) + n p_{\tau-\tau}(P \cdot \mu)$$

и

$$P_N = n p_{N-N}(P) + n p_{N-N}(P \cdot \mu),$$

получим:

$$\begin{aligned} P_{\tau} &= P \cdot \cos [90 - (\delta + \theta)] + P \cdot \mu \cos (\delta + \theta) = \\ &= P \cdot [\sin (\delta + \theta) + \mu \cdot \cos (\delta + \theta)]; \\ P_N &= [P \cdot \mu \cdot \sin (\delta + \theta) - P \cdot \cos (\delta + \theta)] = \\ &= P [\mu \cdot \sin (\delta + \theta) - \cos (\delta + \theta)]. \end{aligned}$$

Так как

$$F_{\tau-\tau} = \frac{a \cdot b}{\sin \theta},$$

то имеем:

$$\begin{aligned} \tau_s \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \theta} + \mu_1 P [\mu \cdot \sin (\delta + \theta) - \cos (\delta + \theta)] = \\ = P [\sin (\delta + \theta) + \mu \cdot \cos (\delta + \theta)]. \end{aligned}$$

Разделив обе части равенства на $\frac{a \cdot b}{\sin \theta}$, получим:

$$\begin{aligned} \tau_s = \frac{\sin \theta \cdot P}{a \cdot b} \cdot [\sin (\delta + \theta) + \mu \cdot \cos (\delta + \theta) - \mu \cdot \mu_1 \cdot \sin (\delta + \theta) + \\ + \mu_1 \cdot \cos (\delta + \theta)] \end{aligned}$$

или

$$\tau_s = \frac{\sin \theta \cdot P}{a \cdot b} [(1 - \mu \cdot \mu_1) \cdot \sin (\delta + \theta) + (\mu + \mu_1) \cdot \cos (\delta + \theta)]. \quad (29)$$

Находим τ_{\max} путем дифференцирования уравнения (29), а именно:

$$\begin{aligned} (1 - \mu \cdot \mu_1) \cdot \cos \theta \cdot \sin (\delta + \theta) + (\mu + \mu_1) \cdot \cos (\delta + \theta) \cdot \cos \theta + \\ + (1 - \mu \cdot \mu_1 \sin \theta \cdot \cos (\delta + \theta) - (\mu + \mu_1) \cdot \sin \theta \cdot \sin (\delta + \theta) = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$(1 - \mu \cdot \mu_1) \cdot \sin (\delta + 2\theta) = -(\mu + \mu_1) \cdot \cos (\delta + 2\theta)$$

или

$$\operatorname{tg} (\delta + 2\theta) = -\frac{\mu + \mu_1}{1 - \mu \cdot \mu_1}, \quad (30)$$

Так как

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha \quad \text{и} \quad \mu_1 = \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$\operatorname{tg} (\delta + 2\theta) = -\frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha_1}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} (\delta + 2\theta) = -\operatorname{tg} (\alpha + \alpha_1),$$

вследствие чего

$$\delta + 2\theta = 180 - (\alpha + \alpha_1),$$

поэтому

$$\theta = 90 - \frac{\alpha + \alpha_1 + \delta}{2}. \quad (31)$$

Допустив, что $\mu = \mu_1$, а следовательно, $\alpha = \alpha_1$, получим

$$\theta = 90 - \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right). \quad (32)$$

Так как угол скалывания (Δ) равен:

$$\Delta = 180 - \theta,$$

то окончательно имеем

$$\Delta = 90 + \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right), \quad (33)$$

где α — угол трения;
 δ — угол резания.

4. ДЛИНА (ВЫСОТА) ЭЛЕМЕНТА h_0 , ПОДВЕРГАЮЩЕГОСЯ СЖАТИЮ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

Если резец пройдет по обработанной поверхности путь L , и при этом будет срезано (сдвинуто) m_s элементов, то длина полученной стружки, согласно фиг. 99, выразится:

$$L = a_1 \cdot m_s. \quad (34)$$

Так как

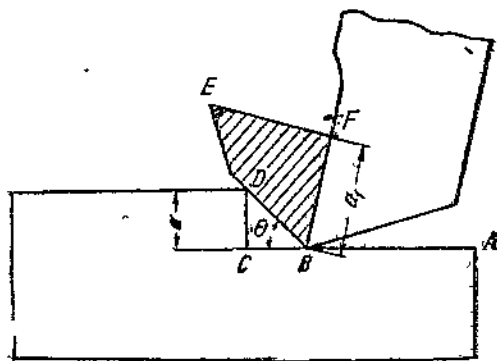
$$\frac{a_1}{a} = K,$$

где K — коэффициент усадки, то

$$L = a \cdot K \cdot m_s. \quad (35)$$

С другой стороны,

$$K = \frac{L_0}{L},$$



Фиг. 99.

откуда

$$L_0 = K \cdot L,$$

поэтому

$$L_0 = K^2 \cdot a \cdot m_s. \quad (36)$$

Отсюда путь резца, приходящийся на 1 элемент (l_0), выразится

$$l_0 = \frac{L_0}{m_s} = K^2 \cdot a. \quad (37)$$

Согласно фиг. 99 имеем:

$$h_0 = AB + BC,$$

но

$$AB = l_0 = K^2 \cdot a$$

$$BC = \frac{a}{\operatorname{tg} \theta},$$

поэтому

$$h_0 = K^2 \cdot a + \frac{a}{\operatorname{tg} \theta} = a \cdot \left(K^2 + \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \right). \quad (38)$$

Так как было показано, что

$$\theta = 90 - \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right),$$

то

$$h_0 = a \cdot \left[K^2 + \frac{1}{\operatorname{tg} \left[90 - \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right]} \right] \quad (39)$$

или

$$h_0 = a \cdot \left[K^2 + \operatorname{tg} \cdot \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right], \quad (40)$$

где a — толщина срезаемого слоя в мм;

K — коэффициент усадки;

α — угол трения, равный 22° ;

δ — угол резания.

Полученное уравнение (40) и будет в дальнейшем использовано для подсчета работы упругого и пластического деформирования при резании металлов.

Если допустить при обработке сталей средней твердости $\delta = 75^\circ$, $\mu = 0,40$, а следовательно, $\alpha = 22^\circ$, то получим:

$$h_0 = a \cdot (1,7 + K^2). \quad (41)$$

При $K = 2$ (некоторое среднее значение) получим:

$$h_0 = 5,7 \cdot a. \quad (42)$$

5. ПОДСЧЕТ РАБОТЫ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В СРЕЗАЕМОМ СЛОЕ

Ранее указывалось, что работа упругого деформирования может быть подсчитана по уравнению (13), а именно:

$$A_y = \frac{P^2 \cdot l}{2E \cdot F}.$$

Подставляя в указанное выражение вместо P его значение

$$P = a \cdot b \cdot \sigma,$$

где a — толщина срезаемого слоя в мм;

b — ширина того же слоя в мм;

σ — допускаемое напряжение в кг/мм²,

а также вместо l его значение по уравнению (40), т. е.

$$l = h_0 = a \cdot \left[K^2 + \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right],$$

получим

$$A_y = \frac{P^2 \cdot l}{2E \cdot F} = \frac{(\sigma \cdot a \cdot b)^2 \cdot a \cdot \left[K^2 + \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right]}{2E \cdot a \cdot b}$$

или

$$A_y = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot a^2 \cdot b \left[K^2 + \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right]. \quad (43)$$

Уравнение (43) может быть использовано для подсчета упругих деформаций в срезаемом слое. Покажем на примере эту возможность, а также и то, что работой упругих деформаций при резании пластических металлов вполне можно пренебрегать.

Пример. Обрабатывается сталь 1045, причем $a = 4$ мм, $b = 4$ мм, $\delta = 75^\circ$, $K = 2$, $\sigma = 25$ кг/мм², $E = 20\,000$ кг/мм²,

тогда $A_y = \frac{25^2}{2 \cdot 20\,000} \cdot 16 \cdot 4 [4 + 1,7] = 5,7$ кгмм,

т. е. абсолютная величина работы упругих сил столь незначительна при заданном весьма большом сечении стружки ($f = 4 \times 4 = 16$ мм²), что этой работой можно пренебрегать. По отношению же к работе пластического деформирования, что будет явствовать из последующего примера, работа упругого деформирования играет ничтожную роль.

6. ПОДСЧЕТ РАБОТЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ В СРЕЗАЕМОМ СЛОЕ

Работа пластического сжатия выражается уравнением (23), т. е.

$$A_{пл} = \frac{P_0 \cdot h_0}{n} \cdot [\delta^n - (1-x) \cdot \delta_p^n - x].$$

Так как было показано, что работа упругих деформаций ничтожна, то отношение

$$\delta_p = \frac{h_0}{h_p}$$

без особого ущерба для точности вычисления возможно приравнять единице, т. е.

$$\frac{h_0}{h_p} = 1.$$

Значение (x) — коэффициента полноты возможно оценить

$$x = 0,7,$$

тогда уравнение (23) примет вид:

$$A_{пл} = \frac{P_0 \cdot h_0}{n} \cdot [K^n - 1], \quad (44)$$

где P_0 — нагрузка, начиная с которой появлялись бы первые остаточные деформации, если бы уравнение политропы $P \cdot h^n = C$ было справедливо с самого начала сжатия;

h_0 — первоначальная высота;

$K = \frac{L_0}{L} = \frac{a_1}{a}$ — коэффициент усадки;

$n = m - 1$, где m — показатель политропы сжатия.

Если металлы непластичны (хрупкие), то можно принять

$$K = 1,$$

тогда

$$A_{пл} = 0,$$

т. е. при обработке хрупких металлов можно пластическим сжатием пренебречь.

Пример. Обрабатывается сталь 1045, причем $a = 4$ мм, $b = 4$ мм, $\delta = 75^\circ$, $K = 2$, показатель политропы сжатия $m = 1,4$, т. е. $n = m - 1 = 0,40$.

Определим работу пластического сжатия

$$P_0 = \sigma_0 f = \sigma_0 \cdot a \cdot b \text{ кг},$$

где σ_0 — условный предел текучести (для стали 1045 $\sigma_0 = 40$ кг/мм²)

$$h_0 = a \cdot \left[K^2 + \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right] = 5,7 \cdot a = 22,8 \text{ мм},$$

где $K = 2$;

$$\alpha = 22^\circ;$$

$$\delta = 75^\circ,$$

тогда

$$A_{пл} = \frac{P_0 \cdot h_0}{n} \cdot (K^n - 1) = \frac{40 \cdot 16 \cdot 22,8}{0,40} (2^{0,4} - 1) = 116\,800 \text{ кгмм}.$$

Таким образом работа пластического сжатия получается значительных размеров и работа упругого деформирования ($A_y = 5,7$ кгмм) действительно составляет ничтожную долю полученного значения работы пластического сжатия.

7. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОДСЧЕТА РАБОТЫ РЕЗАНИЯ

Принятый в области резания металлов метод подсчета работы (а также и мощности, расходуемой на процесс резания), как произведение тангенциального усилия на скорость резания ($P_z v$), дает максимальное их значение. В действительности работа резания имеет следующее выражение:

$$A = A_y + A_{пл} + A_{пл \cdot n} + A_{тр \cdot n} + A_{тр \cdot z} + A_{отр}, \quad (45)$$

где A_y — работа упругих деформаций. Указанной величиной, как выше было показано, можно пренебречь, а потому в уравнении (45) не представлена отдельно работа упругих деформаций под обработанной поверхностью;

$A_{пл}$ — работа пластических деформаций в срезаемом слое, которая может быть вычислена по уравнению (44), т. е.

$$A_{пл} = \frac{P_0 \cdot h_0}{n} \cdot (K^n - 1);$$

$A_{пл \cdot n}$ — работа пластических деформаций под обработанной поверхностью. Эта работа составляет незначительную часть от $A_{пл}$. Мы пока не располагаем соответственными уравнениями для вычисления $A_{пл \cdot n}$, но не будет заметной ошибкой, если эту величину оценить на основании имеющихся наблюдений до 10^0 $A_{пл}$;

$A_{тр.п}$ — работа трения на передней грани резца. Согласно предыдущему $A_{тр.п} = T \cdot v$, где T — сила трения, v — скорость. Что же касается самой величины T , то она может быть вычислена исходя из указанного ранее коэффициента трения и нормального усилия P , представляющего собой величину усилия пластического сжатия, вычисленную по уравнению политропы сжатия;

$A_{тр.з}$ — трение на задней грани резца. Согласно наблюдениям за износом резцов при обработке сталей всухую быстрорежущими инструментами, указанная работа может быть подсчитана, исходя из того, что сила трения при указанных выше условиях на задней грани составляет $T_1 = 0,2T$;

$A_{отр}$ — работа отрыва. Эта величина пока не поддается точному расчету. На основании сделанных нами графических расчетов в случае обработки пластичных металлов и при элементных стружках $A_{отр} = 0,05 \cdot A_{пл}$. При суставчатых и сливных стружках величиной $A_{отр}$ можно пренебречь.

IV. УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПОДСЧЕТА НАИБОЛЬШЕГО УСИЛИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ В СРЕЗАЕМОМ СЛОЕ

1. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Согласно приводившимся ранее данным по макро- и микрозасъемам процесса резания, а также по характеру пластического деформирования следует, что усилия, действующие в процессе резания, изменяются от минимума до некоторого максимума, совершая это изменение периодически в строгой последовательности, по мере продвижения резца. Таким образом усилия носят характер пульсаций.

Если общая величина работы, расходуемой на процесс резания, нас интересовала для подсчета расхода энергии, выбора моторов к металлорежущим станкам, то для конструирования станков и инструментов, а также для их эксплуатации необходимо знать наибольшие усилия, возникающие в процессе резания. Эти усилия можно рассчитать, исходя из усилий пластического сжатия.

Пусть производится обработка цилиндра согласно фиг. 100, при этом:

t — глубина резания в мм;

s — подача в мм на 1 оборот;

φ — главный угол в плане;

$b = \frac{t}{\sin \varphi}$ — ширина стружки;

$a = s \cdot \sin \varphi$ — толщина стружки.

Тогда при сжатии резцом h_0 будет первоначальная высота, т. е. та высота, до которой распространяется пластическая деформация. Как известно из предыдущего, при сжатии обыч-

ных образцов с начальной высотой h_0 , с постепенно возрастающей силой каждому значению этой силы соответствует высота h .

Обозначим в случае обработки цилиндра резцом подобную текущую высоту через h_m (см. фиг. 100).

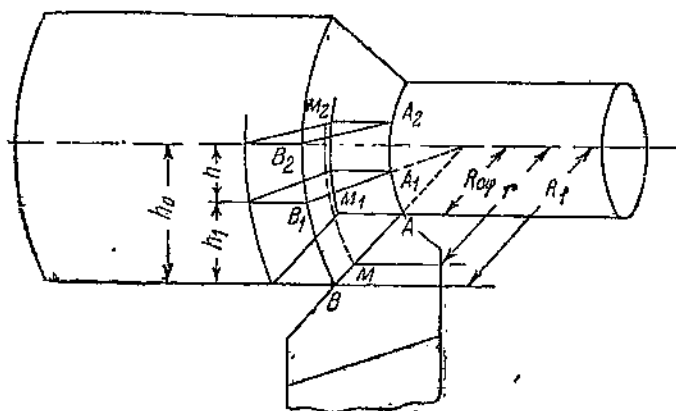
Если возьмем элементарную площадку толщиной a и шириной dr , то элементарная сила, действующая на эту площадку, в момент появления пластических деформаций будет равна:

$$dP_0 = \sigma_0 a \cdot dr, \quad (46)$$

где σ_0 — условный предел текучести.

Глубина распространения пластической деформации вдоль длины будущей стружки должна быть одинаковой и таким образом длина AA_2 должна равняться длине BB_2 , но текущая высота h_m при одном и том же значении h_0 должна зависеть от расстояния r , поэтому

$$h_m = h_0 - h_1 \cdot \frac{r}{R_0} \quad (47)$$



Фиг. 100.

Так как пластическое сжатие, как мы видим из предыдущего, подчиняется закону полнотропы, т. е.

$$P \cdot h^m = P_0 h_0^m = \text{const},$$

то можем написать

$$dP = dP_0 \left(\frac{h_0}{h_m} \right)^m.$$

Подставляя вместо h_m его значение, получим

$$dP = dP_0 \cdot \left(\frac{h_0}{h_0 - h_1 \cdot \frac{r}{R_0}} \right)^m$$

или

$$dP = dP_0 \left(\frac{h_0 \cdot R_\varphi}{h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot r} \right)^m = \sigma_0 \cdot a \left(\frac{h_0 \cdot R_\varphi}{h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot r} \right)^m dr.$$

Наибольшее усилие, сжимающее весь слой от обработанной поверхности ($R_{0\varphi}$) до обрабатываемой поверхности (R_φ), будет равно:

$$P = \sigma_0 \cdot a \cdot \int_{R_{0\varphi}}^{R_\varphi} \left(\frac{h_0 R_\varphi}{h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot r} \right)^m dr = \sigma_0 a \cdot h_0^m \int_{R_{0\varphi}}^{R_\varphi} \left(\frac{R_\varphi}{h_0 R_\varphi - h_1 \cdot r} \right)^m \cdot dr =$$

$$= \sigma_0 a \cdot h_0^m \cdot R_\varphi^m \int_{R_{0\varphi}}^{R_\varphi} (h_0 \cdot R_\varphi - h_1 r)^{-m} \cdot dr$$

или

$$P = -\sigma_0 \cdot a \cdot h_0^m \cdot R_\varphi^m \cdot \left[\frac{(h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot r)^{1-m}}{(1-m) \cdot h_1} \right]_{R_{0\varphi}}^{R_\varphi}. \quad (48)$$

Подставляя в выражение, стоящее в скобках, пределы $R_{0\varphi}$ и R_φ , а также замечая, что $R_\varphi - R_{0\varphi} = b$ и $h_1 = h_0 - h$ (см. фиг. 100), получим:

$$\left[\frac{(h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot r)^{1-m}}{(1-m) \cdot h_1} \right]_{R_{0\varphi}}^{R_\varphi} = \frac{(h_0 \cdot R_\varphi - h_1 R_\varphi)^{1-m}}{(1-m) \cdot h_1} -$$

$$- \frac{(h_0 R_\varphi - h_1 R_{0\varphi})^{1-m}}{(1-m) \cdot h_1} = \frac{1}{(1-m) \cdot h_1} \cdot \left[(h_0 \cdot R_\varphi - h_1 \cdot R_\varphi)^{-m} - \right.$$

$$\left. - (h_0 R_\varphi - h_1 \cdot R_{0\varphi})^{-m} \right] =$$

$$= - \frac{1}{(m-1) \cdot (h_0 - h)} \cdot \left[\frac{1}{h^{m-1} \cdot R_\varphi^{m-1}} - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{[h_0 \cdot (R_\varphi - R_{0\varphi}) + h \cdot R_\varphi]^{m-1}} \right] =$$

$$= - \frac{1}{(m-1) \cdot (h_0 - h)} \cdot \left[\frac{1}{h^{m-1} \cdot R_\varphi^{m-1}} - \frac{1}{(h_0 \cdot b + h \cdot R_{0\varphi})^{m-1}} \right].$$

Вследствие этого имеем

$$P = + \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot h_0^m \cdot R_\varphi^m}{(m-1) \cdot (h_0 - h)} \cdot \left[\frac{1}{h^{m-1} \cdot R_\varphi^{m-1}} - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{(h_0 \cdot b + h \cdot R_{0\varphi})^{m-1}} \right]. \quad (49)$$

Так как

$$\begin{aligned} (h_0 \cdot b + h \cdot R_{0\varphi})^{m-1} &= h^{m-1} \cdot \left(\frac{h_0}{h} \cdot b + R_{0\varphi} \right)^{m-1} = \\ &= h^{m-1} \cdot (K \cdot b + R_{0\varphi})^{m-1}, \end{aligned}$$

где $K = \frac{h_0}{h}$ (коэффициент усадки), то

$$\begin{aligned} P &= \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot h_0^m \cdot R_\varphi^m}{(m-1) \cdot (h_0 - h) \cdot h^{m-1}} \cdot \left[\frac{1}{R_\varphi^{m-1}} - \frac{1}{(Kb + R_{0\varphi})^{m-1}} \right] = \\ &= \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot h_0^{m-1} \cdot R_\varphi^m}{(m-1) \cdot \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) \cdot h^{m-1}} \left[\frac{1}{R_\varphi^{m-1}} - \frac{1}{(Kb + R_{0\varphi})^{m-1}} \right] = \\ &= \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot K^{m-1} \cdot R_\varphi^m}{(m-1) \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right)} \left[\frac{1}{R_\varphi^{m-1}} + \frac{1}{(Kb + R_{0\varphi})^{m-1}} \right] = \\ &= \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot K^m \cdot R_\varphi^m}{(K-1) \cdot (m-1)} + \left[\frac{1}{R_\varphi^{m-1}} - \frac{1}{(Kb + R_{0\varphi})^{m-1}} \right]. \quad (50) \end{aligned}$$

Замечая (см. фиг. 100), что

$$R_\varphi = \frac{R}{\sin \varphi} \quad \text{и} \quad R_{0\varphi} = \frac{R_0}{\sin \varphi},$$

а также

$$b \cdot \sin \varphi = t \quad \text{и} \quad a = s \cdot \sin \varphi,$$

получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{\sigma_0 \cdot a \cdot K^m \cdot R^m}{(K-1) \cdot (m-1) \sin^m \varphi} \cdot \left[\frac{\sin \varphi^{m-1}}{R^{m-1}} - \frac{1}{\left(Kb + \frac{R_0}{\sin \varphi}\right)^{m-1}} \right] = \\ &= \frac{\sigma_0 \cdot s \cdot K^m \cdot R}{(K-1) \cdot (m-1)} \cdot \left[1 - \frac{R^{m-1}}{(Kt + R_0)^{m-1}} \right] = \\ &= \frac{\sigma_0 \cdot s \cdot K^m \cdot R}{(K-1) \cdot (m-1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{Kt + R_0}{R}\right)^{m-1}} \right], \end{aligned}$$

то

$$\begin{aligned} \frac{K \cdot t + R_0}{R} &= \frac{K \cdot t + R_0 + t - t}{R} = \frac{t \cdot (K-1) + R}{R} = \\ &= \frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1, \end{aligned}$$

поэтому

$$P = \frac{\sigma_0 \cdot s \cdot K^m \cdot R}{(K-1) \cdot (m-1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right] \quad (51)$$

где σ_0 — условный предел текучести в кг/мм²;
 s — подача в мм на 1 оборот;
 K — коэффициент усадки стружки;
 R — радиус обрабатываемой поверхности в мм (внешний радиус);
 t — глубина резания в мм;
 m — показатель политропы сжатия.

2. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОДСЧЕТА УСИЛИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКОСТИ

Уравнение для обработки плоскости получится из уравнения для обработки цилиндра (51), если в последнем принять

$$R = \infty.$$

Но тогда уравнение (51) принимает неопределенное выражение, а именно

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left[1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right] = \infty \cdot 0. \quad (52)$$

Раскроем эту неопределенность по правилу Лопиталья, а для этого выражение

$$R \cdot \left[1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right]$$

представим в таком виде:

$$\frac{1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}}}{\frac{1}{R}}.$$

Тогда, согласно правилу Лопиталья,

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \cdot \left[1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right] = \frac{\left\{ 1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right\}'}{\left(\frac{1}{R} \right)'}$$

Производная числителя примет вид

$$\left\{ 1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^{m-1}} \right\}' = \frac{(1-m) \cdot t \cdot (K-1)}{R^2} \cdot \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1 \right]^m}$$

производная знаменателя

$$\left[\frac{1}{R}\right]' = -\frac{1}{R^2}$$

поэтому

$$\frac{\left\{1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1\right]^{m-1}}\right\}'}{\left[\frac{1}{R}\right]'} = \frac{(m-1) \cdot (K-1) \cdot t}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1\right]^m}$$

Вследствие этого будем иметь

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \cdot \left[1 - \frac{1}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1\right]^{m-1}}\right] = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{(m-1) \cdot (K-1) \cdot t}{\left[\frac{t \cdot (K-1)}{R} + 1\right]^m} = (m-1) \cdot (K-1) \cdot t \quad (53)$$

Таким образом уравнение (51) при $R = \infty$ примет вид

$$P = \frac{\sigma_0 \cdot s \cdot K^m}{(K-1) \cdot (m-1)} \cdot (m-1) \cdot (K-1) \cdot t$$

или

$$P = \sigma_0 \cdot t \cdot s \cdot K^m \quad (54)$$

Полученные уравнения (51) и (54) и могут служить для подсчета наибольшего усилия пластического сжатия и в случае обработки цилиндрической поверхности [уравнение (51)] и в случае обработки плоскости [уравнение (54)], причем последнее уравнение имеет более простой вид.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ УРАВНЕНИЙ

Полученные уравнения показывают, что величина усилия пластического сжатия будет различной при обработке цилиндрической поверхности и плоскости, причем при обработке цилиндрической поверхности усилие будет зависеть при прочих равных условиях от радиуса обрабатываемой поверхности. Но трудно показать, что это влияние сказывается лишь до определенных пределов и тогда, когда отношение $\frac{t}{R} < 0,1$, оба уравнения принимают один и тот же вид, а именно:

$$P = \sigma_0 \cdot t \cdot s \cdot K^m \quad (55)$$

где σ_0 — условный предел текучести в кг/мм²;

t — глубина резания в мм;

s — подача в мм на 1 оборот (или на 1 ход);

K — коэффициент усадки;

m — показатель политропы сжатия.

Уравнение (55) выведено, рассматривая процесс резания, как пластическое сжатие, которое подробно изучено и для которого уравнение

$$P \cdot h^m = P_0 \cdot h_0^m = \text{const}$$

получено и теоретически и проверено экспериментально¹. Поэтому выведенное нами уравнение (55) возможно рассматривать как теоретическую формулу, полученную впервые, на основе современных данных физики твердого тела. Используя уравнение (55), а также и те замечания, которые были сделаны при подсчете работы резания и касающиеся оценки сил трения на передней и задней гранях резца, а также сопротивление сил под обработанной поверхностью, можно получить формулы для усилий (P_z), (P_y) и (P_x), которыми обычно пользуются в области резания металлов.

V. ВИБРАЦИИ, ИМЕВШИЕ МЕСТО В ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Процесс резания зачастую сопровождается периодическими колебаниями, т. е. вибрациями инструмента, обрабатываемого изделия и станка. В ряде случаев эти колебания имеют незначительную амплитуду, вследствие чего они не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на процесс обработки. Но при определенных условиях возникают периодические колебания с большой амплитудой, нарушающие процесс резания. При этом явления инструменты преждевременно изнашиваются, а оснащенные твердыми сплавами выкрашиваются. Обработанная поверхность получается недоброкачественной; металлорежущие станки подвергаются сильному износу. Процесс обработки становится невозможным. Основные меры борьбы с вибрациями, осуществляемые на сегодня, сводятся, во-первых, к снижению режимов резания (v , t , s), и во-вторых, — к изменению геометрии инструмента, так как станок и изделие являются заданными.

Наблюдения в процессе резания показывают, что на вибрации влияют следующие основные факторы:

- 1) режимы резания (v , t , s);
- 2) геометрия инструмента (α , γ , φ , φ_1 , λ , r);
- 3) конструкция станка;
- 4) жесткость изделия;
- 5) жесткость резца и пр.

В последние годы² проделаны исследования, направленные на изучение причин возникновения вибраций и создание мероприятий для борьбы с ними. Впервые серьезное внимание на вибрации в процессе резания обратил Тейлор³. Указывая меры

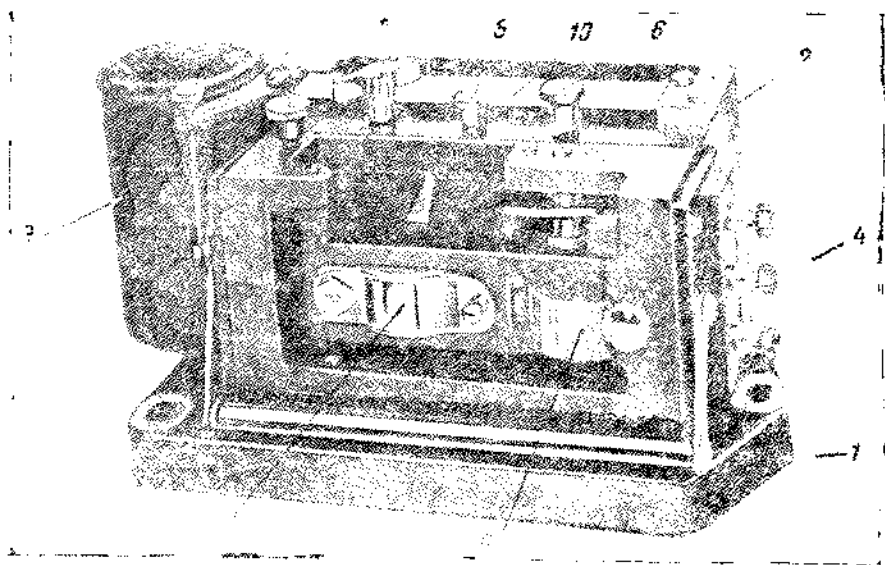
¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. III.

² Дроздов, К вопросу о вибрациях при токарной обработке металлов, журнал „Станки и инструмент“ № 22, 1937; Каширин, Исследования вибраций при резании металлов, 1940 (неопубликованная диссертация); Штейнберг, Исследование вибраций при токарной обработке металлов, журнал „Вестник металлопромышленности“ № 12—13, 1936; Штейнберг, Исследование вибраций при токарной обработке (неопубликов.), ЦНИИТМАШ, 1941; Налчаи. Алмазная обработка металлов, ЭНИМС, 1941 (неопубликованная диссертация)

³ Тейлор, Искусство резать металлы, § 634, 1922.

борьбы с вибрациями, Тейлор все же заявляет: „Вопрос о возникновении дрожаний представляется самым темным и самым тонким. . .“ Одной из причин возникновения дрожаний Тейлор считает геометрию инструмента.

В дальнейшем одни исследователи считали, что вибрации возникают как результат автоколебания системы (станок + изделие + инструмент) и появляются в том случае, когда усилия резания падают с увеличением скорости резания. Другие исследователи доказывают на основании проделанных экспериментов, что вибрации могут возникать и в тех случаях, когда усилия резания возрастают с увеличением скорости резания, причем изменения усилия резания объясняются характером поведения наростов в процессе резания. Таким образом несмотря на ряд проведенных исследований, имеется ряд противоречивых заключений о причинах возникновения вибрации.



Фиг. 101.

В процессе проводившихся экспериментов автор фиксировал также и вибрации как явление, сопровождающее процесс резания (при обработке изделия в жестких условиях). Автор считает, что процесс резания в зависимости от применяемых режимов резания является в большей или меньшей степени одним из возбудителей вибраций. Это можно подтвердить предыдущими рассмотрениями как самого процесса резания, так и усилий, возникающих при этом. Было показано, что, несмотря на вид стружки (элементная, суставчатая или сливная), усилие резания должно изменяться, а потому должны появляться и периодические колебания в процессе резания, что и является одним из возбудителей вибраций. Как упоминалось выше, вибрации фиксировались в жестких условиях крепления изделия и жестких условиях работы станка. Для этого был использован процесс

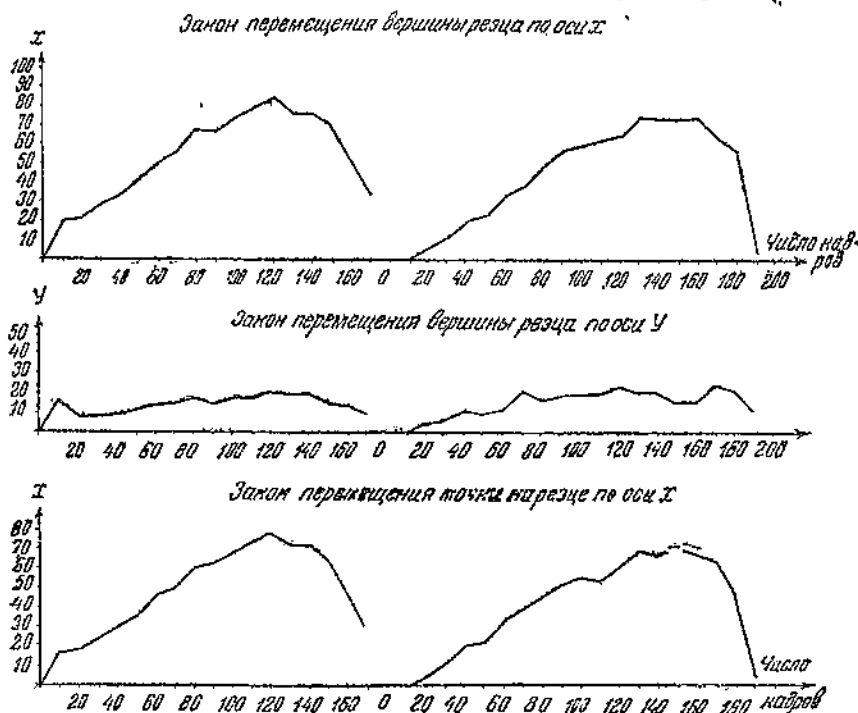
з-
м
р
и
т-
я
-
,
т
т

обработки стальной пластинки 1045 и чугуна при микрозасъеме (см. фиг. 42—47 и 54—57). К приспособлению, в котором зажимался резец, был прикреплен угольник. На этом угольнике был установлен виброграф „Кембридж“ (фиг. 101), где даны следующие обозначения:

1—основание корпуса; 2—корпус; 3—масса; 4—контакты для отметчика времени; 5—кнопки изменения скорости движения; 6—пусковая кнопка; 7—ключ для завода механизма передвижения ленты; 8—барабан для ленты; 9—выход ленты; 10—вибратор.

2. ВИБРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА (СТАЛЬ 1045)

Под влиянием сопротивления, вызываемого деформацией элемента, упругая система—резец, приспособление, оправка и консоль—имела колебания-отклонения, которые представляют

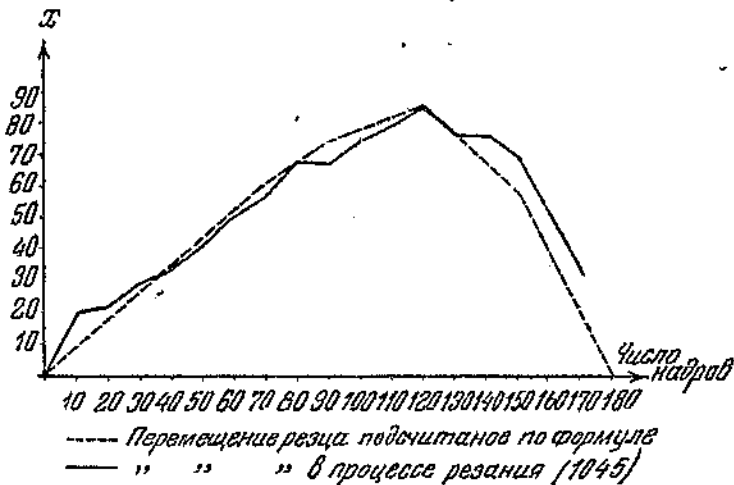


Фиг. 102.

упругую деформацию этой системы. Эти отклонения увеличивались по мере увеличения сопротивления резанию и затем уменьшались по мере уменьшения этого сопротивления. Резец был установлен в приспособлении так, чтобы при отклонении он не врезался задней гранью в обработанную поверхность. При проектировании киноленты на экран были зафиксированы отклонения как вершины резца, так и некоторых его точек, отмеченных на резце. В итоге получились кривые отклонений как по оси x , так и по оси y , изображенные на фиг. 102.

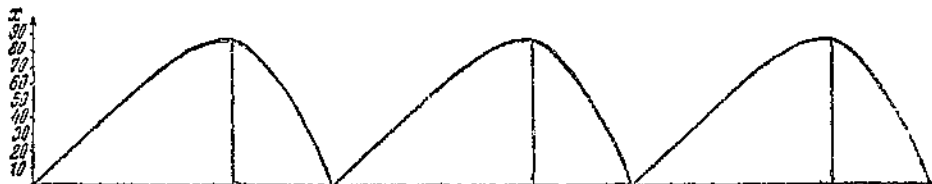
Из представленной фиг. 102 явствует, что наибольшие отклонения как по оси x , так и по оси y совпадают. Длительность процесса резания каждого элемента продолжается примерно 3 сек. (180 кадров) и наибольшее отклонение соответствует времени 2 сек. (120 кадров) от начала резания элемента. На фиг. 103

Перемещение вершины резца по оси x



Фиг. 103.

указана кривая фактического перемещения по оси x и округленная. Если округленные кривые поместить в последовательный ряд, то получим кривые периодических колебаний с периодом 3 сек., как указано на фиг. 104. Путем математической обработки



Фиг. 104.

результатов было найдено, что законы движения по осям x и y могут быть выражены уравнениями:

$$x = 53,443 \cdot t - 0,126 \cdot e^{2,56t} + 0,126; \quad (56)$$

$$y = 28,80 \cdot t - 15 \cdot e^{0,64t} + 15. \quad (57)$$

Периодически же изменяющаяся кривая, представленная на фиг. 104, может быть выражена общим уравнением. Для этого, как известно, необходимо функцию $x = f(t)$ разложить в ряд Фурье. Результаты этого разложения представлены ниже:

$$f(t) = 53,12 \cdot t - 0,126 (e^{2,56t} - 2,56 \cdot t - 1) \quad (58)$$

ИЛИ

$$f(t) = m \cdot t - n \cdot (e^{a \cdot t} - a \cdot t - 1);$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=\infty} (a_k \cdot \cos \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t + b_k \cdot \sin \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t);$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt; \quad (59)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt; \quad (60)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt. \quad (61)$$

Определяем a_0 :

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T [(m + a \cdot n) \cdot t + n - n \cdot e^{a \cdot t}] \cdot dt;$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T \frac{(m + a \cdot n)}{2} \cdot t^2 + n \cdot t - \frac{n}{a} \cdot e^{a \cdot t} = \\ &= \frac{2}{T} \cdot \left[\frac{m + a \cdot n}{2} T^2 + n \cdot T - \frac{n}{a} \cdot e^{a \cdot T} + \frac{n}{a} \right] = \\ &+ (m + a \cdot n) \cdot T - \frac{2 \cdot n}{T \cdot a} \cdot (e^{a \cdot T} - a \cdot T - 1). \end{aligned} \quad (62)$$

Определяем a_k .

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \cdot \int_0^T [(m + a \cdot n) \cdot t + n - n \cdot e^{a \cdot t}] \cdot \cos \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt; \\ &\int_0^T (m + a \cdot n) \cdot t \cdot \cos \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt = \\ &= (m + a \cdot n) \cdot \left[\frac{t}{2k \cdot \pi} \cdot T \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t + \frac{T^2}{4k^2 \cdot \pi^2} \cdot \cos \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \right]_0^T = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_0^T n \cos \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt &= n \cdot \int_0^T \frac{T}{2k \cdot \pi} \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t = 0. \\
&- n \cdot \int_0^T e^{a \cdot t} \cdot \cos \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot dt = \\
&= -n \left[\frac{e^{a \cdot t}}{a^2 + \frac{4k^2 \cdot \pi^2}{T^2}} \left(\frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} t + a \cdot \cos \frac{2k \cdot \pi}{T} t \right) \right]_0^T = \\
&= -\frac{a \cdot n}{a^2 + \frac{4k^2 \cdot \pi^2}{T^2}} (e^{a \cdot T} - 1).
\end{aligned}$$

Следовательно

$$a_k = -\frac{2 \cdot a \cdot n \cdot T}{a^2 \cdot T^2 + 4 \cdot k^2 \cdot \pi^2} (e^{a \cdot T} - 1). \quad (63)$$

Определяем b_k

$$\begin{aligned}
b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T \left[(m + a \cdot n) \cdot t + n - n \cdot e^{a \cdot t} \right] \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt, \\
&\int_0^T t \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt \left[-\frac{t \cdot T}{2k \cdot \pi} \cdot \cos \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t + \right. \\
&\quad \left. + \frac{T^2}{4k^2 \cdot \pi^2} \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t \right]_0^T = -\frac{T^2}{2k \cdot \pi}; \\
&\int_0^T (m + a \cdot n) \cdot t \cdot \sin \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot dt = -\frac{(m + a \cdot n)}{2 \cdot k \cdot \pi} \cdot T^2; \\
&-n \cdot \int_0^T e^{a \cdot t} \cdot \sin \frac{2 \cdot k \cdot \pi}{T} \cdot t \cdot dt = \\
&= -\frac{n}{a^2 + \frac{4k^2 \cdot \pi^2}{T^2}} \left[e^{a \cdot t} \cdot \left(a \cdot \sin \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t - \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot \cos \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot t \right) \right]_0^T = \\
&= \frac{n}{a^2 + \frac{4k^2 \cdot \pi^2}{T^2}} \cdot \frac{2k \cdot \pi}{T} \cdot (e^{a \cdot T} - 1)
\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
b_k &= \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{m + a \cdot n}{2k \cdot \pi} \cdot T^2 + \frac{2k \cdot \pi \cdot n}{\left(a^2 + \frac{4k^2 \cdot \pi^2}{T^2}\right) \cdot T} \cdot (e^{a \cdot T} - 1) \right] = \\
&= -\frac{m + a n}{k \cdot \pi} \cdot T + \frac{4k \cdot \pi \cdot n}{(aT)^2 + 4 \cdot k^2 \cdot \pi^2} \cdot (e^{a \cdot T} - 1). \quad (64)
\end{aligned}$$

Производим дальнейшее преобразование. Когда $t=T$, $x=0$ поэтому

$$[m \cdot T - n \cdot (e^{a \cdot T} - a \cdot T - 1)] = 0,$$

т. е.

$$(m + a \cdot n) \cdot T + n = n \cdot e^{a \cdot T},$$

откуда

$$\left(\frac{m}{n} + a\right) \cdot T = e^{a \cdot T} - 1.$$

Подставляя вместо $(e^{a \cdot T} - 1)$ полученное значение, имеем:

$$a_0 = \left(\frac{m}{a} + n\right) \cdot a \cdot T - \frac{2m}{a}; \quad (65)$$

$$a_k = -\frac{2 \cdot (a \cdot T)^2}{(a \cdot T)^2 + 4k^2 \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right); \quad (66)$$

$$b_k = -\frac{2 \cdot (a \cdot T)^2 \left(\frac{m}{a} + n\right)}{(a \cdot T)^2 + 4k^2 \cdot \pi^2} \cdot \frac{a \cdot T}{2k \cdot \pi}. \quad (67)$$

Преобразовываем функцию в синусоидальный ряд

$$a_k = \cos \alpha_k t + b_k \cdot \sin \alpha_k \cdot t; \quad \alpha_k = \frac{2k \cdot \pi}{T};$$

$$a_k = \cos \alpha_k t + b_k \cdot \sin \alpha_k \cdot t = A_k \cdot \sin(\alpha_k t + \beta_k);$$

$$\cos \beta_k = \frac{b_k}{A_k}; \quad \sin \beta_k = \frac{a_k}{A_k}; \quad A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \operatorname{tg} \beta_k = \frac{a_k}{b_k}.$$

Из предыдущего получаем

$$b_k = a_k \cdot \frac{a \cdot T}{2k \cdot \pi}.$$

Подставляя, имеем:

$$A_k = \frac{(a \cdot T)^2 \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right)}{k \cdot \pi \sqrt{(a \cdot T)^2 + 4k^2 \cdot \pi^2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_k = \frac{2k \cdot \pi}{a \cdot T}.$$

Следовательно,

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=\infty} A_k \cdot \sin(\alpha_k \cdot t + \beta_k) \quad (68)$$

или

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\alpha_1 t + \beta_1) + A_2 \sin(\alpha_2 t + \beta_2) + A_3 \sin(\alpha_3 t + \beta_3) + \dots \quad (69)$$

Уравнение (69) и является общим выражением колебательного движения системы, представленного на фиг. 104.

В этом уравнении значения коэффициентов и углов следующие:

$$= -\frac{(a \cdot T)^2 \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right)}{\pi \cdot \sqrt{(a \cdot T)^2 + 4 \pi^2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{2\pi}{a \cdot T};$$

$$A_2 = -\frac{(a \cdot T)^2 \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right)}{2\pi \sqrt{(a \cdot T)^2 + 4 \cdot 4 \cdot \pi^2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{4\pi}{a \cdot T};$$

$$A_3 = -\frac{(a \cdot T)^2 \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right)}{3\pi \cdot \sqrt{(a \cdot T)^2 + 4 \cdot 9\pi^2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_3 = \frac{6\pi}{a \cdot T};$$

$$A_4 = -\frac{(a \cdot T)^2 \cdot \left(\frac{m}{a} + n\right)}{4\pi \sqrt{(a \cdot T)^2 + 4 \cdot 16\pi^2}}; \quad \operatorname{tg} \beta_4 = \frac{8\pi}{a \cdot T} \text{ и т. д.}$$

Для угла (α_k) имеем: $\alpha_1 = \frac{2\pi}{T}$; $\alpha_2 = \frac{4\pi}{T}$; $\alpha_3 = \frac{6\pi}{T}$ и т. д.

Выбрав пять первых членов ряда Фурье и подставив: $a = 2,56$; $m = 53,12$; $n = 0,126$; $T = 1,9974$ (которое ранее округленно выбиралось равным 2 сек.), получим следующую табл. 18.

Таблица 18

$\frac{a_0}{2}$	A_k	$A_k \cdot \sin(\alpha_k \cdot t + \beta_k)$
53,1040	$A_1 = 34,872$ $A_2 = 11,421$ $A_3 = 5,450$ $A_4 = 3,1512$ $A_5 = 2,0436$	$A_1 \cdot \sin(\alpha_1 \cdot t + \beta_1) = + 29,5993$ $A_2 \cdot \sin(\alpha_2 \cdot t + \beta_2) = + 7,502$ $A_3 \cdot \sin(\alpha_3 \cdot t + \beta_3) = - 4,1755$ $A_4 \cdot \sin(\alpha_4 \cdot t + \beta_4) = - 1,8064$ $A_5 \cdot \sin(\alpha_5 \cdot t + \beta_5) = + 1,8023$

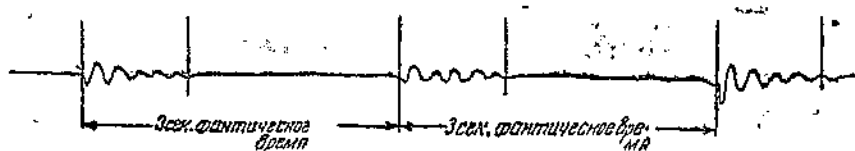
На основании табл. 18 ряд Фурье примет следующее численное значение:

$$f \cdot (1,9974) = 86,026.$$

Действительное значение x при $t = 2$ сек.: $x = 86$.

Таким образом показано, что действительно под влиянием возрастающих сопротивлений резанию резец претерпевает периодические упругие колебания. Наибольшие отклонения резца происходит в момент наибольших деформаций, имеющих место в срезаемом слое металла. Этот момент соответствует началу распространения опережающей трещины в направлении плоскости скалывания; в дальнейшем уже происходит уменьшение отклонений реза, который стремится занять первоначальное исходное положение. Еще раз заметим, что периоды наибольших колебаний соответствуют времени в 3 сек. (180 кадров). Одновременно вибрографом была сделана запись виброграмм (фиг. 105). Так как виброграф записывал и время (фиг. 105), то, анализируя полученные виброграммы, легко убедиться в том, что вибрации совершенно точно возникают через 3 сек. и носят затухающий

характер. Количество возмущающих моментов, указанных на виброграммах, было равно числу снятых элементов. Продолжительность действия вибраций от момента их возникновения до конца затухания равняется 1 сек. (фиг. 105). Если совместить по времени кривую периодического колебания резца и полученные виброграммы, то картина будет выглядеть так, как она изображена на фиг. 106.



Фиг. 105.

Все приведенное выше показывает, что возмущающим фактором, вызывающим появление вибраций в заданном процессе резания, является процесс деформации срезаемого слоя. Найдем уравнение, удовлетворяющее затухающим колебаниям, представленным на виброграммах.

Дифференциальное уравнение такого движения будет:

$$x'' + 2 \cdot n \cdot x' + k^2 \cdot x = 0. \quad (7)$$

Решение же его дает

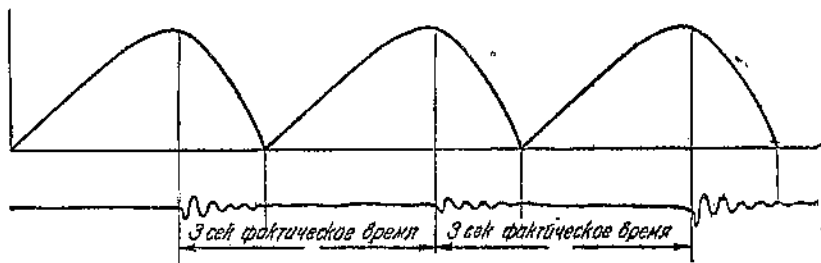
$$x = A \cdot e^{-n \cdot t} \cdot \sin[(\sqrt{k^2 - n^2}) \cdot t + \beta],$$

где: A — начальная амплитуда колебания;

n — коэффициент затухания;

k — частота колебания, равная $\frac{2\pi}{T}$, где T — период колебания;

β — произвольный угол (начало отсчета).



Фиг. 106.

Значение коэффициента затухания можно определить, если взять значение x за один период, т. е.

$$\frac{x_2}{x_1} = e^{-n \cdot T}.$$

Согласно фиг. 105 имеем $x_1 = 16$ и $x_2 = 8$, тогда:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{e^{n \cdot T}}, \text{ откуда } n = \frac{3}{4 \cdot T}.$$

После этого подрадикальное выражение примет вид:

$$\sqrt{k^2 - n^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 - \left(\frac{3}{4T}\right)^2} = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{(2\pi)^2 - \left(\frac{3}{4}\right)^2}.$$

Так как второй член подрадикального выражения незначителен по сравнению с первым, то, пренебрегая вторым членом, получим:

$$\sqrt{k^2 - n^2} = \frac{2\pi}{T}.$$

Выбрав, согласно фиг. 105, $A=26$, а также задавшись $\beta=90^\circ$, получим уравнение:

$$x = 26 \cdot e^{-\frac{3}{4} \cdot \frac{t}{T}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + 90^\circ\right),$$

которое с достаточной точностью отражает закон затухающих колебаний, представленных на виброграммах данного исследования.

Изображенная здесь картина вибраций упругой системы вытекает как следствие того характера деформаций, которые возникают при резании пластичных металлов. Так как стружка получилась элементной и скорость резания была незначительной, то возмущающие импульсы чередовались через длительный период времени и вследствие этого вибрации имели полное затухание до момента нового возмущения.

Число возмущающих импульсов при обработке образца длиной 140 мм получилось равное шести. Указанное весьма хорошо сходится и с расчетными данными, а именно:

Высота элемента (длина) согласно предыдущим рассуждениям равна

$$h_0 = a \cdot \left[K^2 + \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\delta}{2} \right) \right] \quad (\text{см. формулу 40}).$$

Если положить $\delta=75^\circ$; $K=2$; $\mu=0,40$, а следовательно, $\alpha=22^\circ$, то

$$h_0 = 5,7 \cdot a,$$

где a — толщина стружки.

Поэтому число возмущающих импульсов равно:

$$\frac{L}{h_0} = \frac{140}{5,7a} = \frac{140}{5,7 \cdot 4} \approx 6.$$

Для общего случая, например при обработке цилиндрических поверхностей, число возмущающих импульсов может быть подсчитано, исходя из следующего.

Путь реза, приходящийся на один элемент [см. выводы для длины (высоты) элемента]:

$$l_0 = K^2 \cdot a.$$

Пренебрегая относительным перемещением, получим число срезанных элементов за 1 оборот изделия:

$$\pi \cdot D = a \cdot K^2 \cdot m_0,$$

откуда

$$m_0 = \frac{\pi \cdot D}{K^2 \cdot a}$$

За 1 минуту, т. е. за n оборотов

$$m_n = \frac{\pi \cdot D}{K^2 \cdot a} \cdot n = \frac{\pi \cdot D}{K^2 \cdot a} \cdot \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot v}{K^2 \cdot a},$$

где v — скорость резания в $m/мин.$

В течение одной секунды

$$m_c = \frac{1000 \cdot v}{60 \cdot K^2 \cdot a} = \frac{16,67 \cdot v}{K^2 a} \quad (71)$$

Если в формулу (71) подставить

$$a = s \cdot \sin \varphi,$$

то получим:

$$m_c = \frac{16,67v}{K^2 \cdot s \cdot \sin \varphi} \quad (72)$$

Выше было рассмотрено колебание упругой системы, в которой закреплен резец. Что же касается влияния наростов на вибрации, то оно будет сказываться постоянно, поскольку наросты оказывают действие на деформирование металла при резании и в той зоне скоростей резания, при которых наростообразование имеет место.

3. ВИБРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЧУГУННОГО ОБРАЗЦА

Из предыдущего видно (см. макро-и микросъемы), что процесс обработки чугуна резко отличается от обработки стали. После скалывания элемента происходит зачистка оставшихся неровностей на обработанной поверхности и даже раздробление отдельных частиц металла в выступающих неровностях. Но после зачистки происходит скалывание нового элемента и т. д. Было замечено, что продолжительность от образования одного элемента до образования другого не является строго определенной, как это имело место при обработке стали, и что в промежутке времени между образованием последовательных элементов работа резца напоминает „пахотное поле“.

Все упомянутое сказалось и на колебаниях резца и на полученных виброграммах (фиг. 107). Рассмотрение их показывает, что вибрации возникают от скалывания основных элементов и в результате зачистки обработанной поверхности за промежуток времени от образования одного элемента до образования другого элемента. Вибрации, возникающие от первой причины (скалывания элемента), носят достаточно закономерный характер; прежде всего они — затухающие.

Фиг. 107.

Число периодов примерно одинаково, хотя амплитуды и частота все же несколько различны. Вибрации, возникающие от второй причины (при зачистке), не имеют какой-либо закономерности; они носят хаотический характер, так как и причины их возникновения также хаотичны

Анализируя все изложенное о вибрациях при обработке стальных и чугуновых образцов, мы приходим к выводу, что причиной возникновения вибраций, т. е. возмущающим фактором, являлся процесс резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. I и II.
 2. С. П. Тимошенко, Сопротивление материалов, ч. I и II.
 3. С. П. Тимошенко, Теория упругости.
 4. С. П. Тимошенко, Теория колебаний в инженерном деле.
 5. Е. Л. Николаи, Лекции по теоретической механике; ч. III (Динамика).
 6. Н. А. Шапошников, Основы механических испытаний металлов.
 7. Н. Н. Давиденков, Динамические испытания металлов.
 8. И. А. Одинг, Прочность металлов.
 9. С. И. Губкин, Теория пластических деформаций.
 10. Надаи, Пластичность.
 11. Закс, Практическое металловедение.
 12. Зибель и Гюне, Исследование процессов деформации при обработке давлением.
 13. Кокер и Файло, Оптический метод исследования напряжений.
 14. Файло, Введение в прикладную оптику.
 15. В. А. Кривоухов, Резание металлов.
 16. С. Ф. Глебов, Теория наимыгоднейшего резания.
 17. Н. И. Резников, Теория резания металлов.
 18. И. М. Беспрозванный, Физические основы учения о резании металлов.
 19. Г. Шмальц, Качество поверхности.
 20. Тейлор, Искусство резать металлы.
 21. Комиссия по резанию металлов. Режимы резания при работе на металло-режущих станках, изд. 1939 — 1942 гг.
 22. Журналы и другая периодическая литература, указанная в тексте.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение	3
II. Общие соображения о явлениях, сопровождающих процесс резания металлов	5
1. Аналогия процессов резания металлов и пластического сжатия	5
2. Плоское напряженное состояние	11
3. Внешний вид стружек и структура деформированных слоев металла	14
4. Экспериментальное исследование процесса резания при помощи высокочастотной кинокамеры	19
5. Характер и величина деформации	33
6. Глубина деформированного слоя в зависимости от глубины резания	37
7. Упрочнения, возникающие в процессе резания металлов	39
8. Деформации и упрочнения в зависимости от состояния инструмента, при обработке стали 1045	44
9. Теория влияния скорости резания на деформирование	51
10. Теплота и пары, образующиеся при резании металлов. Причины образования тепла	58
III. Общее уравнение работы резания	62
1. Упругое деформирование	62
2. Основные закономерности при пластическом сжатии металлов	63
3. Положение плоскости скалывания (сдвига) при резании металлов	67
4. Длина (высота) элемента (l_0), подвергающегося сжатию в процессе резания	69
5. Подсчет работы упругого деформирования в срезаемом слое	70
6. Подсчет работы пластического сжатия в срезаемом слое	71
7. Общее уравнение для подсчета работы резания	72
IV. Уравнение для подсчета наибольшего усилия пластического сжатия в срезаемом слое	37
1. Общий случай обработки цилиндрической поверхности	73
2. Вывод уравнения для подсчета усилия пластического сжатия при обработке плоскости	73
3. Анализ полученных уравнений	78
V. Вибрации, имевшие место в данных исследованиях	79
1. Общие соображения	79
2. Вибрации при обработке стального образца (сталь 1045)	81
3. Вибрации при обработке чугунного образца	89
IV. Литература	91