

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА МАШИНОСТРОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

# Методические указания

к лабораторной работе по курсам  
«Теория резания» и «Резание материалов»  
по теме **«Исследование физических процессов  
при стружкообразовании по корню стружки»**

*для студентов специальности 1-36 01 01  
«Технология машиностроения» и  
1-36 01 03 «Технологическое оборудование  
машиностроительного производства»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения*

УДК 621.002 (075.8)

В методических указаниях изложены современные взгляды на стружкообразование при резании металлов, даны основные теоретические положения, позволяющие описать процесс резания на основе закономерностей пластической деформации простого сдвига. Предложена методика исследования корня стружки и расчёта основных физических параметров процесса резания. Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплинам «Теория резания» и «Резание материалов» студентами дневной, вечерней и заочной форм обучения по специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства».

Составители: А.В. Драган, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и эксплуатация автомобилей»

В.А. Сокол, ст. преп. кафедры «Машиностроение и эксплуатация автомобилей»

А.Н. Парфиевич, ст. преп. кафедры «Машиностроение и эксплуатация автомобилей»

Рецензент: Д.С. Ларченко, начальник службы контроля функционирования процессов и качества продукции ОАО «Машиностроительное предприятие «КОМПО»»

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА: ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ ПО КОРНЮ СТРУЖКИ .....	4
Краткие теоретические сведения .....	4
1 Пластические деформации металла при образовании стружки .....	4
2 Модели стружкообразования .....	7
2.1 Схема образования сливной стружки .....	7
2.2 Схема образования элементной стружки .....	8
3 Формирование текстуры .....	9
4 Трение на контактных площадках и наростообразование .....	10
Порядок выполнения работы .....	11
Содержание отчёта .....	12
Контрольные вопросы .....	13

## ТЕМА: ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ ПО КОРНЮ СТРУЖКИ

**Цель работы:** ознакомиться с методикой исследования корня стружки, определить по корню стружки физические параметры процесса резания, а также доказать, что процесс стружкообразования может быть описан закономерностями пластической деформации простого сдвига.

**Инструменты и принадлежности:** комплект фотографий микрошлифов корней стружек, линейка, транспортир.

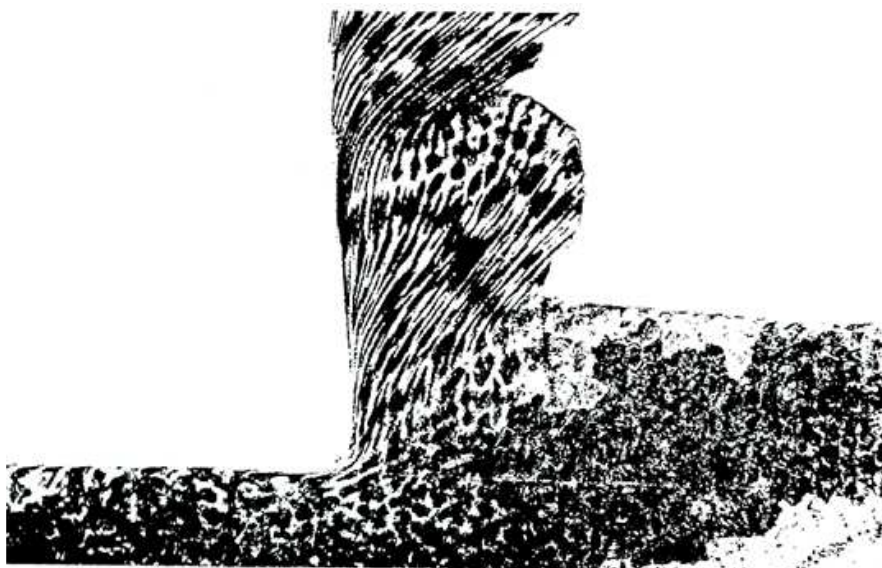
### Краткие теоретические сведения

#### 1 Пластические деформации металла при образовании стружки

При обработке резанием превращение срезаемого слоя в стружку является одной из разновидностей процесса пластической деформации материала, выражающейся в изменении под действием внешней силы формы деформируемого тела без его разрушения.

На стружкообразование при резании металлов затрачивается более 90% силы и работы резания. От него зависят тепловой режим и контактные нагрузки на рабочих поверхностях инструмента, а значит, характер и интенсивность их износа. Стружкообразование непосредственно влияет также на качество поверхностного слоя и точность обработки детали.

Наиболее полно особенности стружкообразования можно определить по корню стружки (рисунок 1). Если в процессе резания инструмент отвести от детали с очень большой скоростью, значительно превышающей скорость резания, то на детали остаётся элемент стружки, называемый её корнем. Для получения корня стружки в настоящее время разработаны различные приспособления механического, электромагнитного, а также взрывного принципа действия, позволяющие получить высококачественные корни стружки при скоростях резания в несколько сот метров в минуту.



*Рисунок 1 – Корень стружки*

Анализ микрошлифов стружки позволил установить следующий механизм стружкообразования (рисунок 2). Режущий клин действует на срезаемый слой толщиной  $a$  на контактной площадке шириной  $C$ . Зона, обозначенная  $OAB$  и расположенная перед передней поверхностью инструмента, является зоной первичной деформации. Она имеет форму клина с вершиной, совпадающей с вершиной инструмента. Правее линии  $OB$  находятся зерна стружки, а левее линии  $OA$  – недеформированные зерна материала срезаемого слоя. Зерно материала срезаемого слоя, перемещаясь относительно инструмента со скоростью  $V$ , проходит по траектории своего движения (кривая  $FQ$ ) и сильно деформируется. Деформация зерна заканчивается в точке  $Q$ , и оно приобретает скорость  $V_c$ , равную скорости стружки.

В ходе проводимых исследований доказано, что при скоростях резания и геометрических параметрах инструмента, используемых в производстве, границы  $OA$  и  $OB$  сближаются и, в основном, пластическая деформация концентрируется в сравнительно узкой части зоны стружкообразования толщиной  $\Delta x$ . Это позволяет в некоторых случаях упрощенно считать, что весь процесс деформации происходит вдоль некоторой плоскости сдвига  $OE$ , наклоненной к вектору скорости под углом сдвига  $\beta$ .

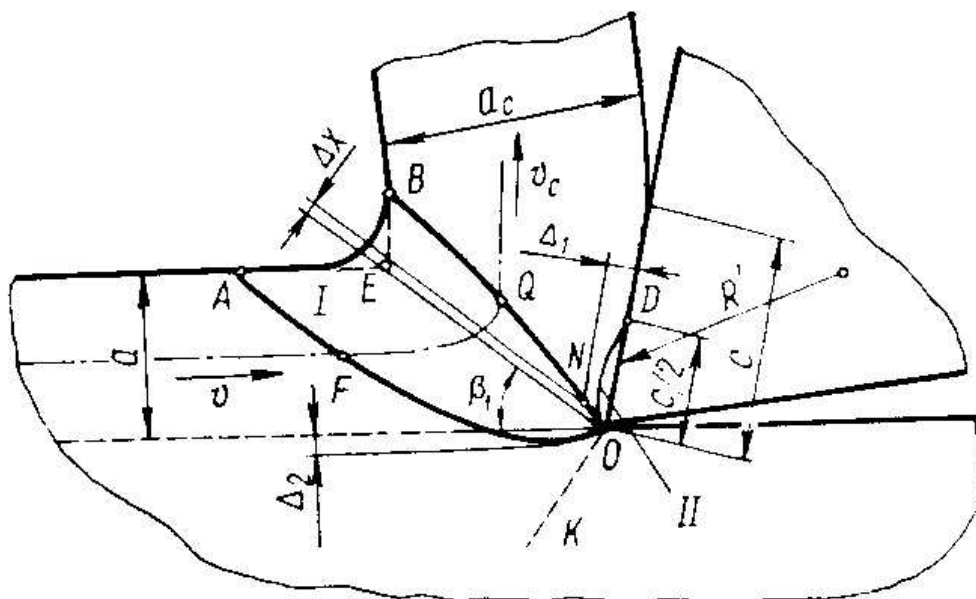


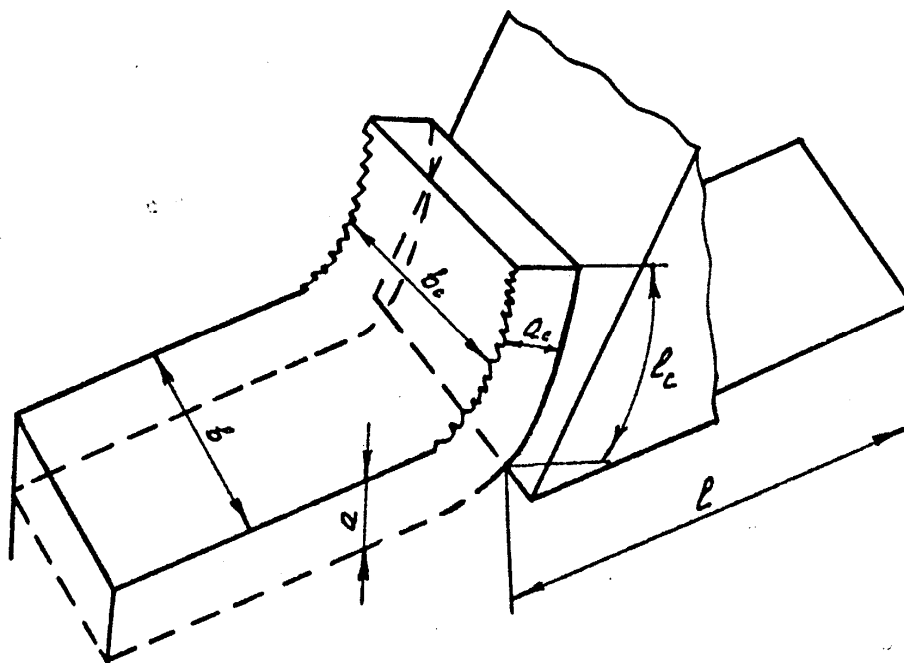
Рисунок 2 – Схема образования стружки

Многочисленными исследованиями установлено, что при резании уширение стружки незначительно, поэтому можно считать, что деформированное состояние в зоне стружкообразования является плоским и срезаемый слой в процессе резания претерпевает деформацию сдвига.

Кроме того, из-за трения между контактной поверхностью стружки и поверхностью инструмента происходят деформации зерен стружки, находящиеся в непосредственной близости от контактной поверхности стружки. Таким образом, возникает зона вторичной деформации стружки, ограниченная передней поверхностью инструмента и линией  $OND$  (рисунок 2).

Известно, что при превращении срезаемого слоя в стружку в результате пластических деформаций размеры стружки по длине, толщине и ширине

(рисунок 3) отличаются от размеров срезаемого слоя, из которого стружка образовалась. Изменение размеров стружки по сравнению с размерами срезаемого слоя при стружкообразовании называется **усадкой стружки**.



*Рисунок 3 – Размеры срезаемого слоя и стружки*

Величина усадки характеризуется тремя коэффициентами изменения формы: коэффициентом укорочения  $K_l$ , коэффициентом утолщения  $K_a$  и коэффициентом уширения  $K_b$ :

$$K_l = \frac{l}{l_c}; \quad K_a = \frac{a_c}{a}; \quad K_b = \frac{b_c}{b}; \quad (1)$$

где  $l, a, b$  – длина, толщина и ширина срезаемого слоя;

$l_c, a_c, b_c$  – длина, толщина и ширина стружки.

Коэффициенты показывают, во сколько раз размеры стружки по длине, толщине и ширине меньше или больше соответствующих размеров срезаемого слоя.

Так как объем стружки равен объему срезаемого слоя, то:

$$l \cdot a \cdot b = l_c \cdot a_c \cdot b_c, \quad (2)$$

поэтому

$$K_l = K_a \cdot K_b. \quad (3)$$

В большинстве случаев при резании ширина срезаемого слоя  $b$  значительно превосходит его толщину. При этом пластические деформации стружкообразования носят характер простого сдвига, поэтому ширина стружки почти не отличается от ширины срезаемого слоя, т. е.  $K_b \approx 1$ . Тогда формулу (3) можно представить как:

$$K_l \approx K_a = \frac{a_c}{a}. \quad (4)$$

Из приведенных выше коэффициентов изменения формы на практике чаще всего используют  $K_1$ .

По формуле (4) коэффициент укорочения сливной стружки может быть определён по её корню. Если стружка имеет выступы на свободной стороне, то коэффициент укорочения рассчитывается по формуле:

$$K_1 \approx K_a \cdot K_\xi, \quad (5)$$

где  $K_\xi$  – коэффициент сплошности.

$$K_\xi = 1 - \frac{h}{2a_c}, \quad (6)$$

где  $h$  – глубина выступов на свободной стороне стружки.

Если считать, что процесс стружкообразования – это простой сдвиг, то коэффициент укорочения может быть определён и теоретически по величине угла сдвига и переднего угла инструмента, полученных на основе их измерения на корне стружки:

$$K_1 = \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\sin \beta}. \quad (7)$$

## 2 Модели стружкообразования

### 2.1 Схема образования сливной стружки

При отмеченном выше допущении, что деформации концентрируются в относительно тонкой зоне  $\Delta x$ , схема стружкообразования может рассматриваться с точки зрения простого сдвига (рисунок 4).

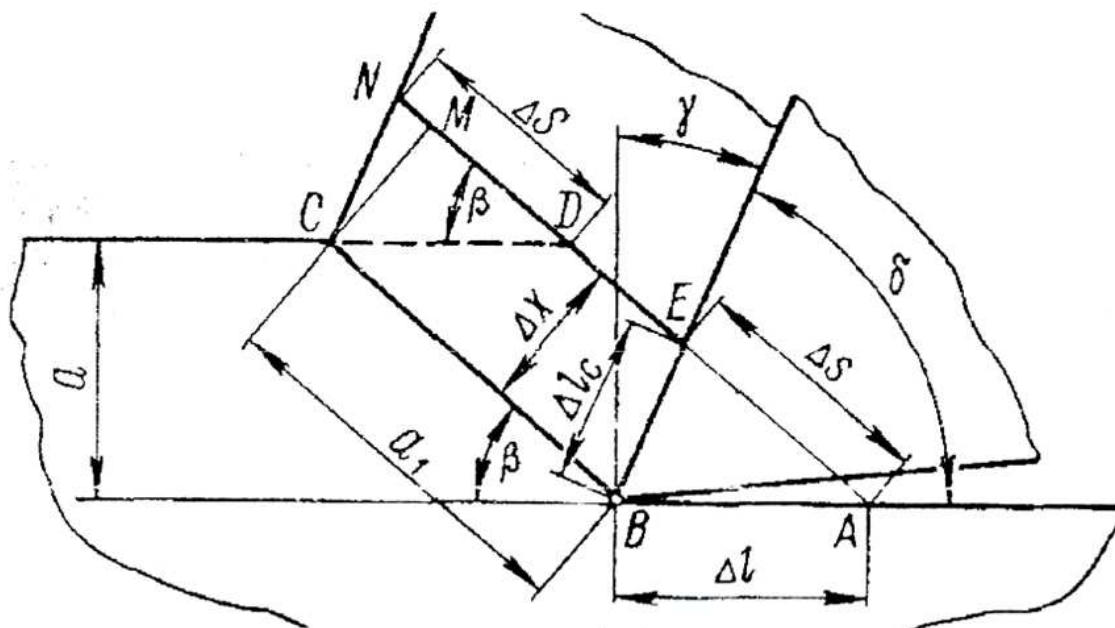


Рисунок 4 – Схема образования сливной стружки

Переходная пластически деформируемая зона толщиной  $\Delta x$  может быть рассмотрена в виде параллелограмма ABCD. В процессе деформации его грань AD под действием сил со стороны инструмента сдвигается относительно нижней грани CB на величину  $\Delta S$ , которая представляет собой абсолютный сдвиг. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига предпочтительней использовать более информативную характеристику – относительный сдвиг или степень деформации  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{\Delta x} \quad (8)$$

Он же может быть определён теоретически на основе анализа и измерения корня стружки по формуле, выведенной из закономерностей, справедливых для простого сдвига:

$$\varepsilon = \frac{K_1^2 - 2 \cdot K_1 \cdot \sin \gamma + 1}{K_1 \cdot \cos \gamma} \quad (9)$$

## 2.2 Схема образования элементной стружки

При исследовании зоны стружкообразования установлено, что прежде чем произойдёт разрушение по плоскости скалывания, в объеме будущего элемента стружки возникают значительные деформации сжатия, вызывающие в ряде случаев течение материала срезаемого слоя вдоль и перпендикулярно к передней поверхности инструмента. Превращение срезаемого слоя в элемент стружки происходит следующим образом (рисунок 5).

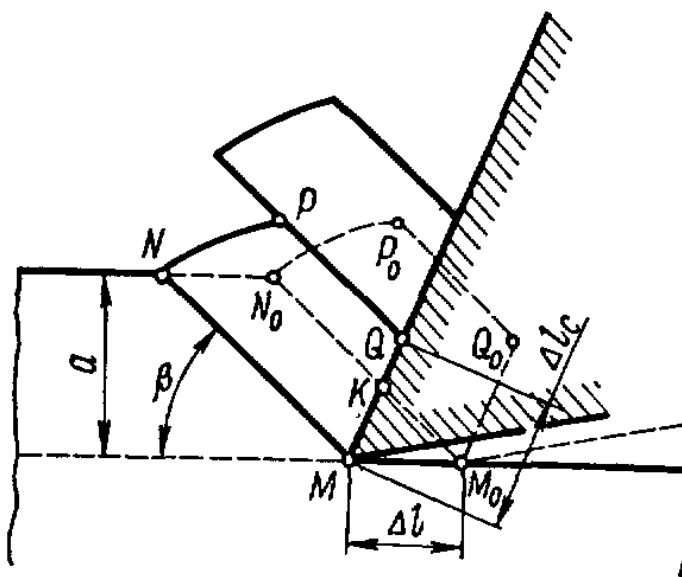


Рисунок 5 – Схема образования элементной стружки

При перемещении инструмента на расстояние  $\Delta l$  его передняя поверхность деформирует объем материала, ограниченный параллелограммом  $M_0MNN_0$ . Когда напряжения сжатия превзойдут предел текучести деформируемого материала, начнется его перемещение по передней поверхности лезвия инструмента и точка  $M_0$  совпадет не с точкой  $K$ , как это бывает при образовании сливной



стружки, а с точкой Q. Одновременно сторона  $M_0N_0$  параллелограмма укорачивается до QR. Это объясняется тем, что объём деформированного материала остаётся прежним. В результате элемент срезаемого слоя  $M_0MNN_0$  превращается в элемент стружки MNPQ. Когда запас пластичности обрабатываемого материала будет исчерпан, начинается его разрушение по плоскости скалывания, и сколотый элемент перемещается вверх по передней поверхности лезвия инструмента. Чем больше степень деформации срезаемого слоя, тем больше форма элемента стружки в виде трапеции MNPQ приближается к треугольной. При этом сторона MN элемента стружки получает значительно большее уширение, чем при образовании сливной стружки.

### 3 Формирование текстуры

Образование текстуры можно представить следующим образом (рисунок б). Недеформированные зерна материала имеют неправильную форму, однако, как правило, не имеют каких-либо приоритетных направлений ориентации в объеме материала. Поэтому условно их можно считать сфероидальными. Рассмотрим одно из них, находящееся в переходной зоне, толщиной  $\Delta x$ . В сечении его плоскостью, перпендикулярной режущей кромке инструмента, будем иметь круг. В результате деформации простого сдвига верхняя плоскость сдвигаемого слоя переместится относительно нижней на величину абсолютного сдвига  $\Delta S$ .

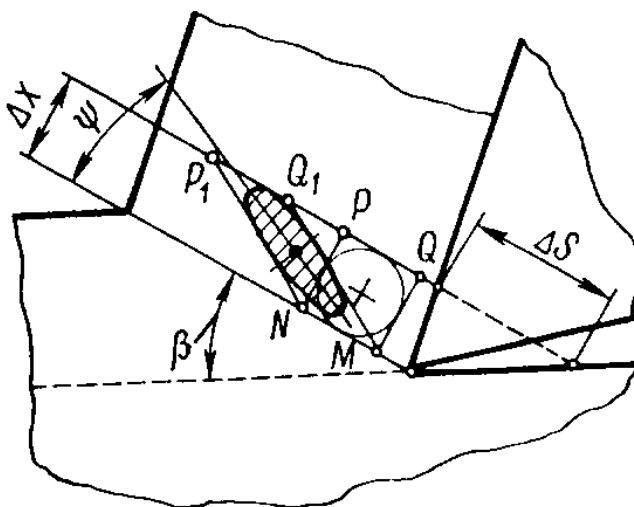


Рисунок б – Схема образования текстуры стружки

Квадрат MNPQ, в который вписан круг, превратится в параллелограмм MNP<sub>1</sub>Q<sub>1</sub>, а круг – в эллипс, большая ось которого наклонена к условной плоскости сдвига под углом текстуры  $\psi$ . С учетом предположения, что при образовании стружки происходит простой сдвиг, значение  $\psi$  можно определить из выражения:

$$\operatorname{ctg}\psi = \frac{\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4}}{2}. \quad (10)$$

Течение металла в ходе образования элементной стружки может проявляться на корне стружки в виде характерных отклонений линий текстуры от положения, обусловленного сдвиговыми деформациями, характерного для сливной стружки.

## 4 Трение на контактных площадках и наростообразование

Процесс стружкообразования связан с изменением контактных процессов на передней поверхности инструмента. Контакт стружки с передней поверхностью инструмента характеризуется рядом особенностей, например, различной химической чистотой поверхностей контакта, неравномерным распределением контактных напряжений на передней поверхности, весьма широким пределом изменения температуры на площадках контакта. Указанные особенности способствуют тому, что условия контакта на поверхности инструмент-стружка изменяются от полного схватывания материалов вблизи режущей кромки до граничного трения в зоне контакта, прилегающей к месту отрыва стружки.

Средний коэффициент трения при резании по физическому смыслу изменения не совпадает с коэффициентом внешнего трения и не является константой трущихся пар.

Такое особое изменение коэффициента трения при резании связано с двойкой природой трения на передней поверхности, где существуют два участка трения: зона пластического и зона упругого контакта.

Средний коэффициент трения  $\mu$  при резании может быть охарактеризован следующей зависимостью:

$$\mu = \mu_a + f_{тр}, \quad (11)$$

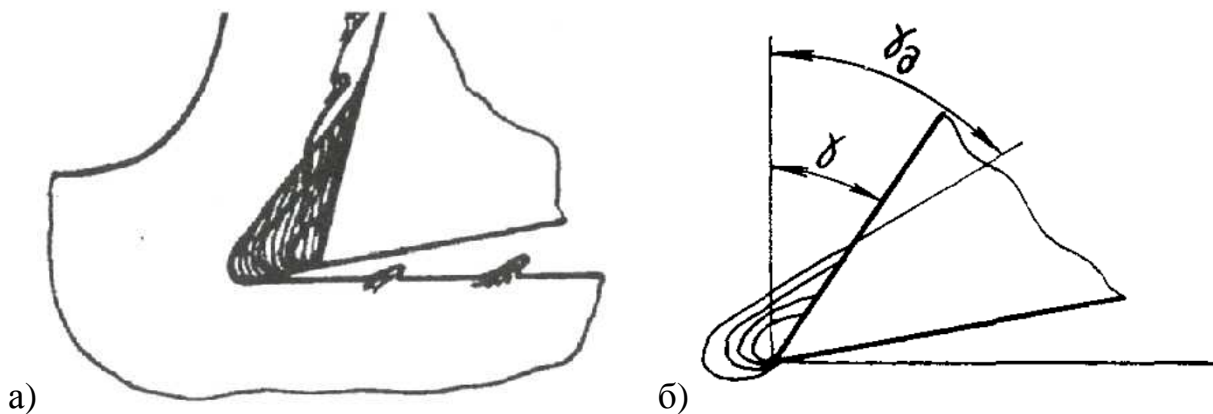
где  $\mu_a$  – переменная «адгезионная» составляющая силы трения, обусловленная условиями резания;

$f_{тр}$  – постоянная составляющая – коэффициент трения скольжения.

Значение  $\mu$  при резании достигает 1,5-3 и более.

На участке, прилегающем к режущей кромке, в ряде случаев возникает застойная зона, образование которой обусловлено высокими силами трения стружки о переднюю поверхность. Это приводит к тому, что поперечная текстура стружки у передней поверхности искривляется и превращается в продольную (рисунок 1). Толщина слоя, подвергнутого вторичной деформации, может достигать до 10 % от толщины стружки.

В том случае, если напряжение внешнего трения станет больше сопротивления пластическому сдвигу стружки, то внешнее скольжение стружки по передней поверхности резца сразу же заменяется энергетически более выгодными внутренними сдвигами материала стружки. Самый нижний слой стружки затормозится и как бы прилипнет к передней поверхности. На тонкий заторможенный слой налипают все новые и новые слои материала стружки, и на передней поверхности инструмента образуется клиновидная область обрабатываемого материала, называемая наростом (рисунок 7, а). Время от времени происходит его разрушение, часть его уносится со стружкой, часть остается на поверхности резания и резце. После разрушения нарост вновь возрастает до предельной высоты, опять разрушается и т. д. Частота этого процесса может достигать 50-70 Гц.



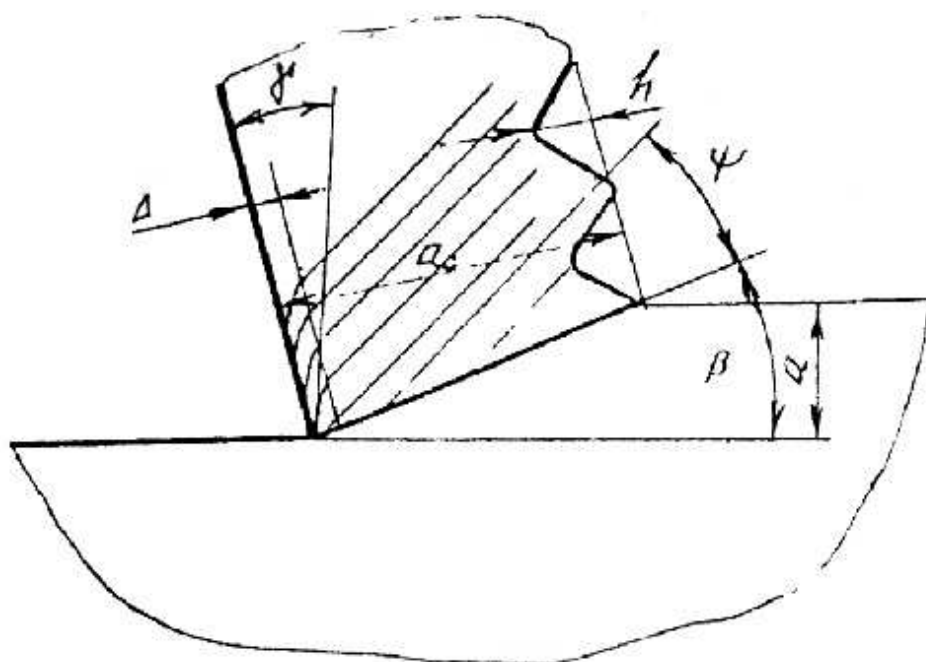
**Рисунок 7 – а) нарост на передней поверхности инструмента;  
б) увеличение переднего угла  $\gamma$  с образованием нароста**

На интенсивность наростообразования влияют свойства обрабатываемого материала, скорость резания, передний угол инструмента. Нарост в значительной степени влияет на условия резания. Он фактически заменяет собой участок передней поверхности, изменяя тем самым передний угол (рисунок 7, б), средний коэффициент трения, относительный сдвиг и другие характеристики. Средний коэффициент трения приблизительно может быть определен из следующей зависимости:

$$\mu = \operatorname{ctg}(2\beta - \gamma). \quad (12)$$

### Порядок выполнения работы

1. Контуры микрошлифов корней стружек скопировать на лист бумаги с фотографий, полученных от преподавателя, например, на лист бумаги напросвет через стекло. На корне стружки показать направление линий текстуры и плоскость сдвига (рисунок 8).



**Рисунок 8 – Измеряемые параметры при исследовании корня стружки**

2. На полученных изображениях обозначить (рисунок 8):

- толщину срезаемого слоя  $a$ ;
- толщину стружки  $a_c$ ;
- глубину выступов на свободной стороне стружки  $h$ ;
- угол сдвига  $\beta$ ;
- угол текстуры  $\psi$ ;
- передний угол инструмента  $\gamma$ ;
- толщину зоны вторичных деформаций  $\Delta$ .

3. Измерить все эти величины линейкой и транспортиром и результаты измерений занести в протокол (таблица 1).

Таблица 1 – Протокол результатов измерений и расчётов

Образец №	$a$ , мм	$a_c$ , мм	$h$ , мм	$\gamma$ , °	$k_{11}$	$k_{12}$	$\beta$ , °	$\psi_1$ , °	$\psi_2$ , °	$\Delta$ , мм	$\epsilon$	$\mu$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1												
2												

4. Вычислить величину коэффициента укорочения стружки: по формуле (4), если стружка сливная, или по формуле (5), если она имеет выступы на свободной стороне. Результат занести в графу 6 протокола (таблица 1).

5. Определить коэффициент укорочения стружки теоретически по формуле (7), результат занести в графу 7 протокола и сравнить его величину с полученными ранее значениями.

6. Рассчитать относительный сдвиг по формуле (9).

7. Рассчитать угол текстуры стружки, используя формулу (10), занести результат в графу 10 и сравнить полученные значения с измеренными транспортиром.

8. Определить коэффициент трения на передней поверхности по формуле (12).

Все результаты расчетов и измерений занести в протокол (таблица 1).

Если значения коэффициента укорочения стружки  $k_{11}$  и  $k_{12}$ , а также угла текстуры  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , полученные на основе измеренных и расчетных данных для каждого образца корня стружки, приблизительно совпадут, это будет подтверждением того, что стружкообразование описывается закономерностями простого сдвига.

## Содержание отчёта

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Перечень инструментов и принадлежностей.
3. Контуры или ксерокопии корней стружек с необходимыми обозначениями.
4. Расчётные зависимости и результаты вычислений.
5. Протокол результатов измерений и расчётов.
6. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Что такое корень стружки и как он получается?
2. Как образуется сливная стружка?
3. Как можно определить коэффициент укорочения стружки и относительный сдвиг?
4. Что такое нарост, как он образуется, каким образом влияет на процесс резания?
5. Какие факторы, как и почему влияют на процесс наростообразования и высоту нароста?
6. Каковы особенности трения при резании металлов?
7. От каких параметров зависит средний коэффициент трения?
8. Что такое текстура стружки и как она образуется?
9. Как влияют вторичные деформации на изменение текстуры стружки?
10. Каким образом в проведенной работе доказано, что процесс стружкообразования происходит в результате сдвиговых пластических деформаций?
11. Как можно использовать полученные в работе результаты на практике?

Учебное издание

**Составители:**

*Драган Александр Вячеславович*

*Сокол Виктор Александрович*

*Парфиевич Андрей Николаевич*

# **Методические указания**

к лабораторной работе по курсам  
«Теория резания» и «Резание материалов»  
по теме **«Исследование физических процессов  
при стружкообразовании по корню стружки»**

*для студентов специальности 1-36 01 01  
«Технология машиностроения» и  
1-36 01 03 «Технологическое оборудование  
машиностроительного производства»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения*

Ответственный за выпуск: Сокол В.А.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано в печать 26.11.2019 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 1607. Тираж 21 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.