

**ДЕФОРМАЦИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ  
И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

**САМАРА 2009**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»

# ДЕФОРМАЦИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к лабораторной работе*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2009

УДК 539.3(075)

ББК 30.121

Составитель *В.И. Лепилин*

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. В. Т а р а с о в

**Деформация в зоне резания и ее исследование:** метод. указания к лаб. работе / сост. *В.И. Лепилин*. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 27 с.

Приведены сведения об исследовании деформации в зоне резания.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ студентами III курса. Разработаны на кафедре «Механическая обработка материалов».

УДК 539.3(075)

ББК 30.121

**Цель лабораторной работы:** закрепление и более глубокое изучение лекционного материала, посвященного теории стружкообразования при резании на основе анализа деформированного состояния стружки и влияния на него режима резания и геометрии инструмента.

## 1. ДЕФОРМАЦИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Под процессом резания понимается процесс удаления слоя металла путем последовательного превращения его в стружку на основе циклической пластической деформации сжатия и сдвига. Процесс резания – это прежде всего процесс пластической деформации, поэтому затраты энергии и все показатели качества обработанной поверхности и поверхностного слоя детали зависят от величины и характера деформации при стружкообразовании, а следовательно, вид стружки и ее параметры несут информацию о всех тех явлениях, которые имели место в этом процессе. Поэтому на основе достаточно простых расчетов по измеренным параметрам стружки можно установить изменение направления условий резания для достижения желаемых результатов.

Наиболее простым способом оценки напряженности процесса резания при изменении какого-либо одного параметра режима резания (например  $S$  или  $V$ ) или геометрии инструмента (например  $\lambda$  или  $\varphi$ ) является сопоставление по усадке стружки.

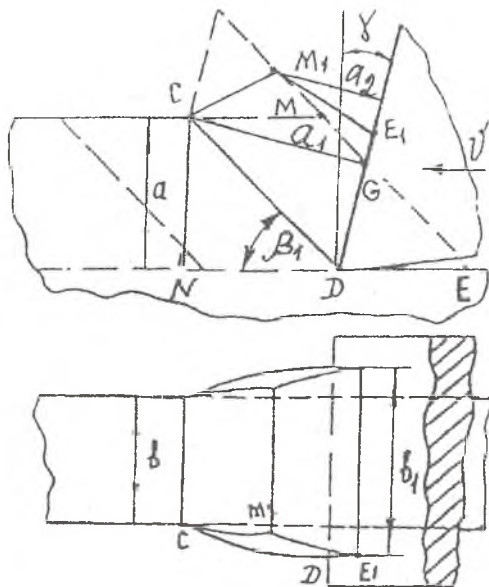


Рис. 1. Схема образования элемента стружки (свободное прямоугольное резание)

Под усадкой стружки понимают изменение размеров стружки по сравнению с соответствующими размерами срезаемого слоя. Пусть (рис. 1) лезвие, двигаясь со скоростью резания  $V$ , срезает слой металла толщиной  $a$  и шириной  $b$ . За какой-то промежуток времени  $\tau$  лезвие прошло расстояние  $l = ED = v \cdot \tau$ . При этом из объема металла, ограниченного фигурой  $EMCD$ , образовалась стружка (элемент стружки)  $E_1M_1CD$ . Отношение наибольшей толщины стружки (высоты элемента)  $a_1$  к толщине срезаемого слоя  $a$  называется коэффициентом утолщения  $K_a$ :

$$K_a = \frac{a_1}{a}. \quad (1)$$

Из сопоставления треугольников  $DCG$  и  $DCN$  можно получить:

$$K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  - передний угол лезвия;

$a$  - толщина срезаемого слоя, зависящая (рис. 2) от величины подачи  $s$  и главного угла в плане  $\varphi$ ,

$$a = s \cdot \sin \varphi; \quad (3)$$

$\beta_1$  - угол скалывания (сдвига).

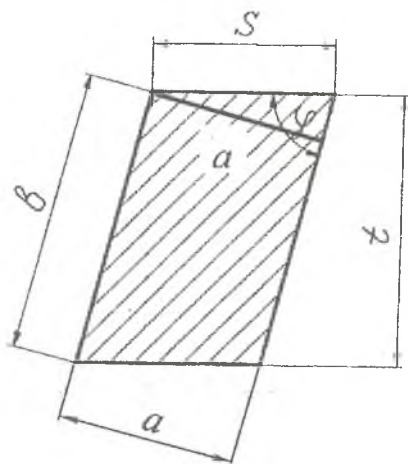


Рис. 2. Сечение среза при  $\varphi < 90^\circ$

Зворыкин нашел, что

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho + \rho_1}{2}, \quad (4)$$

где  $\rho$  - угол внешнего трения,

$\rho_1$  - угол внутреннего трения.

Как известно, углы трения связаны с коэффициентами трения

$$\operatorname{tg} \rho = \mu; \quad \operatorname{tg} \rho_1 = \mu_1, \quad (5)$$

определение которых вызывает большие затруднения. В связи со сказанным, угол скалывания (сдвига) чаще определяют после нахождения  $K_a$  по (1) с использованием формулы (2), из которой следует

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma}. \quad (6)$$

Исследования показывают, что в зависимости от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режимов резания и других факторов коэффициент утолщения колеблется от  $K_a = 1,1$  до  $K_a = 5$ , теоретически (см. рис. 1) при  $\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2}$  может быть и  $K_a = 1$ , т.е. в общем случае  $K_a = 1,0 \div 5$ .

Отношение ширины стружки  $\sigma_1$  к ширине срезаемого слоя  $\sigma$  называют коэффициентом уширения ( $K_\sigma$ ):

$$K_\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma}, \quad (7)$$

где, как это следует из рис. 2,

$$\sigma = \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (8)$$

Коэффициент уширения, в зависимости от самых различных факторов, колеблется в пределах от  $K_\sigma = 1,05$  до  $K_\sigma = 1,2$ . Большое влияние на его величину оказывает отношение  $\frac{\sigma}{a}$  или, что то же самое  $-\frac{t}{s}$ , чем больше это отношение, тем меньше  $K_\sigma$ . При практически используемых режимах резания для большинства расчетов можно принимать  $K_\sigma = 1,0$ , т.е. в общем случае  $K_\sigma = 1,0 \dots 1,2$ .

Отношение длины пути, пройденного лезвием по срезаемому слою,  $\ell = ED$  к длине образовавшейся стружки  $\ell_1 = E_1D$  (см.рис.1) называется коэффициентом продольной усадки стружки ( $K_\ell$ ):

$$K_\ell = \frac{\ell}{\ell_1}. \quad (9)$$

Из равенства объемов металла до деформации (пл.  $EDCM \times \sigma$ ) и после деформации (пл.  $E_1DCM_1 \times \sigma_1$ ) следует

$$a \cdot \sigma \cdot \ell = \frac{a_1 + a_2}{2} \sigma_1 \cdot \ell_1,$$

откуда с учетом (7)

$$K_\ell = \frac{\ell}{\ell_1} = \frac{a_1}{a} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma} \cdot \frac{a_1 + a_2}{2a_1}, \quad (10)$$

где  $a_2$  - наименьшая толщина стружки (наименьшая высота элемента).

Имея в виду (1) и (7), можно написать:

$$K_\ell = K_\sigma K_\epsilon \frac{a_1 + a_2}{2a_1}, \quad (11)$$

или

$$K_\ell = K_a \cdot K_\sigma \cdot K_{снл}. \quad (12)$$

Выражение

$$K_{снл} = \frac{a_1 + a_2}{2a_1} \quad (13)$$

называют *коэффициентом сплошности стружки*, который меняется от  $K_{снл} = 0,5$  при ( $a_2 = 0$ ) для предельно элементной стружки, когда она состоит из элементов треугольной формы, до  $K_{снл} = 1,0$  (при  $a_2 = a_1$ ) для идеально сливной стружки, когда она имеет вид сплошной ленты, т.е.  $K_{снл} = 0,5 \dots 1,0$ .

Для оценки вида стружки часто используют не  $K_{снл}$ , а *коэффициент элементности*, который представляет собой максимальную величину относительной деформации стружки (элемента) в направлении, перпендикулярном к передней поверхности инструмента, т.е.

$$K_\Delta = \frac{a_1 - a_2}{a_1} \quad \text{или} \quad K_\Delta = 1 - \frac{a_2}{a_1}. \quad (14)$$

Для идеально сливных стружек ( $a_2 = a_1$ )  $K_\Delta = 0$ , а для предельно элементных ( $a_2 = 0$ ) -  $K_\Delta = 1,0$ , т.е.  $K_\Delta = 0 \dots 1,0$ .

Иногда вид стружки («элементность») выражают в %:

$$\Delta = K_\Delta \cdot 100.$$

Сопоставляя (13) и (14), получим соотношение между  $K_{снл}$  и  $K_\Delta$ :

$$K_{снл} = 1 - \frac{K_\Delta}{2}. \quad (15)$$

Если иметь в виду принятые нами предельные изменения  $K_a, K_\sigma, K_{снл}$ , то  $K_\ell$  может принимать значения  $K_\ell = 0,5 \dots 6$ .

В связи с тем что коэффициент продольной усадки является обобщенным (включает в себя  $K_a$  и  $K_e$ ) и более чувствительным по сравнению с другими (при одинаковых условиях изменяется в более широких пределах), его используют чаще других и называют коэффициентом усадки.

Обращает на себя внимание, что  $K_e$  может быть меньше единицы. Усадка стружки с  $K_e < 1,0$  называется отрицательной усадкой. Под отрицательной усадкой понимается явление, связанное с увеличением размера по сравнению с исходным. В данном случае длина образовавшейся стружки больше длины срезаемого слоя.

Деформация металла по высоте элемента переменна, чем ближе к передней поверхности лезвия, тем больше деформация, и по этой причине контактная поверхность ( $AD_1$ ) элемента больше размера  $BC_1'$  по надконтактной поверхности элемента (рис.3).

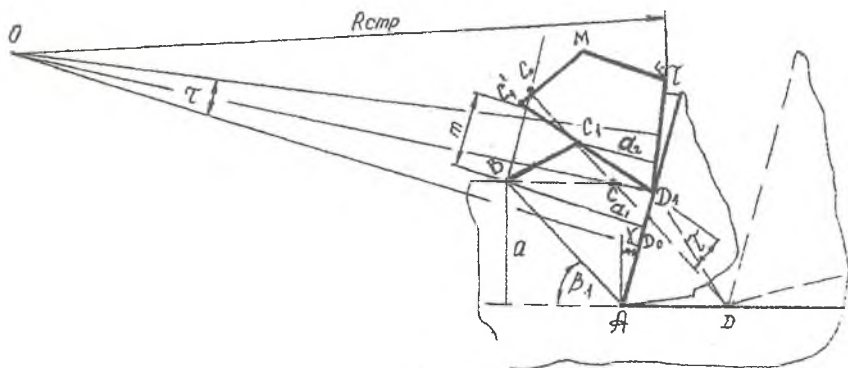


Рис. 3. Схема механизма естественного завивания стружки

В связи с этим поверхности скалывания ( $AB, D_1C_1', EM$  и др.) окажутся расположенными под углом  $\tau$  друг к другу и контактные поверхности элементов образуют многоугольник с описанной окружностью радиусом

$$R_{cmp} = \frac{m}{2 \sin \frac{\tau}{2}} + a_1, \quad (16)$$

где  $R_{cmp}$  - радиус естественного завивания стружки;

$m = BC_1'$  - шаг элементов стружки;

$\tau$  - угол между поверхностями сдвига.



Как правило, стружка завивается в цилиндрическую или плоскую спираль. Направление и шаг спирали зависят от многих факторов, однако наибольшее влияние на вид и направление спирали оказывает угол наклона лезвия  $\lambda$ . Если лезвие имеет  $\lambda < 0$ , чаще образуется правая спираль, сходящая в сторону обрабатываемой поверхности, при  $\lambda > 0$  - левая спираль, сходящая в сторону обработанной поверхности, и при  $\lambda \approx 0$  - возможна плоская (архимедова) спираль.

Коэффициенты усадки стружки в некоторых случаях используются для количественной характеристики процесса резания. В частности, коэффициент продольной усадки стружки определяет *скорость движения стружки* относительно передней поверхности лезвия

$$v_{cmp} = \frac{v}{K_t} \quad (17)$$

и частоту образования элементов стружки,  $1/c$

$$f = \frac{1000v}{60 \cdot K_t \cdot m}, \quad (18)$$

где  $m$  - шаг элементов стружки.

Главным преимуществом коэффициентов усадки является простота, доступность их определения в любых условиях. Однако они не определяют количественно деформацию в зоне резания, во-первых потому, что эти коэффициенты по своему определению являются показателями линейных изменений размеров и не учитывают угловые деформации, во-вторых, не все из них учитывают реальные соотношения размеров. Например,  $K_a$  является отношением максимальной толщины стружки (высоты элемента) и не учитывает реальную форму стружки (элемента, который характеризуется еще и минимальной толщиной  $a_2$ ).

В связи со сказанным, целесообразно оценивать величину деформации в зоне резания общепринятыми параметрами пластической линейной деформации - величиной относительных деформаций. В наших обозначениях

$$\delta_t = \frac{\ell_1 - \ell}{\ell};$$

$$\delta_a = \frac{a_1 + a_2 - a}{a};$$

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma}$$

или с учетом (2),(5),(8) и (9) получим:

$$\delta_e = \frac{1}{K_e} - 1; \quad (19)$$

$$\delta_a = K_a K_{cna} - 1; \quad (20)$$

$$\delta_e = K_e - 1. \quad (21)$$

Относительная угловая деформация (относительный сдвиг), численно равная отношению величины сдвига  $CC_1$  (рис. 4) к высоте расположения рассматриваемого слоя относительно плоскости скалывания (сдвига), т.е. тангенсу угла  $\omega_1$ , определится как

$$\varepsilon = \text{ctg} \beta_1 + \text{tg}(\beta_1 - \gamma - \omega), \quad (22)$$

где  $\omega$  – угол «недосдвига».

Приняв  $BC_0 = m$  (см. рис.4.), можно получить

$$\text{ctg} \omega = \frac{m}{a_1 - a_2} - \text{tg}(\beta_1 - \gamma). \quad (23)$$

Относительный сдвиг определяет угол текстуры

$$\text{tg}(2\eta) = \frac{2}{\varepsilon}. \quad (24)$$

Напомним, под углом текстуры в стружке (рис. 5)  $\eta$  понимают направление наибольшей вытянутости зерен металла, т.е. направление наибольших удлинений или, что то же самое, направление одной из главных осей деформации.

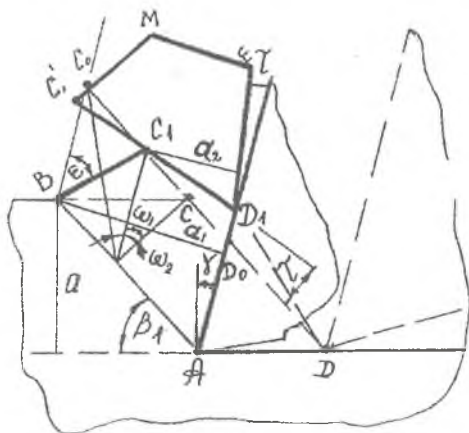


Рис. 4. Схема изменения формы и размеров деформируемого объема при образовании элемента стружки

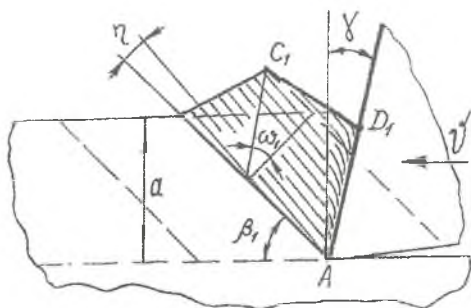


Рис. 5. Схема элемента стружки с текстурой

Показатели относительной деформации имеют определенную ориентацию относительно стружки: по длине стружки –  $\delta_l$ , по высоте –  $\delta_a$  и по ширине –  $\delta_e$ . Это позволяет управлять процессом резания, выбирая и изменяя соответствующим образом те параметры (геометрию инструмента, режим резания и др.), которые оказывают наибольшее влияние в желаемом направлении. Например, известно, что с увеличением деформации сжатия  $\delta_a$  увеличивается элементность стружки, и наоборот, с увеличением относительного сдвига  $\varepsilon$  увеличивается её сплошность. Следовательно, воздействуя на величину отношения  $\frac{\varepsilon}{\delta_a}$ , можно изменять вид стружки и все связанное с этим (величину и характер сил резания, склонность к возникновению вибраций, качество поверхности и поверхностного слоя, интенсивность износа инструмента и др.).

Для оценки преимущественного вида деформации в осуществляемом процессе резания используют отношение  $\frac{\varepsilon}{\delta_l}$ .

Если это отношение больше единицы ( $\frac{\varepsilon}{\delta_l} > 1$ ), то преимущественный вид деформации – сдвиг, а деформированное состояние – сдвиг со сжатием.

Если это отношение меньше единицы ( $\frac{\varepsilon}{\delta_l} < 1$ ), то преимущественный вид деформации – сжатие, а деформированное состояние – пластическое сжатие со сдвигом.

Деформация в каждом из определенных направлений (в направлении  $(\alpha_1, \sigma_1, \ell_1)$ ) вносит свой вклад в общее деформированное состояние зоны реза-

ния. Некоторой суммарной, приведенной характеристикой деформации в зоне резания является интенсивность деформации. Для плоского деформированного состояния (в связи с  $K_a \approx 1$ ) эта величина имеет выражение

$$e_{иср} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_{a_1}^2 + e_{a_1} e_\ell + e_\ell^2 + \frac{1}{4} q^2}, \quad (25)$$

где  $e_{a_1}$  - истинная деформация в направлении толщины стружки;

$e_\ell$  - истинная деформация в направлении длины стружки;

$q$  - истинная деформация сдвига.

В общем случае истинная деформация определяется как

$$e = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{x} = \ln \frac{x}{x_0}$$

или для нашего случая

$$e_{a_1} = \ln \frac{a_1 + a_2}{2a_1} = \ln \frac{K_\ell}{K_a K_\sigma}; \quad (26)$$

$$e_\ell = \ln \frac{2a_1}{K_a(a_1 + a_2)} = \ln \frac{K_a}{K_\ell}; \quad (27)$$

$$e_\sigma = \ln \frac{\sigma_1}{\sigma} = \ln K_\sigma. \quad (28)$$

Истинный сдвиг

$$q = \ln(1 + \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \eta).$$

Однако расчеты показывают, что в пределах возможных деформаций в зоне резания истинный сдвиг отличается от относительного сдвига менее чем на 1%, поэтому можно считать, что  $q \approx \varepsilon$ .

Для идеально сливной стружки, когда  $K_\ell = K_a K_\sigma$  и  $e_{a_1} = 0$ , формула (25) примет вид

$$e_{иср} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_\ell^2 + \frac{1}{4} q^2}, \quad (29)$$

где, как это следует из формулы (27),

$$e_\ell = \ln \frac{1}{K_\sigma}. \quad (30)$$

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

### 2.1. Определение вида стружки

Ранее отмечалось, что на основе достаточно простых расчетов по измененным параметрам стружки можно установить характер процесса резания и направления изменения условий резания (увеличение или уменьшение  $v, s, \gamma, \varphi$  и т.д.) для достижения желаемых результатов. С этой целью проводят соответствующие исследования.

Известно, что на характер стружкообразования оказывают влияние все элементы режима резания ( $v, s, t$ ), геометрические параметры режущего инструмента ( $\gamma, \varphi, \lambda$  и т.д.) и многое другое. Однако наиболее существенное, а часто решающее влияние на все параметры деформации в зоне резания оказывают скорость резания  $v$ , величина подачи  $s$  и величина переднего угла резания  $\gamma$ . Именно поэтому наибольшее число исследований посвящено влиянию этих факторов на деформированное состояние зоны резания. То же рекомендуется и в настоящей работе. С этой целью необходимо провести 3 серии опытов, в каждой из которых всё (режимы, геометрия и др.) остается неизменным, кроме одного параметра ( $v, s$  или  $\gamma$ ) в зависимости от серии.

В первой серии опытов изменяется только скорость резания  $v$ , во второй – величина подачи  $s$  и в третьей – величина переднего угла  $\gamma$  резца.

Методика проведения исследования деформации в зоне резания в своей основе едина. Однако в зависимости от характера образующейся стружки можно выбрать те или иные методы (способы) постановки опытов, измерения и расчета параметров получающихся стружек, которые позволяют значительно сократить затраты времени на проведение исследований.

Из анализа механизма образования стружки и изложенного в разд. 1 следует, что все стружки имеют циклическое элементное строение. Однако в практических целях в ряде случаев их целесообразно делить на два типа – «сливные» и «элементные».

Как показывает практика и соответствующие расчеты, все стружки, сплошность которых  $K_{cml} > 0,925$  или, что то же самое, элементность  $K_3 < 0,15$ , можно относить к сливным.

Вообще говоря, при таком допущении величины рассчитанных относительных деформаций иногда существенно меняются (некоторые показатели уменьшаются, а другие возрастают), но, как правило, таким образом, что основной показатель деформированного состояния – интенсивность деформации  $e_i$  имеет практически допустимую погрешность.

Потеря некоторой точности в определении интенсивности деформации окупается, с одной стороны, уменьшением расчетов, т.к. при допущении  $a_2 = a_1$  и, следовательно,  $\omega = 0$  все формулы, приведенные в разд. 1, упрощаются, с другой стороны, и это главное, при этом многократно снижается трудоемкость постановки и выполнения опытов и измерений параметров стружки, в частности отпадает необходимость в изготовлении микрошлифов стружек, что не всегда возможно.

При обработке материалов с большим отношением  $\frac{\tau_s}{\delta_s}$  (более  $0,5 \div 0,7$ ), к которым относятся коррозионно-стойкие, жаропрочные и титановые сплавы, цинковые и некоторые легкие сплавы, образуется стружка с большой элементностью ( $K_{\Sigma} > 0,3 \div 0,5$ ).

Достоверный анализ напряженно-деформированного состояния зоны резания, а следовательно всех тех явлений, которые имеют место при обработке резанием этих материалов, возможен только на основе представления о циклическом механизме элементного стружкообразования. И в связи с этим необходимо исследование резания с образованием «элементных стружек».

С целью получения наиболее достоверных результатов исследования напряженно-деформированного состояния зоны резания в условиях образования самых разнообразных типов («сливных» и «элементных») и видов (лентообразных, спиральных, «путаных» и т.д.) стружек разработано большое число различных методов проведения экспериментов, измерения параметров зоны резания, стружки и обработки опытных данных, таких, например, как скоростная (с частотой до 24000 кадров в секунду) микрокиносъемка, использование длительных микросеток, объемные и весовые измерения и т.д.

Однако в условиях дефицита учебного времени, отведенного на изучение физических основ процесса резания, необходимо сосредоточить внимание студентов на выполнении конкретной задачи – изучение напряженно-деформированного состояния зоны резания и влияния на него элементов режима резания и геометрии инструмента. Методы проведения опытов и измерения параметров стружек здесь играют подчиненную роль и не являются объектом изучения.

## 2.2. Постановка опытов в условиях образования «сливных» стружек

Для того чтобы при тчении получалась «сливная» стружка, необходимо иметь заготовку из достаточно пластичного материала, и что особенно важно, с возможно меньшим  $-\frac{\tau_s}{\sigma_s}$  (не более  $0,5 - 0,7$ ). Такими свойствами обладают уг-

леродистые конструкционные стали, в том числе самая распространенная из них ст.45.

С целью упрощения измерений и вычислений при определении пути ( $\ell$ ), пройденного резцом по срезаемому слою, для проведения опытов целесообразно использовать специально подготовленную заготовку, которая изображена на рис.6.

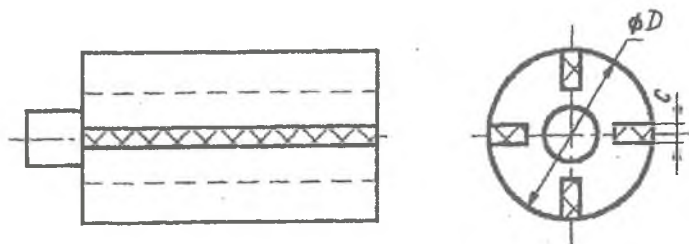


Рис. 6. Заготовка

Как видно из рисунка, заготовка имеет несколько ( в данном случае 4) продольных пазов, которые и делят путь резца на отрезки равной длины во всех опытах:

$$\ell = \frac{\pi(D-t)}{z} - c, \quad (31)$$

где  $D$  – диаметр заготовки;  
 $t$  – глубина резания;  
 $z$  – число пазов;  
 $c$  – ширина паза.

Пазы заготовки заполнены пластической массой, что позволяет избежать резких колебаний сил и выкрашивания режущей кромки резца.

Для проведения опытов необходимо иметь комплект проходных резцов из быстрорежущей стали Р18 с постоянной геометрией, например,  $\varphi=45^\circ$ ;  $\varphi_1=15^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$ ;  $\lambda = -2$ ;  $r = 0,5$  мм при  $\gamma$  разной величины: 5; 10; 15; 25°.

С целью предотвращения разлетания стружки при проведении опытов целесообразно устанавливать на станке специальный экран.

После закрепления заготовки в самоцентрирующем патроне с поддержкой центром задней бабки необходимо заготовку обточить «на верность» до удаления «черновин» и установить экран.

Для проведения опытов в 1-й серии в резцедержателе необходимо закрепить резец с  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\gamma = 15^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$ ;  $\lambda = -2$ ;  $r = 0,5$  мм так, чтобы его вершина располагалась на уровне центров станка (иначе его геометрия изменится); установить режим резания, например  $t = 2$  мм и  $s = 0,21$  мм/об,

и последовательно изменяя частоту вращения шпинделя:  $n = 25; 50; 100; 200$  об/мин, производить точение, сбор стружки при каждом  $n$  и их упаковку в пакеты с соответствующими пометками.

При сборе стружек в каждом опыте следует иметь в виду, что первые 4-5 стружек, образовавшихся после начала резания, имеют переменную толщину и должны быть выброшены. При каждом опыте отбирается 6-7 наиболее характерных по виду стружек, после чего выключается подача (стружки, образовавшиеся после выключения подачи также имеют переменную толщину и выбрасываются).

**Для проведения опытов 2-й серии рекомендуется:**

– использовать тот же резец, который был установлен в первой серии опытов;

– установить  $t = 2$  мм;  $n = 100$  об/мин; производить точение и собирать стружку последовательно при  $s = 0,11; 0,21; 0,30; 0,39$  мм/об; при отборе стружек следует выполнять все то, что было сказано по этому поводу выше.

Третья серия опытов проводится при постоянных  $v(n)$  и  $s$  и переменных передних углах  $\gamma$ . Рекомендуется принять  $t = 2$  мм;  $s = 0,21$  мм/об;  $n = 100$  об/мин. В резцедержатель станка последовательно устанавливаются резцы с  $\gamma = 5; 10; 15; 25^\circ$ , при работе с которыми отбираются стружки и помещаются в пакеты с соответствующими пометками. На этом заканчивается практическая часть работы на токарном станке.

### 2.3. Постановка опытов в условиях образования «элементных» стружек

Для того чтобы при точении получалась элементная стружка, необходимо иметь заготовку с достаточно большим отношением  $\frac{\tau_s}{\sigma_s}$  (больше 0,5-0,7). К таким материалам относятся, например, титановые сплавы, в частности сплав ВТЗ-1. С целью исключения возникновения вибраций целесообразно использовать заготовку с  $\frac{L}{D} \leq 5+6$ .

Для проведения опытов необходимо иметь комплект проходных резцов, оснащенных твердым сплавом ВК8 (или ВК6М) с геометрией, например,  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_l = 15^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_l = 8^\circ$ ;  $\lambda = -2^\circ$ ;  $r = 0,5$  мм при  $\gamma$  разной величины: 0; 10; 15; 20; 30°.

После закрепления заготовки на станке в самоцентрирующем патроне с поддержкой центром задней бабки необходимо ее обточить «на верность» до удаления «черновин».



Для проведения опытов 1-й серии  $\delta = f(v)$  в резцедержателе закрепить резец с  $\gamma = 0^\circ \dots -2^\circ$  так, чтобы его вершина располагалась на уровне центров станка (иначе геометрия изменится); установить режим резания; например  $t = 1,5$  мм и  $s = 0,4$  мм, и последовательно менять частоту вращения шпинделя станка, например  $n = 58, 96, 120, 150, 230, 305, 370$  об/мин, производить точение, сбор стружки при каждом  $n$  и их упаковку в пакеты с соответствующими пометками.

При сборе стружки в каждом опыте следует иметь в виду, что она, получающаяся на первых оборотах заготовки и после выключения подачи, имеет переменную толщину и должна быть выброшена.

Для проведения опытов 2-й серии –  $\delta = f(s)$  рекомендуется использовать тот же резец, который был установлен в первой серии опытов, принять  $t = 1,5$  мм и  $n = 150$  об/мин и производить точение при  $s = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$  мм/об. При отборе стружек следует выполнять все то, что было сказано по этому поводу выше.

Третья серия опытов –  $\delta = f(\gamma)$  производится при постоянных  $t = 1,5$  мм;  $s = 0,4$  мм/об;  $n = 150$  об/мин и переменных  $\gamma$ . При этом в резцедержатель станка последовательно устанавливаются резцы с  $\gamma = 0; 10; 15; 20; 30^\circ$ , при работе с которыми отбираются стружки и помещаются в пакеты с соответствующими пометками.

При этом заканчивается практическая часть работы на токарном станке.

Наиболее трудоемкая часть работы состоит в изготовлении шлифов стружек. Из стали изготавливаются чашечки  $\varnothing 25 \dots 30$  мм и глубиной  $2 \dots 2,5$  мм. Чашечки нумеруются, составляется таблица, аналогичная табл. 2.1. Кусочки отобранных стружек длиной  $20 \dots 25$  мм помещаются в чашечки так, чтобы одна из боковых сторон легла на дно, а прирезцовая сторона стружки была перпендикулярна дну, и заливаются эпоксидной смолой. После отвердевания смолы чашечки устанавливаются на магнитной плите плоскошлифовального станка и шлифуются до четкого выявления контуров элементов стружки. Вся описанная работа выполнена лаборантами и представляется в виде 32 шлифов и табл. 2.1.

Таблица 2.1. Параметры шлифов стружек, полученных при точении ВТ3-1. резцами ВК8 с  $\varphi = 45^\circ; \varphi_1 = 15^\circ; \alpha = \alpha_1 = 8^\circ; \lambda = -2; r = 0,5$  мм при  $D = 50$  мм;  $t = 1,5$  мм и разных  $s, n$  и  $\gamma$

Шлиф, №	$S$	$n$	$\gamma$	Шлиф, №	$S$	$n$	$\gamma$
1	0,2	58	-2	17	0,8	120	-2
2	0,3	58	-2	18	1,0	120	-2
3	0,4	58	-2	19	0,2	150	-2
4	0,6	58	-2	20	0,3	150	-2

5	0,8	58	-2	21	0,4	150	-2
6	1,0	58	-2	22	0,6	150	-2
7	0,2	96	-2	23	0,8	150	-2
8	0,3	96	-2	24	1,0	150	-2
9	0,4	96	-2	25	0,4	150	0
10	0,6	96	-2	26	0,4	150	10
11	0,8	96	-2	27	0,4	150	15
12	1,0	96	-2	28	0,4	150	20
13	0,2	120	-2	29	0,4	150	30
14	0,3	120	-2	30	0,4	230	-2
15	0,4	120	-2	31	0,4	305	-2
16	0,6	120	-2	32	0,4	370	-2

Таблица позволяет составить несколько вариантов комплексов условий проведенных опытов. Например, если следовать рекомендациям, указанным в изложении (см. выше) процедуры постановки опытов, то получим следующий комплекс:

Серия опытов  $\delta = f(v)$  при постоянных  $t = 1,5$  мм,  $s = 0,4$  мм/об и  $\gamma = 0$  и переменных  $n = 58; 96; 120; 150; 230; 305; 370$  об/мин представлена соответственно шлифами: №3, 9, 15, 21, 30, 31 и 32.

Серия опытов  $\delta = f(s)$  при постоянных  $t = 1,5$  мм,  $n = 150$  об/мин,  $\gamma = 0$  и переменных  $s = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$  мм/об представлена соответственно шлифами: № 19, 20, 21, 22, 23, 24.

Серия опытов  $\delta = f(\gamma)$  при постоянных  $t = 1,5$  мм,  $n = 150$  об/мин,  $s = 0,4$  мм/об и переменных  $\gamma = 0; 10; 15; 20; 30^\circ$  представлена соответственно шлифами: № 25, 26, 27, 28, 29.

Аналогично можно получить и еще несколько вариантов.

#### 2.4. Измерение параметров стружек

Вторая часть работы связана с необходимыми измерениями параметров стружки.

Для измерений параметров стружки используются микрометры с пределами измерений 0...25 мм, штангенциркули, инструментальные микроскопы и полоски миллиметровой бумаги.

При всей простоте измерений и расчетов, при достаточно большом количестве используемых величин (более 40) не исключается возможность ошибок. Чтобы избежать их, необходимо придерживаться определенной последовательности в измерениях, расчетах и в заполнении соответствующих таблиц.

Рекомендуется следующий план выполнения этой части работы:

1. Определение скорости резания, м/мин

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

и параметров срезанного и превращенного в стружку металла  $t$ ,  $s$ ,  $a$ :

$$s = \frac{t}{\sin \varphi};$$

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

$$F_{\varphi} = t \cdot s = s \cdot a.$$

Для сливной стружки определяется  $\ell$  и  $\ell_1$ :

$$\ell = \frac{\pi(D-t)}{4} - c;$$

$\ell_1$  – длина стружки, измеряется с помощью полоски миллиметровой бумаги. За длину принимается средняя величина из трех измеренных.

Для «элементной» стружки  $\ell$  и  $\ell_1$  не измеряются, а поэтому клетки в таблице прочеркиваются.

При вычислениях и измерениях здесь и далее во всех других пунктах плана заполняются соответствующие таблицы протокола (в данном случае таблица 1).

2. Определение параметров стружек:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $m$  и  $\omega$  для «элементной» стружки в *продольном сечении* и  $a_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  и  $v_1$  для «сливной» стружки в *поперечном сечении*.

Для измерения параметров продольного и поперечного сечения стружки используется инструментальный микроскоп при работе в отраженном свете.

Окуляры основного и малого отсчетного микроскопа настраиваются так, чтобы было видно четкое изображение сетки головки и угловой шкалы. Затем угловая шкала поворачивается до совмещения ее нулевого штриха с нулевым штрихом нониуса. При этом одни из линий сетки головки станут параллельными продольному перемещению стола, а перпендикулярные к ним – поперечному.

Для измерений параметров «элементной» стружки в продольном сечении на стол микроскопа помещается шлиф стружки, и микроскоп (подъемом или опусканием его тубуса) настраивается на четкое изображение элементов стружки. Вручную шлиф устанавливается так, чтобы вершины двух соседних элементов располагались на горизонтальной осевой линии сетки. При необходимости используются микровинты продольного и поперечного перемещения стола микроскопа. Микроскоп готов к измерениям.

Измерение шага элементов –  $m$ .

Продольным перемещением стола точка перекрестия осевых линий сетки совмещается с вершиной элемента и считывается показание шкалы микровинта продольного перемещения стола. Далее винтом продольного перемещения точка перекрестия осевых линий сетки перемещается на вершину соседнего элемента и считывается показание шкалы микровинта. Разность двух отсчетов и есть величина шага элементов стружки –  $m$ .

#### Измерение наибольшей высоты элемента – $a_1$ .

Точку перекрестия осевых линий сетки необходимо установить на вершину элемента и считать показание со шкалы микровинта поперечного перемещения стола. Затем винтом поперечного перемещения совместить точку перекрестия с контактной поверхностью (линией) стружки и снять при этом показание шкалы. Разность двух отсчетов и есть наибольшая высота элемента –  $a_1$ .

#### Измерение наименьшей высоты элемента – $a_2$ .

Перекрестие осевых линий сетки с помощью продольного и поперечного перемещения стола необходимо совместить с наиболее низкой точкой надконтактной поверхности стружки и сделать отсчет с шкалы микровинта поперечного перемещения. Поперечным перемещением стола совместить точку перекрестия сетки с контактной поверхностью стружки и сделать второй отсчет. Разность двух отсчетов и есть наименьшая высота элемента –  $a_2$ .

#### Измерение угла «недосдвига» – $\omega$ (и угла $\beta_1$ ).

Поперечным и продольным перемещением стола установить точку перекрестия осевых линий сетки на вершину элемента. При этом надо убедиться, что вершина второго элемента лежит на горизонтальной осевой линии сетки, а нулевой штрих угловой шкалы совпадает с нулевым штрихом нониуса. Повернуть сетку до совмещения горизонтальной осевой линии с надконтактной поверхностью элемента. Показание угловой шкалы и (нониуса) и есть величина угла «недосдвига» –  $\omega$ .

Если на шлифе стружки достаточно четко видна та часть поверхности (плоскости) скалывания, которая лежит между вершиной элемента и наиболее низкой точкой впадины (участок  $C'_0C_1$  на рис. 4), то целесообразно измерить угол  $C'_0BA$  (см. рис. 4) и с его помощью определить угол скалывания  $\beta_1$ .

Для этого необходимо, считав величину угла  $\omega$  по угловой шкале, продолжать поворачивать сетку до совмещения осевой линии с плоскостью скалывания и сделать отсчет по угловой шкале, при этом  $\beta_1 = \angle C'_0BA - 90^\circ + \gamma$ .

Аналогично можно измерить и угол  $\tau$ . Однако при выполнении работы студентами такое определение  $\beta_1$  и  $\tau$  необязательно.

Для измерения параметров  $v_1$  и  $a_1$  «сливной» стружки в поперечном сечении небольшой отрезок стружки (20...25 мм) вдавливается в кусочек пластили-

на и устанавливается на столе микроскопа так, чтобы контактная поверхность стружки заняла вертикальное, а поперечное сечение – горизонтальное положение.

При «нулевом положении» угловой шкалы изображение сечения стружки вручную и, при необходимости, поворотом стола и перемещениями стола устанавливается так, чтобы контактная поверхность (на изображении в микроскопе – линия) была параллельна горизонтальной осевой линии сетки. Вертикальным перемещением тубуса достигается четкое изображение поперечного сечения стружки. Затем при продольных перемещениях стола измеряются  $\delta_2$  и  $\delta_3$  (рис. 7):

$$\sigma_1 = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2},$$

а при поперечных –  $a_1$ .

Целесообразно измерить  $a_1$  на других кусках стружки с помощью микрометра и сопоставить с измерениями на микроскопе.

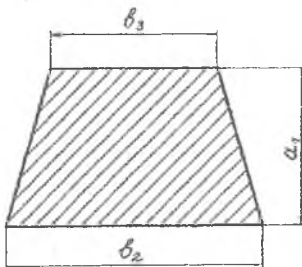


Рис. 7. Поперечное сечение стружки

Все результаты измерений заносятся в табл. 2 протокола.

При этом – у «сливной» стружки  $a_2 = a_1$ ;

$$m = 0;$$

$$\omega = 0;$$

для «элементной» стружки  $\delta_2$  и  $\delta_3$  не измерялись, а поэтому клетки  $\delta_2$  и  $\delta_3$  в табл. 2 прочеркнуть и принять для всех опытов  $\delta_1 = 2.29$  (это средняя величина в опытах, вошедших в табл. 2.1).

### 2.5. Расчет показателей деформированного состояния зоны резания

1. По формулам (1), (7), (9) и (11) рассчитываются коэффициенты утолщения, уширения и продольной усадки –  $K_w$ ,  $K_e$  и  $K_l$ ; по формуле (6) – угол скальвания  $\beta_1$  и формуле (17) – скорость движения стружки относительно передней поверхности –  $v_{стр}$ . Результаты заносятся в табл. 3 протокола.

2. По формулам (19), (20) и (21) определяются величины относительных  $(\delta_\ell, \delta_a, \delta_\sigma)$ , а по формулам (26), (27) и (28) – истинных  $(e_{a1}, e_\ell, e_\sigma)$  линейных деформаций, по формуле (22) относительный (и истинный) сдвиг ( $\varepsilon$ ). Заполняется табл. 4 протокола.

3. Определяется отношение  $\frac{\varepsilon}{\delta_\ell}$  (показатель преимущественного вида деформации), по формуле (24) – направление главных осей деформации (направление текстуры) и, наконец, по формуле (25) – интенсивность деформации  $e_{i\text{ср}}$ .

4. Результаты сводятся в табл. 5 протокола.

## 2.6. Оформление результатов исследования

1. Каждый студент заполняет таблицы 1-5 протокола исследования в бланке отчета (см. приложение). При этом студенты обмениваются результатами по всем сериям опытов.

2. В соответствии с заданием преподавателя каждый студент должен построить 4 графика влияния  $v$ ,  $s$  или  $\gamma$  на показатели состояния зоны резания по результатам одной из серий опытов. Так, например:

По результатам 1-й серии опытов	$K_\ell, K_a, K_\sigma = f(v);$ $\beta_1, \eta = f(v);$	$\delta_\ell, \delta_a, \delta_\sigma = f(v);$ $\varepsilon, e_{i\text{ср}} = f(v)$
По результатам 2-й серии опытов	$K_\ell, K_a, K_\sigma = f(s);$ $\beta_1, \eta = f(s);$	$\delta_\ell, \delta_a, \delta_\sigma = f(s);$ $\varepsilon, e_{i\text{ср}} = f(s)$
По результатам 3-й серии опытов	$K_\ell, K_a, K_\sigma = f(\gamma);$ $\beta_1, \eta = f(\gamma);$	$\delta_\ell, \delta_a, \delta_\sigma = f(\gamma);$ $\varepsilon, e_{i\text{ср}} = f(\gamma)$

3. При отчете студент должен показать **умение** по данным протокола и графикам делать выводы о влиянии того или иного фактора на показатели деформации в зоне резания и возможном изменении характера процесса резания.

ОБРАЗЕЦ ОТЧЕТА

Кафедра  
"Механической обработки материалов"

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Лабораторная работа

**Деформация в зоне резания при точении и ее исследование**

Исследование влияния на показатели деформации:

- а) скорости резания  $v$
- б) подачи  $s$
- в) переднего угла  $\gamma$

*(заданное подчеркнуть)*

## Протокол исследования деформации в зоне резания

Обрабатываемый материал – Заготовка  $D =$

Материал резца – Геометрия резца  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\lambda = -2^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$ .

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\gamma$												
$n$												
$v$												
$m$												
$s$												
$a$												
$b$												
$F_{cp}$												
$l$												
$l_1$												

Таблица 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$a_1$												
$a_2$												
$b_2$												
$b_3$												
$b_1$												
$m$												
$\omega$												



Таблица 3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_a$												
$K_e$												
$K_\ell$												
$\beta_1$												
$V_{\text{ср}}$												

Таблица 4

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\delta_o$												
$\delta_a$												
$\delta_\ell$												
$e_{a1}$												
$e_\ell$												
$e_e$												
$\varepsilon$												

Таблица 5

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varepsilon$												
$\delta_\ell$												
$\eta$												
$e_{\text{ср}}$												



## СОДЕРЖАНИЕ

1. Деформация в зоне резания. ....	3
2. Исследование деформации в зоне резания. ....	12
2.1. Определение вида стружки. ....	12
2.2. Постановка опытов в условиях образования «сливных» стружек. ....	13
2.3. Постановка опытов в условиях образования «элементных» стружек. ....	15
2.4. Измерение параметров стружек. ....	17
2.5. Расчет показателей деформированного состояния зоны резания. ....	20
2.6. Оформление результатов исследования. ....	21
3. Приложение. ....	22

Учебное издание

**ДЕФОРМАЦИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

*Методические указания*

Составитель *Лепшин Василий Иванович*

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Доверстка Г. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 15.02.09. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,75.

Тираж 100 экз. Заказ 34 .

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Издательство Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.