

Ep 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 60

1955

А. В. НИКОЛЬСКИЙ

доцент, канд. техн. наук

**ЕДИНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА
СРЕДНИХ РАЗМЕРОВ ОТДЕЛЬНЫХ СРЕ-
ЗОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ДОВОДОЧНОМ
ШЛИФОВАНИИ**

P23470

ENSV Teaduste Akadeemia
Keskraamatukogu

ЭСТОНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1955

111

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

1000 S. EAST ASIAN AVENUE

CHICAGO, ILL. 60607

TEL: 773-936-3200

UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

1000 S. EAST ASIAN AVENUE

CHICAGO, ILL. 60607

UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

1000 S. EAST ASIAN AVENUE

CHICAGO, ILL. 60607

UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

1000 S. EAST ASIAN AVENUE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время шлифование является основным наиболее распространенным методом чистовой и отделочной обработки металлов.

С введением прогрессивной технологииковки, штамповки и литья, с сокращением припусков на механическую обработку значение шлифования в производстве все возрастает. Достаточно сказать, что на некоторых крупнейших заводах парк шлифовальных станков превышает половину всего станочного парка. В то же время нет полной ясности и нет единства во взглядах на основы теории шлифования. Даже в практических рекомендациях о выборе режимов резания имеется много противоречивых мнений.

Предлагаемая работа является попыткой дать некоторые единые для всех видов шлифования и доводочного шлифования закономерности на основе менее грубых допущений, чем это делалось раньше.

Эта работа является продолжением другого труда автора по анализу исходных положений теории шлифования.

I КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ШЛИФОВАНИЯ И ДОВОДОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ

При установлении закономерностей единых для разных методов шлифования прежде всего возникает вопрос о классификации этих методов на основе технологических признаков, вопрос об отказе от таких неопределенных терминов как „суперфиниш“, „хонинг-процесс“, „симплекс процесс“, „тонкая доводка“, „при-тирка“, „полировка“ и т. п.

Все эти разновидности шлифования отличаются некоторым единством цели и могут быть объединены под одним названием — доводочное шлифование.

Под доводочным шлифованием будем понимать все виды обработки абразивами с задачей ограниченной улучшением качества поверхности изделия, а иногда — уменьшением погрешностей формы и достижением особенно высокой точности размеров.

Классификацию методов шлифования в своей основе можно считать установившейся.

Разновидности доводочного шлифования целесообразно классифицировать аналогично основным методам шлифования по признакам формы обрабатываемой поверхности, характера движений подачи, вида и формы инструмента, степени свободы абразивов при обработке и т. д. Например:

1. Круглое наружное врезное доводочное шлифование периферией колеблющегося круга — рис. 1.

2. Круглое наружное врезное шлифование колеблющимися брусками — рис. 4.

3. Круглое внутреннее врезное доводочное шлифование колеблющимися брусками — рис. 5—II.

4. Круглое внутреннее продольное доводочное шлифование брусками — рис. 5—I (сравнить с рис. 2).

5. Плоское доводочное шлифование торцем круга (или торцем диска-притира и т. п.) на вращающемся столе — рис. 3.

6. Круглое наружное шлифование абразивной лентой с колебательным движением — рис. 6.

7. Доводочное шлифование абразивами в струе жидкости.

8. Доводочное шлифование эластичным кругом со свободными абразивами.

Процесс применяется, например, для придания декоративного блеска и т. д.

Таким образом по единой системе классифицируются всевозможные способы доводочного шлифования.

II ЕДИНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНИХ РАЗМЕРОВ ОТДЕЛЬНЫХ СРЕЗОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ДОВОДОЧНОМ ШЛИФОВАНИИ

Поперечные сечения в разных местах по длине каждого среза различны. Вопрос о колебании размеров сечения отдельных срезов рассматривается в другой работе. Здесь мы остановимся лишь на основном вопросе — на расчете средних размеров сечения среза, имея при этом в виду, что вопросы расчета средних усилий, мощности и производительности шлифования связаны прежде всего со средними размерами условно одинаковых срезов для каждого из режущих зерен.

1. Длина среза — l .

В процессе резания каждое зерно инструмента описывает определенную траекторию на обрабатываемой поверхности.

Уравнение этой траектории зависит от кинематики резания и различно для разных методов шлифования и доводочного шлифования.

Когда рассматриваемое отдельное зерно выходит за пределы контактного пространства инструмента с обрабатываемой деталью — траектория зерна на обрабатываемой поверхности или линия среза — обрывается. Например, при круглом наружном шлифовании периферией круга линия среза обрывается, когда зерно (на рис. 1 зерно „С“) выходит за пределы дуги контакта (на рис. 1 — дуга „АВ“).

В ряде случаев режущие зерна постоянно находятся в контактном пространстве, например, при доводочном шлифовании брусками или лентой без перебега (на рис. 4 перебег — l_n).

В период пока режущее зерно находится в контактном пространстве линия среза также может прерываться вследствие встреч зерен со сравнительно глубокими впадинами на обрабатываемой поверхности детали. Причиной появления таких впадин, помимо случайных причин, могут быть или макронеровности обрабатываемой детали (например, волнистость и другие),

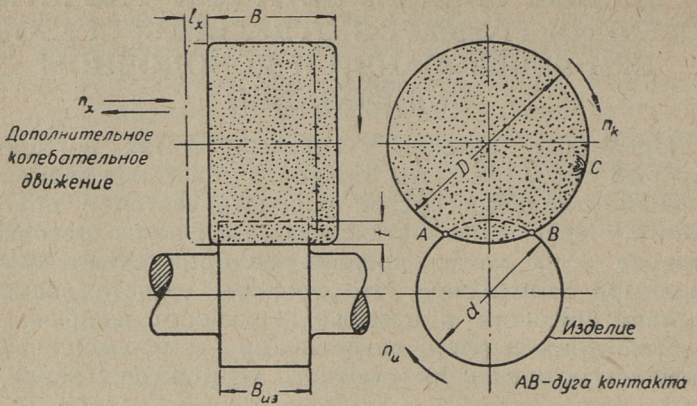


Рис. 1. Шлифование или доводочное шлифование круглое врезное колеблющимся кругом.

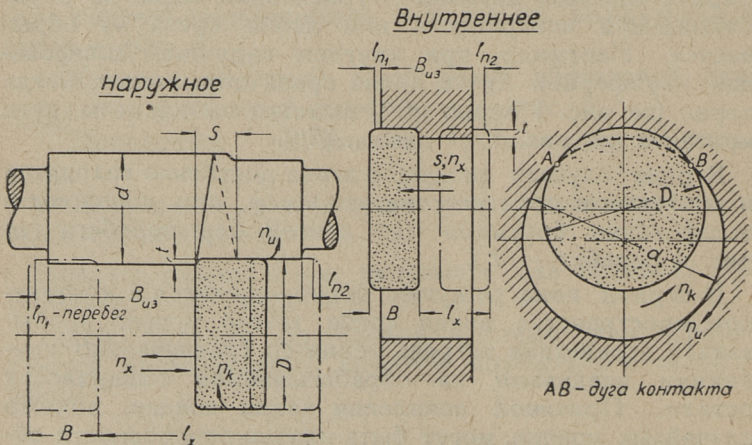


Рис. 2. Продольное шлифование круглое наружное и внутреннее.

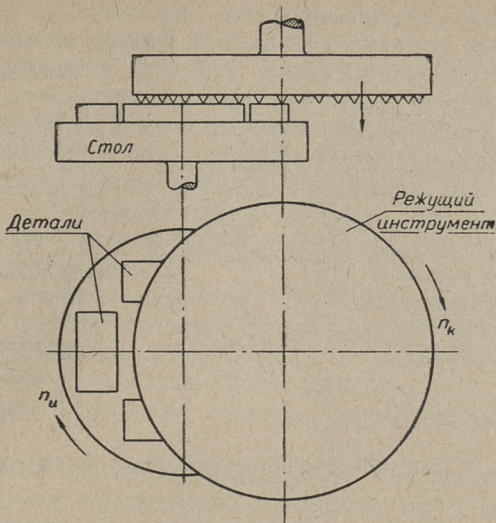


Рис. 3. Плоское шлифование или доводочное шлифование торцом круга или притиром на вращающемся столе.

І. Без перебега

ІІ. С перебегом - l_n

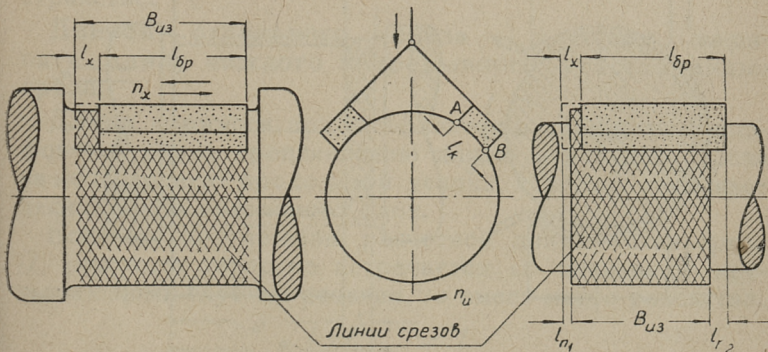


Рис. 4. Круглое наружное врезное доводочное шлифование колеблющимися брусками.

I. Продольное

II. Врезное с колебательным движением

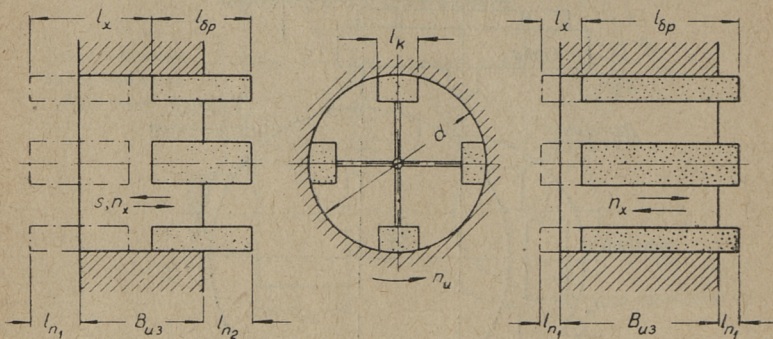


Рис. 5. Внутреннее круглое доводочное шлифование.

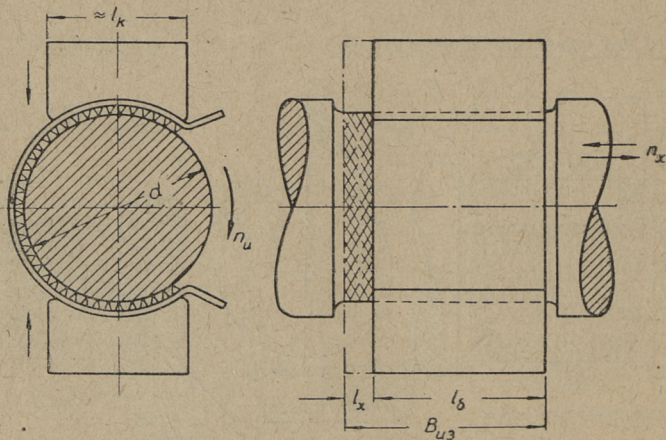


Рис. 6. Круглое наружное доводочное шлифование лентой с дополнительными колебательными движениями.

или микронеровности обрабатываемой поверхности, когда глубина впадин превышает глубину резания при рассматриваемом проходе инструмента по обрабатываемой поверхности. При наличии дополнительного колебательного движения абразивного инструмента линии срезов, пересекая друг друга, образуют на поверхности детали сетку следов обработки, в этом случае так же отдельные линии среза прерываются при встрече со сравнительно глубокими впадинами от других срезов (рис. 7).

В этих случаях срезанная стружка так же дробится на более короткие части, то есть действительная длина отдельных срезов уменьшается в зависимости от частоты перерывов линии среза (рис. 7).

Учитывая сказанное введем несколько различных понятий.

Расчетной длиной линии среза — L будем называть полную длину траектории режущего зерна в пределах одного прохода инструмента по обрабатываемой поверхности и в пределах одного нахождения зерна в контактном пространстве абразивного инструмента с обрабатываемой деталью.

Длиной линии среза (действительной) — l_{cp} будем называть длину траектории режущего зерна только в срезанном металле в пределах одного прохода инструмента по обрабатываемой поверхности и в пределах одного нахождения зерна в контактном пространстве.

Длиной отдельного среза — l будем называть длину каждого непрерывного участка линии среза.

Длина стружки при шлифовании и доводочном шлифовании равна произведению длины отдельного среза на коэффициент продольной усадки, который учитывает деформацию срезанного слоя.

Если на протяжении расчетной длины линии среза (L) режущее зерно не встречается со впадинами превышающими глубину резания, то имеет место равенство:

$$l = l_{cp} = L.$$

Справедливость такого равенства (отличающегося от распространенного в литературе [л. 1] представления, что

$l = \frac{L}{2}$) доказана нами при анализе исходных положений теории шлифования [л. 6].

В общем виде между величинами L , l_{cp} и l можно установить следующую связь:

$$l = \frac{l_{cp}}{n_n} \quad (1);$$

где n_n — число пересечений линии среза (l_{cp}) впадинами глубиной более t — глубины резания

$$l_{cp} = L \cdot K_o \cdot K_{п.к.}; \quad (2)$$

где $K_{п.к.}$ — коэффициент полноты контакта поверхности детали с рабочей поверхностью инструмента, зависящий от макрогеометрии как детали, так и инструмента — рис. 7.

K_o — коэффициент заполнения материалом в пределах срезаемой шероховатости детали.

K_o зависит исключительно от высоты и конфигурации микронеровностей обрабатываемой поверхности детали.

По мере срезания исходных микро- и макронеровностей $K_{п.к.}$ и K_o увеличиваются. Когда высота этих неровностей стабилизируется или если с самого начала исходные макро- и микронеровности примерно одинаковы с теми, которые образуются на поверхности сошлифования, то в этом случае соответственно $K_{п.к.}$ и K_o равны единице (рис. 7).

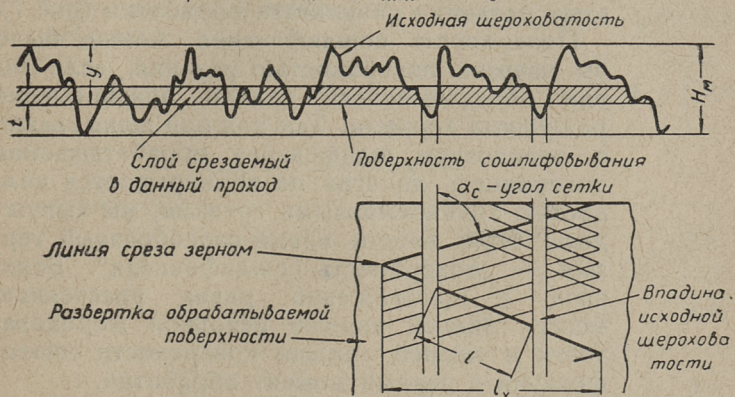
Особенно существенное значение имеет величина $K_{п.к.}$ и тем более K_o при доводочном шлифовании, когда весь припуск на обработку обычно не превышает высоту исходных макро- и микронеровностей, то есть вся обработка и состоит в срезании, сглаживании этих исходных неровностей обрабатываемой поверхности.

Очень часто припуск при доводочном шлифовании лежит в пределах высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности.

Приблизительно величина коэффициента заполнения ма-

териалом (K_0) в пределах срезаемой шероховатости может быть рассчитана по следующей формуле, справедливой пока не срезана вся исходная шероховатость:

i. Макронеровности незначительны по сравнению с глубиной резания. $H_M > t$; $K_{п.к.} = 1$; $K_0 < 1$.



ii. Макронеровности больше глубины резания, микронеровности сравнительно невелики. $K_{п.к.} < 1$; $K_0 = 1$.



iii. Значительные исходные макро- и микронеровности. $K_{п.к.} < 1$; $K_0 < 1$.

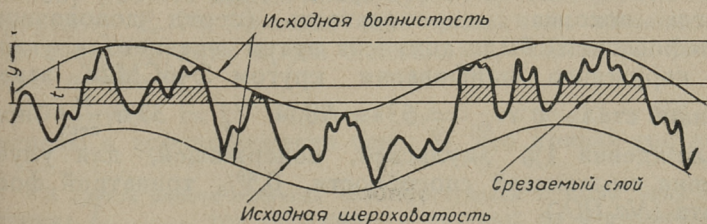


Рис. 7. Коэффициент полноты контакта, — $K_{п.к.}$ и коэффициент заполнения объема — K_0 ,

$$K_o = 1 - \left(1 - \frac{y}{H_M}\right)^N \quad (3)$$

при $y < H_M$,

где: y — уровень поверхности сошлифования, т. е. новой поверхности, образовавшейся в данный момент резания в результате обработки (рис. 7).

Поверхность сошлифования можно было бы назвать поверхностью резания, если бы она образовывалась только одновременно режущими зернами. Так как при шлифовании и доводочном шлифовании обрабатываемая поверхность никогда не перекрывается полностью одновременными срезами, мы вынуждены были ввести новый своеобразный термин — „поверхность сошлифования“. Величина y приближенно равна расстоянию между линией вершин исходной шероховатости и линией вершин поверхности сошлифования в данный момент обработки.

H_M — максимальная высота исходной шероховатости, определяемая относительно линии наиболее глубоких, регулярно повторяющихся впадин.

N — величина зависящая от характера конфигурации исходной шероховатости, которая в свою очередь зависит от вида обработки и режимов резания при образовании этой исходной шероховатости.

В табл. I даны, например, значения N для случая, когда исходная шероховатость (перед доводочным шлифованием) была получена путем врезного круглого наружного шлифования кругом Э46СМ2К закаленной стали с $H_{Rc} = 53 \div 58$, с $V_k = 33,6 \frac{м}{сек.}$ при охлаждении 1% эмульсией, содержащей, для улучшения смывающей способности, 0,5% тринатрий фосфата (Na_3PO_4).

Значения величины N в формуле (3).При скорости изделия $V_u = 19,6$ м/мин

Скорость врезания действительная (минутная подача) — V_y мм/мин	0,06	0,30	0,60	1,20
Чистота полученной поверхности H_{ck} МК	0,51	0,73	0,95	1,6
N	3,2	4,1	5,15	5,9

При $V_y = 0,06$ мм/мин

V_u м/мин	5,5	11,2	19,6
H_{ck} МК	0,38	0,43	0,51
N	2,63	2,9	3,2

При этом $H_M = 8,6H_{ck}^{1,25}$ МК

Рассмотрим теперь вопрос о расчете самой основной величины — L (ф-ла 2).

Расчетная длина линии среза (L) зависит исключительно от кинематики резания при шлифовании тем или иным методом¹.

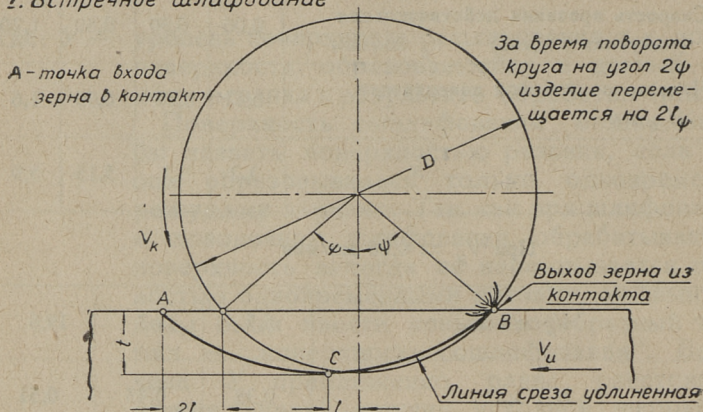
При различных методах шлифования и доводочного шлифования кругом (торцем и периферией) в основу расчета длины линии среза (L) можно положить формулу Е. Н. Маслова для длины так называемой „кривой контакта круга с деталью“, внеся необходимую поправку.

Формулы Е. Н. Маслова [л. 1 — стр. 54 — 68] выведены в предположении (рис. 8), что кривая контакта

¹ В другой работе величина соответствующая L была нами обозначена $l_{cp\text{ МАКС}}$, что, собственно, и вытекает из формулы (2) — при $K_o = 1$ и $K_{п.к.} = 1$ $L = l_{cp\text{ МАКС}}$.

начинается на дне царапины (точка C на рис. 8) и кончается по выходе зерна за пределы срезанного слоя (точка B на рис. 8).

1. Встречное шлифование



2. Попутное шлифование

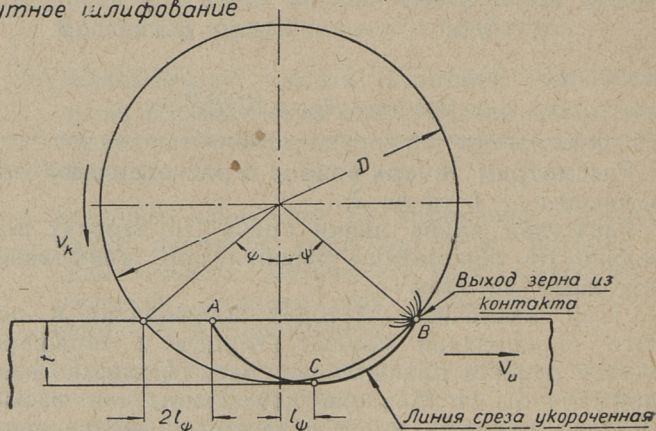


Рис. 8. Расчетная длина линии среза при встречном и попутном шлифовании.

Кривая CB в действительности представляет собою только половину расчетной длины линии среза AB (рис. 8), потому что зерна режут не строго вслед друг другу, а с поперечным смещением, покрывая рав-

номерно всю обрабатываемую поверхность [л. 6]. Поэтому для получения L результаты расчета по формулам Е. Н. Маслова необходимо удвоить, что мы и будем делать в дальнейшем.

При доводочном круглом шлифовании брусками и лентами необходимо различать шлифование продольное и врезное.

Главное отличие состоит в основном в соотношении между временем одного относительного оборота детали и инструмента ($\tau_{об}$) и временем одного продольного (вдоль оси детали) хода (τ_x).

Если $\tau_x < \tau_{об}$ имеет место врезное шлифование с дополнительным колебательным движением, для которого глубина резания t задается в мм/об.

Если $\tau_x > \tau_{об}$ имеет место продольное шлифование, для которого глубина резания t задается в мм/ход.

Такого рода разделение можно распространить на все виды шлифования, однако оно особенно необходимо для доводочного шлифования, при котором величины τ_x и $\tau_{об}$ бывают иногда весьма близки друг к другу (особенно при обработке отверстий).

Для продольного доводочного шлифования брусками или лентой можно написать:

$$L = \frac{l_x}{\sin \alpha_c}, \quad (4)$$

где: α_c — угол сетки линий срезов на обрабатываемой поверхности (рис. 7—1),

l_x — длина продольного хода (вдоль оси детали).

Причем

$$\sin \alpha_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_u}{V_x}\right)^2}}; \quad (5)$$

где: V_u — окружная относительная скорость изделия и инструмента в м/мин,

V_x — скорость продольной подачи в м/мин.

Для врезного доводочного шлифования брусками или лентой с дополнительным колебательным движением можно написать так:

$$L = \frac{\pi d}{\cos \alpha_c}; \quad (6)$$

где:

$$\cos \alpha_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_x}{V_u}\right)^2}}. \quad (7)$$

Дополнительное колебательное движение чаще всего характеризуется числом двойных ходов в минуту — n_x и длиной хода (размахом) — l_x мм.

Тогда имея в виду, что

$$V_x = \frac{2l_x \cdot n_x}{1000} = \frac{l_x \cdot n_x}{500} \text{ м/мин.} \quad (8)$$

$$\text{и } V_u = \frac{\pi d n_u}{1000} \text{ м/мин.,}$$

получим
$$L = \pi d \sqrt{1 + \left(\frac{l_x \cdot n_x}{500 V_u}\right)^2}; \quad (9)$$

или
$$L = \pi d \sqrt{1 + \left(\frac{2l_x \cdot n_x}{\pi d n_u}\right)^2} \quad (10)$$

Формулы (4), (6), (9) и (10) выведены для зерен не имеющих перебега, то есть не выходящих за пределы ширины изделия.

При перебеге срезы соответствующих зерен укорачиваются.

2. Средняя площадь поперечного сечения среза зерном — f .

Средняя площадь поперечного сечения равна отношению объема среза к его длине и может быть определена следующим образом:

$$f = \frac{O_{cp}}{l_{cp}} \quad (11)$$

где: O_{cp} — объем среза по длине линии среза (l_{cp})

$$O_{cp} = \frac{O_1}{n_{cp1}}; \quad (12)$$

где: O_1 — объем металла, срезанный за 1 проход инструмента по обрабатываемой поверхности.

n_{cp1} — число срезов (длиной l_{cp}) режущими зернами инструмента за время снятия объема срезов — O_1 .

В рассматриваемом выводе мы для простоты рассуждений называем срезы, находящиеся на длине l_{cp} , одним срезом (прерывистым), при этом мы несколько не грешим в точности самих выводов.

В свою очередь:

$$O_1 = t \cdot F_{из} \cdot K_o \cdot K_{п.к.}, \quad (13)$$

где: t — глубина резания (в мм/об или в мм/ход и т.д. в зависимости от метода обработки). Под глубиной резания мы, строго говоря, будем понимать расстояние между средними линиями шероховатости поверхности сошлифования до и после рассматриваемого прохода инструмента по обрабатываемой поверхности детали — рис. 9.

Если микрогеометрия поверхности сошлифования до и после прохода одинаковая, то величина t точно определяется изменением размера детали за проход. Например, в таком случае для круглого шлифования $2t$ определяется уменьшением d .

$F_{из}$ — площадь обрабатываемой поверхности изделия.

Например, при круглом цилиндрическом шлифовании

$$F_{изк} = \pi d B_{из}; \quad (14)$$

где: $B_{из}$ — ширина обрабатываемой поверхности (рис. 1, 2).

Величина n_{cp1} по формуле (12) определяется следующим выражением:

$$n_{cp1} = Z_u \cdot i_u \cdot i_k; \quad (15)$$

где: Z_u — число режущих зерен на рабочей поверхности инструмента,

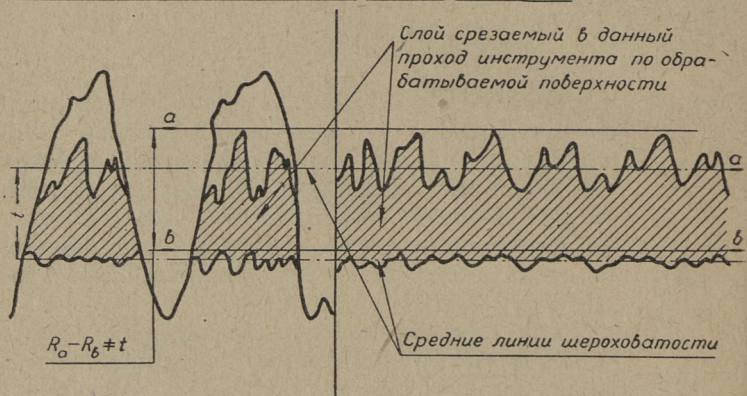
- i_u — число одновременно работающих инструментов, на которые дается общая величина t ;
- i_k — число входов в контактное пространство каждого режущего зерна за время рассматриваемого прохода.

Величина i_k различна в зависимости от метода шлифования или доводочного шлифования.

При доводочном шлифовании брусками или лентой —

$$i_k = 1.$$

И. Шероховатость до и после прохода различны.



II. Шероховатость до и после прохода одинакова.

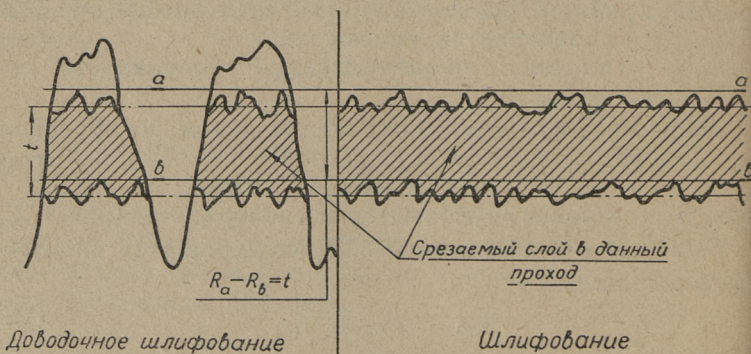


Рис. 9. Понятие о глубине резания — t .

При круглом врезном шлифовании кругом:

$$i_{\kappa} = \frac{n_{\kappa}}{n_{\text{и}}}; \quad (16)$$

так как пока изделие сделает оборот и будет снят объем O_1 (по ф-ле 13), каждое режущее зерно сделает вместе с кругом $\frac{n_{\kappa}}{n_{\text{и}}}$ оборотов.

При круглом продольном шлифовании:

$$i_{\kappa} = \frac{n_{\kappa}}{n_{\text{и}}} \cdot \frac{l_x}{s}; \quad (17)$$

так как пока будет сделан проход (l_x) и снят объем O_1 изделие сделает $\frac{l_x}{s}$ оборотов, а не один оборот, как это было при врезном шлифовании (ф-ла—16).

Подобным образом определяется величина i_{κ} и для других разновидностей шлифования.

Число режущих зерен на рабочей поверхности любого абразивного инструмента может быть определено следующим образом:

$$Z_{\text{и}} = \frac{F_{\text{ин}}}{S_{\text{р.з.}}}; \quad (18)$$

где: $F_{\text{ин}}$ — площадь рабочей поверхности инструмента,
 $S_{\text{р.з.}}$ — средний шаг режущих зерен.

Рабочей мы называем поверхность абразивного инструмента принимающую участие в резании.

Например, для абразивных брусков (простой формы):

$$F_{\text{ин}} = l_{\text{бр}} \cdot l_{\kappa} \quad (19)$$

Для шлифования периферией круга:

$$F_{\text{ин}} = B_{\text{кр}} \cdot \pi \cdot D \quad (20)$$

и т. д.

В формулах (19) и (20):

l_{κ} — длина дуги контакта (например, на рис. 4 — AB),

- $B_{кр}$ — рабочая ширина круга,
 $l_{бр}$ — рабочая длина бруска,
 D — диаметр круга.

Рабочая ширина круга ($B_{кр}$) или рабочая длина брусков ($l_{бр}$) и т. п. меньше соответствующих габаритных размеров инструмента на величину нерабочих участков (например — рис. 10).

Шаг режущих зерен ($S_{р.з.}$) отличается от шага зерен, расположенных на поверхности инструмента (S_3), вследствие разнорысотности зерен по отношению к обрабатываемой поверхности, вследствие того, что часть зерен инструмента вообще не достает до срезаемого слоя и не режет.

Можно написать:

$$S_{р.з.} = S_3 \cdot K_{S_3}, \quad (21)$$

где: K_{S_3} — коэффициент разнорысотности зерен.

Чем меньше глубина резания (t), тем меньшая часть зерен, находящихся на рабочей поверхности инструмента, достает до срезаемого слоя и тем больше величина коэффициента разнорысотности (K_{S_3}).

Таблица 2.

Характеристика абразивного инструмента	Круг Э46СМ2К		Брусок Э500КП $H_{RH} = 27 \div 32$		Брусок КЧ500КП $H_{RH} = 27 \div 32$	
	1	10	1	5	1	5
Глубина резания $t_{мк}$	1	10	1	5	1	5
Коэффициент разнорысотности K_{S_3}	4	1,5	2,8	1	3,6	1

Полагая средний шаг зерен на рабочей поверхности инструмента (S_3) одинаковым в любых двух взаимно перпендикулярных направлениях, как это имеется в виду в формуле (18), можно определить приближенно величину S_3 , зная характеристики зернистости и структуры связанного абразивного инструмента.

По преобразованной формуле П. Е. Дьяченко:

$$S_3^2 = 2 \frac{d_3^2}{K_3^{2/3}}, \quad (22)$$

где: d_3 — диаметр зерна (величина нормативно связанная с номером зернистости N_3 — например, см. ЭСМт7, стр. 466, табл. 3) — в мм.

K_3 — доля объема инструмента, занимаемая зернами, величина нормативно связанная с номером структуры связанного абразивного инструмента.

По преобразованной формуле Н. И. Волского [л. 8—стр. 11] в тех же обозначениях:

$$S_3^2 = 1,74 \frac{d_3^2}{K_3^{2/3}}$$

Отличие от формулы (22) небольшое. В дальнейшем мы будем пользоваться формулой (22), как более простой и достаточно точной.

Подставив значение S_3^2 по формуле (22) в формулу (21) и затем значение $S_{p.з.}^2$ в формулу (18), получим для связанного абразивного инструмента:

$$Z_u = \frac{F_{ин}}{2} \cdot \frac{K_3^{2/3}}{d_3^2 \cdot K_{S_3}^2} \quad (23)$$

Используя формулы (12), (13), (15) и (18), получим уравнение для среднего объема среза зерном, справедливое при всех методах шлифования и доводочного шлифования:

$$O_{cp} = \frac{t \cdot F_{уз} \cdot K_o \cdot K_{н.к.}}{F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k} \cdot S_{p.з.}^2 \quad \text{мм}^3 \quad (24)$$

В частности для шлифования и доводочного шлифования связанным абразивным инструментом, используя формулу (23), получим:

$$O_{cp} = \frac{2 \cdot t \cdot F_{уз} \cdot K_o \cdot K_{п.к.} \cdot d_3^2 \cdot K_{S_3}^2}{F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k \cdot K_3^{2/3}} \text{ мм}^3 \quad (25)$$

Используя формулы (24) и (25) на основе формулы (11), получим уравнение для средней площади поперечного сечения среза зерном:

$$f = \frac{O_{cp}}{l_{cp}} = \frac{t \cdot F_{уз} \cdot K_o \cdot K_{п.к.}}{l_{cp} \cdot F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k} S_{p.з.}^2,$$

подставляя значение l_{cp} по формуле (2), получим окончательно для всех видов шлифования и доводочного шлифования:

$$f = \frac{t \cdot F_{уз} \cdot S_{p.з.}^2}{L \cdot F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k} \text{ мм}^2 \quad (26)$$

Следует отметить, что f не зависит ни от коэффициента полноты контакта ($K_{п.к.}$), ни от коэффициента заполнения (K_o), что вполне естественно.

В частности для шлифования и доводочного шлифования связанным абразивным инструментом:

$$f = \frac{2 \cdot t \cdot F_{уз} \cdot d_3^2 \cdot K_{S_3}^2}{L \cdot F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k \cdot K_3^{2/3}} \text{ мм}^2, \quad (27)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи, в качестве примера и для сравнения.

Круглое врезное доводочное шлифование колеблющимися брусками.

Используя формулы (10), (14) и (19) для подстановки в формулу (26) и приняв во внимание, что $i_k = 1$, получим:

$$f = \frac{t \cdot S_{p.з.}^2 \cdot B_{уз}}{i_u \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2l_x n_x}{\pi d n_u}\right)^2} \cdot l_k \cdot l_{бр}} \quad (28)$$

Заменив в формуле (28) выражение в скобках через скорости V_x и V_u , можно написать тоже уравнение в

другой форме, более удобной для дальнейшего сравнения с продольным доводочным шлифованием.

$$f = \frac{t \cdot S_{p.з.}^2 \cdot B_{уз}}{l_{бр} \cdot l_{к} \cdot i_u \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_X}{V_u}\right)^2}} \quad (28a)$$

В формуле (28) и в вытекающих из нее выражениях глубина резания t берется в мм на один относительный оборот изделия и инструмента.

При полной приработке длина дуги контакта $l_{к}$ в формуле (28) с достаточной для практики точностью может быть принята равной ширине бруска.

В частном случае работы без перебега (рис. 4-1)

$$B_{уз} = l_{бр} + l_X \quad (29)$$

Подставляя выражение (29) в формулу (28), получим при работе без перебега ($l_n = 0$):

$$f = \frac{t \cdot S_{p.з.}^2}{i_u \cdot l_{к}} \cdot \frac{1 + \frac{l_X}{l_{бр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2l_X n_X}{\pi d n_u}\right)^2}} \quad (30)$$

Уравнения (28), (29) и (30) справедливы также для врезного доводочного шлифования лентой с колебательным движением (рис. 6) в этом случае под величиной i_u следует понимать число башмаков, прижимающих абразивную ленту к обрабатываемой поверхности, а под $l_{к}$ —ширину прижимающего башмака.

Круглое продольное доводочное шлифование брусками.

Используя формулы (4) и (5), получим:

$$L = l_X \sqrt{1 + \left(\frac{V_u}{V_X}\right)^2} \quad (4a)$$

Подставляя значение L по формуле (4a) в формулу (26) и используя выражения (14) и (19), получим:

$$f = \frac{t \cdot S_{p.z.}^2 \cdot \pi \cdot d \cdot B_{из}}{i_u \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_u}{V_X}\right)^2} \cdot l_k \cdot l_{бр.} \cdot l_X}, \quad (31)$$

где t — мм/ход.

Величины ширины изделия $B_{из}$, длины бруска $l_{бр}$ и длины продольного хода l_X связаны друг с другом следующим образом:

$$l_X = B_{из} + l_{n_2} + l_{n_1} - l_{бр}, \quad (32)$$

где l_{n_1} — перебег брусков за пределы $B_{из}$ в одну сторону (рис 5).

l_{n_2} — перебег в другую сторону.

Чаще всего $l_{n_1} = l_{n_2} = l_n$ тогда

$$l_X = B_{из} + 2l_n - l_{бр}. \quad (32a)$$

При продольном доводочном шлифовании регламентируются при назначении режимов резания $B_{из}$, l_n и $l_{бр}$, поэтому, исключая из формулы (31) величину l_X , заменим ее выражением (32) тогда:

$$f = \frac{t \cdot \pi \cdot d \cdot B_{из} \cdot S_{p.z.}^2}{i_u \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_u}{V_X}\right)^2} \cdot l_k \cdot l_{бр} (B_{из} - l_{бр} + l_{n_1} + l_{n_2})} \quad (33)$$

Рассматривая формулы (28a) и (31), следует отметить, что при врезном шлифовании колеблющимися брусками в подкоренном выражении находится $\frac{V_X}{V_u}$, а при продольном шлифовании брусками — $\frac{V_u}{V_X}$. Однако

³⁾ Влияние величины перебега (l_n) на процесс шлифования связано не только с величиной средней площади сечения срезов, но и с неравномерностью нагрузки на зерна концов брусков (в пределах l_n). Этот вопрос рассматривается особо в другой работе.

из этого различия в формулах вовсе не следует, что влияние V_u и V_X на площадь сечения среза при врезном шлифовании колеблющимися брусками противоположно влиянию V_u и V_X на площадь сечения среза при продольном шлифовании брусками.

Дело в том, что величины глубины резания (t) взяты в этих формулах в различном измерении: в формуле (28а) t в мм/об, в формуле (31) t в мм/ход. Для выяснения влияния V_u и V_X на f заменим в обеих формулах t через минутную подачу на врезание или через скорость врезания (V_y).

$$V_y = t \cdot n_u \text{ мм/мин}, \quad (34)$$

где t — мм/об.

$$V_y = 2t \cdot n_X \text{ мм/мин}, \quad (35)$$

где: t — мм/ход,

$2n_X$ — число продольных ходов в минуту.

Подставив выражение для t по формуле (34) в формулу (28а) получим для врезного шлифования колеблющимися брусками:

$$f = \frac{V_y \cdot \pi d B_{из} \cdot S_{p.з.}^2}{l_k \cdot l_{бр.} \cdot i_u \cdot \sqrt{V_u^2 + V_X^2}}. \quad (36)$$

Подставив выражение для t по формуле (35) в формулу (31), получим для продольного шлифования брусками то же самое уравнение (36).

Скорость резания при доводочном шлифовании определяется как геометрическая сумма скоростей V_u и V_X , то есть:

$$V = \sqrt{V_u^2 + V_X^2}. \quad (37)$$

Следовательно, при одной и той же скорости врезания ($V_y = \text{пост.}$) средняя площадь сечения среза f зависит от величины V_u и V_X в связи со скоростью резания (ф-лы 37 и 36), причем эта зависимость одина-

кова для продольного доводочного шлифования и для врезного доводочного шлифования колеблющимися брусками.

Практика показывает, что изменение величины V_u или V_x действительно качественно одинаково влияет и на процесс продольного доводочного шлифования и на процесс врезного шлифования колеблющимися брусками.

Нужно иметь в виду, что соотношение между V_u и V_x влияет не только в связи с величиной f , и при $V_y = \text{const.}$ величина $\frac{V_x}{V_u}$ не безразлична.

Круглое врезное шлифование периферией круга

Используем формулы (14), (16) и (20) для подстановки в формулу (26), тогда можно написать (при $i_u = 1$ и $B_{из} = B_{кр}$):

$$f = \frac{V_u \cdot S_{п.з.}^2 \cdot t}{60V_k \cdot L},$$

где:

$$V_k \text{ — м/сек, } V_u \text{ — м/мин.}$$

Расчетная длина линии среза L , как уже упоминалось, равна удвоенной длине „кривой контакта“ (рис. 8), определяемой формулами Е. Н. Маслова [Л. 1 — стр. 60, ф-ла 35 и др.].

В данном случае имеем для наружного шлифования:

$$L = 2 \left(1 \pm \frac{V_u}{60V_k} \right) \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t}{D + d}}.$$

Подставляя это выражение для L в формулу „ f “, получим:

$$f = \frac{V_u \cdot S_{п.з.}^2}{2(60V_k \pm V_u)} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D + d}{D \cdot d}}. \quad (38)$$

Круглое продольное шлифование: $i_u = 1$.

Используем формулы (14), (17) и (20) для подстановки в формулу (26) и получим:

$$f = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}^2 \cdot t}{60 V_{\kappa} \cdot L} \cdot \frac{B_{из}}{l_X} \cdot \frac{s}{B_{кр}};$$

где: V_u — м/мин, V_{κ} — м/сек,

l_X — длина продольного хода — мм.

Величину L для продольного круглого наружного шлифования определяем, используя соответствующую формулу Е. Н. Маслова [Л. 1—стр. 60, ф-ла 34]:

$$L = 2 \sqrt{\left(1 \pm \frac{V_u}{60 V_{\kappa}}\right)^2 + \left(\frac{V_X}{60 V_{\kappa}}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot t}{D + d}};$$

где: V_X — скорость продольной подачи — м/мин.

Подставляя получим окончательно:

$$f = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}^2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}}{2 \sqrt{(60 V_{\kappa} \pm V_u)^2 + V_X^2}} \cdot \frac{B_{из}}{l_X} \cdot \frac{s}{B_{кр}}. \quad (39)$$

Формула (38), определяющая площадь среднего сечения среза f при врезном шлифовании, является частным случаем формулы (39).

В самом деле при врезном шлифовании в формуле (39):

$$V_X = 0;$$

$$\frac{l_X}{s} = 1 \text{ по смыслу, который был вложен в}$$

это отношение во время вывода (см. вывод формул 16 и 17 для определения числа входов в контактное пространство — i_{κ});

$$B_{из} = B_{кр}.$$

Таким образом $\frac{B_{из}}{l_X} \cdot \frac{s}{B_{кр}} = 1$ при врезном шлифовании.

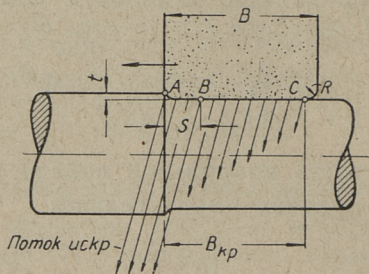
После подстановки полученных выражений в формулу (39) получаем формулу (38).

Обычно величина V_X^2 во много раз меньше $(60 V_{\kappa})^2$.

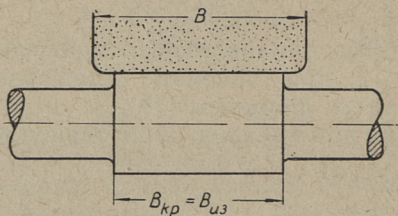
При $\left(\frac{V_X}{60 V_{\kappa}}\right)^2 = 0$ получим из формулы (39) новое выражение (40), определяющее f с вполне достаточной для практики точностью:

$$f = \frac{V_u \cdot s_{p.з.}^2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} \cdot B_{уз} \cdot s}{2 \cdot (60 V_k \pm V_u)} \cdot \frac{1}{l_x} \cdot \frac{1}{B_{кр}} \quad (40)$$

I. Продольное круглое шлифование



II Врезное круглое шлифование.



III Врезное круглое шлифование с колебательным движением.

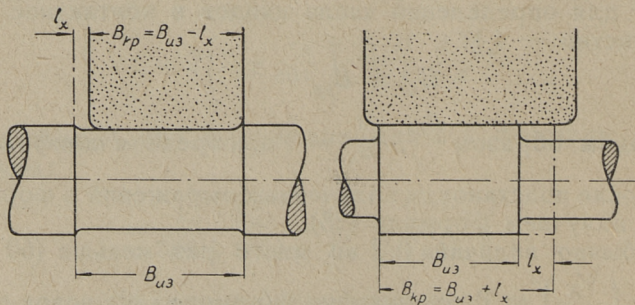


Рис. 10. Рабочая ширина круга — $B_{кр}$.

Формула (40) определяет среднее значение площади сечения срезов всех режущих зерен в пределах рабочей ширины круга $B_{кр}$ — (рис. 10-1). При продольном шлифовании иногда главную долю работы резания совершают зерна, находящиеся на части рабочей ширины круга в пределах величины продольной подачи (рис. 10-1 АВ).

О распределении работы резания по ширине круга можно судить как по характеру износа круга, так и по распределению искрового потока по ширине круга.

Когда можно допустить, что практически вся работа резания делается участком круга АВ на рис. 10—1, тогда в формуле (40): $B_{кр} = s$ и $\frac{S}{B_{кр}} = 1$.

Распределение работы резания по ширине круга зависит от режимов резания и рассматривается отдельно.

Аналогичным путем могут быть получены все возможные частные выражения единой формулы (26) применительно к каждому методу шлифования и доводочного шлифования.

3. Толщина и ширина среза (a и b).

Наибольшее распространение в научной и учебной литературе получили формулы для определения толщины среза зерном при шлифовании, выведенные по аналогии с круглым фрезерованием. В своем более или менее упрощенном виде эти формулы использовались для объяснения процесса шлифования десятки лет.

В наиболее полном виде такого рода формулы выведены Е. Н. Масловым [Л. 1-стр. 76—79].

Для круглого наружного врезного шлифования периферией круга по Е. Н. Маслову [Л. 1-стр. 76, 77] в наших обозначениях средняя толщина среза определяется так:

$$a = \frac{V_u \cdot s_{p.z.}}{60 V_{кр} \pm 2V_u} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} \quad (41)$$

Для продольного круглого наружного шлифования при $\left(\frac{V_X}{60 V_{кр}}\right)^2 = 0$ в наших обозначениях:

$$a = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} \cdot \frac{s}{B_{кр}} \quad (42)$$

Сравнение этих формул (41), (42) с соответствующими выражениями, выведенными здесь для определения средней площади сечения среза (ф-лы 38 и 40), показывает следующее:

$$\frac{V_u \cdot S_{p.з.}}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} = \frac{f}{S_{p.з.}} \cdot \frac{120 V_{\kappa} \pm 2 V_u}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u} \quad (38a)$$

так как $2 V_u$ значительно меньше $60 V_{\kappa}$, то отношение $\frac{120 V_{\kappa} \pm 2 V_u}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u}$ часто можно принять равным 2, тогда для врезного шлифования:

$$\frac{V_u \cdot S_{p.з.}}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} = \frac{2f}{S_{p.з.}} \quad (38b)$$

При продольном шлифовании при том же допущении относительно влияния V_u и полагая $l_x = B_{уз}$ получим из ф-л (42) и (40):

$$\frac{V_u \cdot S_{p.з.}}{60 V_{\kappa} \pm 2 V_u} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} \cdot \frac{S}{B_{кр}} = \frac{2f}{S_{p.з.}} \quad (40a)$$

Коэффициент „2“ появился в формулах (38b) и (40a) лишь в связи с различием в понимании расчетной длины среза (рис. 8).

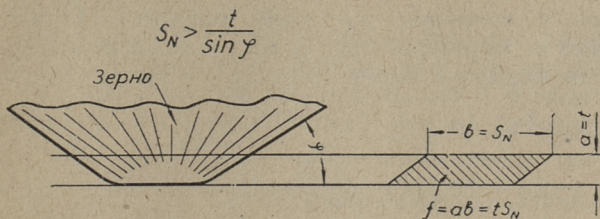
Доказано [л. 6], что величина $\frac{S_{p.з.}}{2}$, т. е. половина шага режущих зерен на поверхности инструмента никак не может быть равной ширине среза b при реальном процессе шлифования с обычной глубиной резания (см. также формулу 47 и рис. 11).

Поэтому распространенные формулы вида (41) и (42) никоим образом не определяют среднюю толщину среза (a), но определяют величину $\frac{2f}{S_{p.з.}}$, в чем и состоит физический смысл этих формул [л. 6].

Выведем формулы для определения средней толщины среза зерном (a), полагая, что срезы (или линии среза) расположены на обрабатываемой поверхности равно-

мерно со средним расстоянием между соседними срезами или иначе говоря со средним поперечным или нормальным шагом срезов (рис. 11) [л. 6—стр. 9—12] S_N .

Случай I (обратная стружка).



Случай II (прямая стружка).

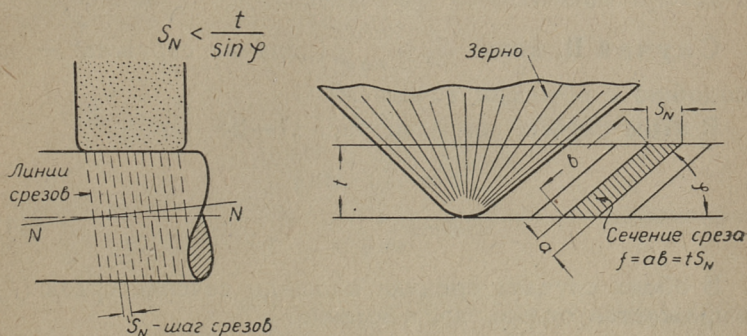


Рис. 11. Шаг срезов (S_N) и средние размеры поперечного сечения среза зерном.

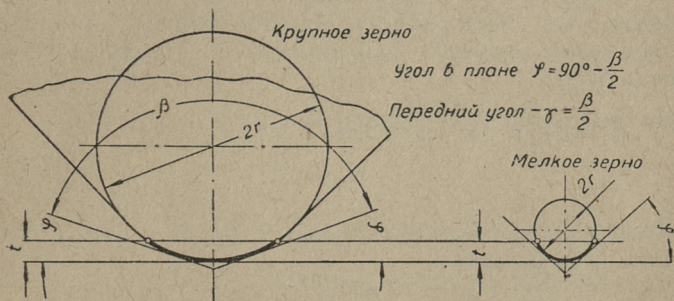


Рис. 12. Влияние размера зерна на угол в плане (φ) и остроту вершины (β) в пределах глубины резания (t).

При каждом виде шлифования и доводочного шлифования можно различать как минимум 2 случая (рис. 11).

Случай 1, когда $S_n > \frac{t}{\sin \varphi}$ („обратная стружка“ — по подобию с точением широким резцом). Причем угол в плане φ определяется углом β заострения режущей части вершины зерна (рис. 12), а именно:

$$\varphi = \frac{\beta}{2}$$

В этом случае, согласно фиг. 11—I:

$$\begin{aligned} a &= t \\ b &= S_N. \end{aligned} \quad (43)$$

Случай II, когда $S_N < \frac{t}{\sin \varphi}$ („прямая стружка“ — по подобию с обычным точением).

В этом случае, согласно рис. 11—II:

$$\begin{aligned} a &= S_N \cdot \sin \varphi \\ b &= \frac{t}{\sin \varphi}. \end{aligned} \quad (44)$$

В обоих случаях средняя площадь сечения среза (f) выражается одинаково, а именно:

$$f = t \cdot S_N = a \cdot b. \quad (45)$$

Воспользовавшись формулами (45) и (26), выведем единую для всех видов шлифования и доводочного шлифования формулу нормального, поперечного шага срезов (S_N).

Из формулы (45) имеем, что

$$S_N = \frac{f}{t}. \quad (46)$$

Подставляя выражение для f по формуле (26), получим окончательно:

$$S_N = \frac{F_{из} \cdot S_{p.з.}^2}{L \cdot F_{ин} \cdot i_u \cdot i_k} \text{ мм} \quad (47)$$

Для получения частных зависимостей S_N для отдельных методов обработки можно воспользоваться с целью подстановки в формулу (46) соответствующими частными выражениями f (формулы 27, 28, 30, 31, 33, 36, 38, 39, 40 и т. п.).

Полученные зависимости позволяют сделать многие дополнительные выводы при всех методах шлифования. Ряд таких выводов применительно к доводочному шлифованию брусками сделан в других работах.

Ввиду недостатка места остановимся здесь на примере лишь одного врезного круглого наружного шлифования.

Полученные при этом выводы могут быть распространены и на другие методы шлифования кругом с учетом всего вышеизложенного.

Врезное круглое наружное шлифование периферией круга

Используя формулу (38) для подстановки выражения f в формулу (46) получим:

$$S_N = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}^2}{2(60V_\kappa \pm V_u)} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{t \cdot D \cdot d}} \quad (48)$$

При шлифовании с прямыми стружками, когда $S_N < \frac{t}{\sin \varphi}$ (на рис. 11—случай II) имеем:

Толщина среза:

$$a = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}^2}{2(60V_\kappa \pm V_u)} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{t \cdot D \cdot d}} \sin \varphi \quad (49)$$

Ширина среза:

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

где при врезном шлифовании согласно формуле (34):

$$t = \frac{V_y}{n_u}.$$

При шлифовании с обратными стружками, когда $S_N > \frac{t}{\sin\varphi}$ (на рис. 11 — случай I) имеем:

$$a = t = \frac{V_y}{n_u};$$

$b = S_N$; где S_N — по формуле (48).

Оба случая имеют место при шлифовании одним и тем же методом и одним инструментом в зависимости от соотношения между S_N и $\frac{t}{\sin\varphi}$, т. е. в зависимости от сочетания элементов режима резания, влияющих на S_N и на t (формулы 34 и 48).

Например: $V_k = 30$ м/сек; $t = 10$ мк и $t = 1$ мк; $D = 650$ мм; $d = 50$ мм $V_u = 12$ м/мин;

Круг Э46СМ2К5; $K_s = 0,5$; $d_s = 0,26$ мм: $\varphi = 30^\circ$
 $K_{S_3} = 4$ при $t = 1$ мк. $K_{S_3} = 1,5$ при $t = 10$ мк (табл. 2).

По формулам (21) и (22): $S_{p.з.}^2 = S_3^2 \cdot K_{S_3}^2 =$
 $= 2 \cdot K_{S_3}^2 \frac{d_3^2}{K_3^{2/3}}$.

По формуле (48) получим:

$$S_N = \frac{V_u \cdot K_{S_3}^2 \cdot d_3^2}{(60V_k \pm V_u)K_3^{2/3}} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{t \cdot D \cdot d}} \quad (48a)$$

Подставляя значения величин в ф-лу (48a) получим при $t = 10$ мк: $S_N = 2,5$ мк; $\frac{t}{\sin\varphi} = 20 > 2,5 = S_N$ (случай II),

при $t = 1$ мк: $S_N = 53,5$ мк; $\frac{t}{\sin\varphi} = 2 < 53,5 = S_N$ (случай I)

Подсчеты показывают, что при черновой обработке чаще имеет место шлифование с прямыми стружками (случай II — рис. 11), при чистовой обработке чаще имеет место шлифование с обратными стружками (случай I — рис. 11).

Выводы:

1. Существуют единые закономерности для определения средней площади и размеров поперечного сечения среза зерном (формулы 26; 43; 44; 45; 47 и др.) для всех видов шлифования и доводочного шлифования.

2. Средняя площадь сечения среза зерном (f) качественно неизменно связана со всеми элементами режима резания и с характеристиками инструмента (формула 26).

3. Одни и те же элементы режима резания (V_u и др.) могут влиять на среднюю толщину среза зерном качественно различно, в зависимости от соотношения между нормальным шагом срезов на обрабатываемой поверхности (S_N) и глубиной резания (t), в зависимости от сочетания различных элементов режима резания (формулы 43; 44; 47).

В связи с этим можно различать при каждом методе шлифования или доводочного шлифования два случая: шлифование с прямой стружкой (ф-ла 44) и шлифование с обратной стружкой (ф-ла 43).

4. Полученные зависимости для площади и толщины среза зерном позволяют объяснить наблюдаемое в практике противоречие во влиянии одних и тех же факторов на процесс шлифования.

5. Одним из важных факторов, который необходимо учитывать при рассмотрении закономерностей шлифования, является разновысотность режущих зерен (ф-ла 21 и табл. 2).

6. Средняя площадь сечения и иногда толщина среза зависит от размаха продольных ходов и от перебега (формулы 33, 39 и др.).

III НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ

Основное время при всех видах шлифования и доводочного шлифования определяется минутной подачей на врезание или скоростью врезания (V_y).

Если глубина резания t в мм/об, то

$$V_y = t \cdot n_u \text{ мм/мин.} \quad (34)$$

Если t в мм/ход, то

$$V_y = 2t \cdot n_x \text{ мм/мин.} \quad (35)$$

и т. д.

Вопрос о влиянии режимов и факторов доводочного шлифования брусками на скорость врезания рассмотрен в других работах.

Здесь остановимся на влиянии различных факторов на скорость врезания при врезном круглом наружном шлифовании периферией круга. Получаемые при этом выводы могут быть распространены в известной мере и на другие методы шлифования кругом с учетом их особенностей.

Объем металла, срезаемый в течение одной минуты с изделия ($B_{кр} \cdot t \cdot V_u$), должен быть равен объему металла, срезаемому в то же время кругом ($V_k \cdot F$).

Обозначая через F — суммарную площадь сечения одновременных срезов, получим: $B_{кр} \cdot t \cdot V_u = 60 V_k \cdot F$;

$$F = \frac{V_u}{60 V_k} \cdot B_{кр} \cdot t \quad (51)$$

Выразим из формулы (34) глубину резания (t) и подставим полученное значение в формулу (51), тогда

$$F = \frac{\pi}{60} \cdot d \cdot B_{кр} \cdot \frac{V_y}{V_k}; \quad (52)$$

т. е. при $V_y = \text{const.}$, сечение одновременных срезов (F) не зависит от V_u .

Из формулы (52) получим:

$$V_y = \frac{60 V_k}{\pi \cdot d} \cdot \frac{F}{B_{кр}} \quad (53)$$

От величины F прежде всего зависит сила резания при шлифовании.

Тангенциальная составляющая силы резания:

$$P_z = p \cdot F \text{ [кг]},$$

где p — удельная сила резания — кг/мм².

Радиальная составляющая силы резания:

$$P_y = \lambda \cdot P_z = \lambda \cdot p \cdot F;$$

где: при шлифовании $\lambda = \frac{P_y}{P_z} = 1,3$.

Положим, что подобно всем видам резания металлов удельная сила резания (p) при шлифовании зависит от толщины среза и не зависит от ширины среза, т. е.

$$p = \frac{k}{a^\mu},$$

где: k — постоянная величина для данных условий шлифования,

μ — при обычных условиях шлифования встречается от 0,2 до 0,8 по разным данным.

В среднем $\mu = 0,5$ [л. 1].

Кроме того эффективная мощность резания шлифовальным кругом выражается так:

$$N_\kappa = \frac{P_z \cdot V_\kappa}{75} \text{ л. с.}$$

Эффективная мощность, расходуемая на вращение детали

$$N_u = \frac{P_z \cdot V_u}{60 \cdot 75} \text{ л. с.}$$

Как правило N_κ больше N_u в 30—300 раз, так что в основном при шлифовании энергия расходуется на вращение круга.

Из приведенных силовых зависимостей выразим F и потом подставим полученные выражения в формулу (53).

Через P_y можно выразить F следующим образом:

$$F = \frac{P_y}{\lambda \cdot \kappa} \cdot a^\mu.$$

Через N_κ можно выразить F так:

$$F = \frac{75 N_\kappa}{\kappa \cdot V_\kappa} \cdot a^\mu.$$

Тогда соответственно:

$$V_y = \frac{60 V_\kappa}{\lambda \cdot \pi \cdot d \cdot \kappa} \cdot a^\mu \cdot \frac{P_y}{B_{кр}} \quad (54)$$

$$V_y = \frac{4500}{\pi \cdot d \cdot \kappa} \cdot a^\mu \cdot \frac{N_\kappa}{B_{кр}} \quad (55)$$

Причем согласно формулам (49), (50) и (34) имеем следующие два выражения для толщины среза.

При шлифовании с прямой стружкой:

$$a = \frac{V_u \cdot S_{p.з.}^2 \cdot \sin \varphi}{2(60 V_\kappa \pm V_u)} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{t \cdot D \cdot d}} = \frac{8,9 \cdot V_u^{1,5} \cdot S_{p.з.}^2 \cdot \sin \varphi}{(60 V_\kappa \pm V_u) \cdot V_y^{0,5} \cdot d} \sqrt{\frac{D+d}{D}}$$

При шлифовании с обратной стружкой:

$$a = t = \frac{V_y}{n_u}$$

Подставим полученные выражения для толщины среза в формулы (54) и (55). После преобразований получим в конечном счете следующие зависимости скорости врезания (V_y) от различных факторов шлифования.

При шлифовании с прямой стружкой $\left(S_N < \frac{t}{\sin \varphi}\right)$:

$$V_y = C_{V_{yII}} \cdot \frac{V_\kappa^{\frac{2}{2+\mu}} \cdot V_u^{\frac{3\mu}{2+\mu}} \cdot S_{p.з.}^{\frac{4\mu}{2+\mu}}}{(60 V_\kappa \pm V_u)^{\frac{2\mu}{2+\mu}} \cdot d^{\frac{2\mu}{2+\mu}}} \cdot \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{\frac{\mu}{2+\mu}} \cdot \left(\frac{P_y}{B_{кр}}\right)^{\frac{2}{2+\mu}}, \quad (56)$$

где:

$$C_{V_{yII}} = \left(\frac{60}{\lambda \cdot \pi \cdot \kappa}\right)^{\frac{2}{2+\mu}} \cdot 8,9 \cdot \sin^{\frac{2}{2+\mu}} \varphi. \quad (57)$$

При шлифовании с обратной стружкой $\left(S_N > \frac{t}{\sin \varphi}\right)$:

$$V_y = C_{V_{yI}} \cdot \frac{V_\kappa^{\frac{1}{1-\mu}}}{d \cdot V_u^{\frac{1}{1-\mu}}} \cdot \left(\frac{P_y}{B_{кр}}\right)^{\frac{1}{1-\mu}}, \quad (58)$$

где:

$$C_{V_{y1}} = \left(\frac{1}{1000}\right)^{\frac{\mu}{1-\mu}} \cdot \pi^{\frac{\mu-1}{1-\mu}} \left(\frac{60}{\lambda \cdot \kappa}\right)^{\frac{1}{1-\mu}} \quad (59)$$

Или, выражая V_y через N_κ , получим:

При шлифовании с прямой стружкой

$$\left(S_N < \frac{t}{\sin \varphi}\right).$$

$$V_y = C_{V_{yII}}^1 \cdot \frac{V_u^{2+\mu} \cdot S_{p.з.}^{2+\mu}}{(60V_\kappa \pm V_u)^{2+\mu} \cdot d^{2+\mu}} \cdot \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{\frac{\mu}{2+\mu}} \cdot \left(\frac{N_\kappa}{B_{кр}}\right)^{\frac{2}{2+\mu}} \quad (60)$$

где:

$$C_{V_{yII}}^1 = \left(\frac{4500}{\pi \cdot \kappa}\right)^{\frac{2}{2+\mu}} \cdot 8,9^{\frac{2\mu}{2+\mu}} \cdot \sin^{\frac{2\mu}{2+\mu}} \varphi. \quad (61)$$

При шлифовании с обратной стружкой

$$\left(S_N > \frac{t}{\sin \varphi}\right):$$

$$V_y = C_{V_{yI}}^1 \cdot \frac{1}{d \cdot V_u^{\frac{\mu}{1-\mu}}} \cdot \left(\frac{N_\kappa}{B_{кр}}\right)^{\frac{1}{1-\mu}}, \quad (62)$$

где:

$$C_{V_{yI}}^1 = \left(\frac{4500}{\kappa}\right)^{\frac{1}{1-\mu}} \cdot \left(\frac{1}{1000}\right)^{\frac{\mu}{1-\mu}} \cdot \pi^{\frac{\mu-1}{1-\mu}}. \quad (63)$$

Для большей наглядности рассуждений положим

$$\mu = 0,5.$$

В этом случае получим частные выражения формул (56 ÷ 63).

Зависимость V_y от P_y .

Прямая стружка $\left(S_N < \frac{t}{\sin \varphi}\right):$

$$V_y = C_{V_{yII}} \cdot \frac{V_\kappa^{0,8} \cdot V_u^{0,6} \cdot S_{p.з.}^{0,8}}{(60V_\kappa \pm V_u)^{0,4} \cdot d^{1,2}} \cdot \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{P_y}{B_{кр}}\right)^{0,8} \quad (56a)$$

Обратная стружка $\left(S_N > \frac{t}{\sin \varphi}\right)$:

$$V_y = C_{V_{yI}} \cdot \frac{V_\kappa^2}{d \cdot V_u} \cdot \left(\frac{P_y}{B_{\kappa p}}\right)^2 \quad (58a)$$

Зависимость V_y от N_κ .

Прямая стружка:

$$V_y = C_{V_{yII}}^1 \cdot \frac{V_u^{0,6} \cdot S_{p.з.}^{0,8}}{(60 V_\kappa \pm V_u)^{0,4} \cdot d^{1,2}} \cdot \left(1 + \frac{d}{D}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{N_\kappa}{B_{\kappa p}}\right)^{0,8} \quad (60a)$$

Обратная стружка:

$$V_y = C_{V_{yI}}^1 \cdot \frac{t}{d \cdot V_u} \cdot \left(\frac{N_\kappa}{B_{\kappa p}}\right)^2 \quad (62a)$$

В процессе реального шлифования все срезы имеют разнообразные случайные размеры. Часть срезов подобна прямой стружке, часть — обратной.

При $S_N < \frac{t}{\sin \varphi}$ преобладают прямые стружки, т. е. большинство зерен режет своими боковыми гранями. Однако часть стружек снимается самыми вершинами зерен и имеет характер обратной стружки. Поэтому нельзя ожидать на практике влияния различных факторов на V_y именно в такой степени, как это указано в формулах (56), (60) и т. п.

Так же и при $S_N > \frac{t}{\sin \varphi}$ не все стружки имеют обратный характер: зерна не всегда режут самыми вершинами, они отчасти режут и боковыми гранями.

Следовательно, влияние того или иного фактора на скорость врезания (и в связи с ней на производительность резания) определяется степенью промежуточной между показателями степени при соответствующем факторе в рассмотренных двух крайних случаях. Эта действительная степень влияния рассматриваемого фактора ближе к тому или иному пределу (в ф-лах 56 и 58, 60 и 62) в зависимости от соотношения между шагом срезов (S_N) и глубиной резания (t).

Рассматривая полученные зависимости для V_y с такой точки зрения, легко убедиться, что предлагаемые теоретические выводы согласуются с практикой во всем ее многообразии и дают возможность сделать некоторые новые выводы, важные для производства.

Влияние окружной скорости круга — V_k .

При постоянной нагрузке на единицу рабочей ширины круга ($\frac{P_y}{B_{кр}} = \text{const.}$) с увеличением скорости круга (B_k) производительность обработки возрастает. Этот общеизвестный факт вытекает из формул (56) и (58). Если $\mu = 0,5$, то показатель степени при V_k может быть в пределах от 0,4 до 2, в зависимости от соотношения между глубиной резания и шагом срезов.

С увеличением V_k при прочих равных условиях, возрастает мощность резания (N_k).

Когда мощность главного привода будет использоваться полностью (т. е. при $\frac{N_k}{B_{кр}} = \text{const.}$), дальнейшее увеличение скорости круга (как это видно из формул 60 и 62) оказывается не только бесполезным, но иногда и вредным, вызывая снижение V_y и соответственно уменьшение производительности обработки.

Так при $\mu = 0,5$ согласно формулам (60-а) и (62-а) показатель степени при V_k колеблется от отрицательного значения — 0,4 до нуля, в зависимости от соотношения между глубиной резания и шагом срезов.

Следовательно, решая вопросы скоростного шлифования в условиях полного использования мощности главного привода, необходимо, увеличивая скорость резания (V_k), при прочих равных условиях, увеличивать соответственно (согласно формулам 60 — 62) мощность привода круга, в противном случае увеличение скорости резания может привести к уменьшению производительности обработки.

Влияние окружной скорости изделия (V_u)

Из полученных зависимостей (формулы 56; 58; 60; 62) следует, что V_u оказывает качественно переменное влияние на производительность резания, при прочих равных условиях.

Например, при $\mu = 0,5$ показатель степени при V_u колеблется от отрицательных значений -1 до положительных значений $+0,6$, в зависимости от соотношения между глубиной резания и шагом срезов.

Как уже упоминалось действительное колебание в степени влияния V_u находится в более узких пределах, так как в чистом виде шлифование только с прямыми или только с обратными стружками не встречается.

Качественно переменное влияние V_u на съём металла и при $V_y = \text{пост.}$ на результаты шлифования наблюдалось рядом исследователей — [л. 2 — стр. 58 — 65], [л. 3 — стр. 71 и др.]. Но многие исследователи не видели в этом закономерности, полагали такое качественно-переменное влияние V_u случайным, связанным или с вибрациями системы или с другими, неучитываемыми во время исследования, факторами.

Рассмотренные здесь зависимости позволяют закономерно объяснить качественно-переменное влияние скорости изделия (V_u) на съём металла (V_y) и при $V_y = \text{пост.}$ — на чистоту обработанной поверхности, износ круга и другие показатели процесса шлифования.

Влияние ширины круга.

Если ширина обрабатываемой поверхности ($B_{из}$) больше рабочей ширины круга ($B_{кр}$), то иногда целесообразно переходить с такого шлифования с продольной подачей, или ступенчатого врезного шлифования одним кругом, на врезное шлифование одним более широким кругом или несколькими одновременно работающими кругами (в зависимости от конструкции и размеров детали и других условий).

С точки зрения производительности съёма металла такое увеличение рабочей ширины круга (или одновременно работающих кругов) целесообразно, например, при сохранении скорости врезания (V_y) постоянной.

Условие $V_y = \text{пост.}$ может быть выдержано, согласно формулам (60) и (62), если пропорционально увеличению $B_{кр}$ будет увеличиваться мощность расходуемая на резание.

Если мощность главного привода уже полностью используется ($N_k = \text{пост.}$), то дальнейшее увеличение $B_{кр}$ может привести не к повышению, а к снижению производительности (ф-ла 62). Например, при $\mu = 0,5$ показатель степени при $B_{кр}$ лежит в пределах от — 0,8 до — 2.

Следовательно, решая вопросы повышения производительности шлифования за счет увеличения рабочей ширины круга (или кругов) в условиях полного использования мощности главного привода, необходимо пропорционально увеличению $B_{кр}$ увеличивать и мощность привода круга, в противном случае увеличение общей рабочей ширины одновременно режущих кругов может привести к снижению производительности.

Влияние зернистости круга.

В пределах данной работы мы не можем рассмотреть весь комплекс вопросов, связанных с влиянием на производительность характеристик круга: зернистости, структуры и др.

Однако во избежание неправильного понимания выведенных зависимостей (56, 58 и 60, 62) здесь необходимо изложить некоторые соображения.

Из полученных формул видно, что увеличение шага ($S_{р.з.}$) режущих зерен (т. е. уменьшения числа зерен на единице поверхности круга) или не влияет на скорость врезания, или оказывает положительное влияние.

Например, при $\mu = 0,5$ согласно формулам (60-а) (62-а) показатель степени при $S_{р.з.}$ колеблется от нуля до + 0,8.

Положительное влияние увеличения $S_{р.з.}$ связано здесь с увеличением толщины отдельных срезов и в

связи с этим уменьшением удельной силы резания ($p = \frac{\kappa}{a^{1,2}}$) и удельного расхода энергии на шлифование.

Однако одновременно с увеличением $S_{p.z.}$, толщины отдельного среза и площади его сечения (f — по формуле 38) увеличивается нагрузка на зерно (P_{zz}):

$$P_{zz} = p \cdot f,$$

где

f — по формуле (38).

Вместе с увеличением нагрузки на зерно ускоряется его объемный износ, кроме того более крупные зерна с самого начала имеют сравнительно более тупые вершины (рис. 12).

По этим двум причинам при увеличении $S_{p.z.}$ увеличивается угол заострения зерен и уменьшается φ , что приводит к соответствующему снижению скорости врезания (ф-лы 56 и 57).

Поэтому в ряде случаев, с учетом необходимого периода стойкости круга, возможно и увеличение скорости врезания, увеличение производительности при переходе на более мелкозернистый инструмент.

Такого рода явления наблюдаются на практике [л. 2 — стр. 67] и их необходимо учитывать для использования всех возможностей повышения производительности труда.

Вопросы производительности труда при шлифовании тесно связаны с зависимостью стойкости абразивного инструмента (T) от режима резания.

Здесь мы остановимся лишь на немногих, но важных вопросах этой обширной проблемы с тем чтобы связать наши предложения в части расчета размеров срезов с последними исследованиями других лиц [Л. 5], [Л. 7].

Влияние поперечной подачи — глубины резания — t на стойкость шлифовального круга.

Исследования Е. Н. Маслова и Б. А. Игнатова [Л. 7] показали, что глубина резания различно влияет на стой-

кость при малых и больших значениях глубины резания t . Например, [Л. 7 — стр. 44 — 45, рис. 5 и 6]:
 при $t < 10$ мк. $T = C_1 \cdot t^{-0,25}$;
 а при $t > 10$ мк. $T = C_2 \cdot t^{-1,05}$;

Стойкость круга зависит от усилий резания зерном (P_{zz}):

$$P_{zz} = p \cdot f = \frac{k \cdot f}{a^u}$$

где: f — определяется формулой (38),

a — определяется формулой (49) или (43) в зависимости от соотношения между глубиной резания и шагом срезов (S_N)

Средняя площадь сечения среза зерном (f) неизменно увеличивается (ф-ла 38) с увеличением t .

Но при малых глубинах резания, когда преобладает снятие обратных стружек ($S_N > \frac{t}{\sin \varphi}$), с увеличением t увеличивается и толщина среза (по ф-ле 43), соответственно уменьшается удельная сила резания (p).

При этом сила резания зерном (P_{zz}) или увеличивается весьма замедленно или даже уменьшается в зависимости от величины „ u “.

Иначе обстоит дело при больших глубинах резания, когда преобладают прямые стружки ($S_N < \frac{t}{\sin \varphi}$).

В этом случае одновременно с увеличением f уменьшается (по ф-ле 49) толщина среза зерном, увеличивается удельная сила резания и ускоренно возрастает сила резания зерном.

Таким образом теоретические выводы вполне согласуются с практикой

Влияние окружной скорости изделия V_u на стойкость круга.

Рассмотрим влияние собственно V_u при $V_y = \text{const}$.
 Е. Н. Маслов и Б. А. Игнатов получили при $t = \text{const}$, такую зависимость:

$$T = \frac{C_3}{V_u^{1,0}}$$

В этом случае одновременно с увеличением V_u (при $t = \text{const}$.) увеличивается скорость врезания, т. е. увеличивается объем металла, срезаемый в минуту:

$$V_y = t \cdot n_u = \frac{1000V_u}{\pi \cdot d} \cdot t = C_4 \cdot V_u \cdot t.$$

Для того чтобы выделить собственно влияние V_u следует [Л. 2] выявить $T = f(V_u)$ при $V_y = \text{const}$. Используем данные тех же исследователей полученные в тех же условиях опытов, а именно:

при $t < 10$ мк. $T = C_1 \cdot t^{-0,25}$

и при $t > 10$ мк. $T = C_2 \cdot t^{-1,05}$.

Тогда:

$$T = \frac{C_5}{t^{0,25} \cdot V_u^{1,0}} \text{ при } t < 10 \text{ мк.}$$

и

$$T = \frac{C_6}{t^{1,05} \cdot V_u^{1,0}} \text{ при } t > 10 \text{ мк.}$$

Вместо t подставим его выражение: $t = \frac{V_y}{C_4 \cdot V_u}$, тогда окончательно получим:

при $t < 10$ мк. $T = \frac{C_7}{V_u^{0,75}};$

при $t > 10$ мк. $T = C_8 \cdot V_u^{0,05}.$

Таким образом при $V_y = \text{const}$. влияние V_u на стойкость шлифовального круга перемененно не только количественно, но в данном случае, и качественно (показатель степени при V_u колеблется в пределах от $+0,05$ до $-0,75$).

Такое переменное влияние, как уже упоминалось, также вытекает из рассмотренных здесь теоретических выводов.

Вопрос об обобщении зависимостей при шлифовании [Л. 5] должен основываться на зависимости, как толщины среза от режима резания (по ф-ле 43 — 44), так и ширины среза от режима резания.

Доказано [Л. 1], [Л. 6], что ширина среза зерном v связана с толщиной среза a и с режимами резания.

Поэтому зависимости, в которых величина v рассматривается как самостоятельная, не всегда правильно выражают влияние других факторов. Например, рас-

смотрим одну формулу такого вида [Л. 5— стр. 94, ф-ла 10]:

$$V_u = \frac{C_r \cdot D^{0,5} \cdot K_z^{0,5}}{T_{III}^{0,5} \cdot t \cdot \delta^{0,5}};$$

где: T_{III} — время стойкости зерна,

$$K_z = \frac{1}{S_{p.з.}}$$

Иначе можно написать:

$$T_{III} = \frac{C_T \cdot D}{V_u^2 \cdot t^2 \cdot \delta \cdot S_{p.з.}}$$

В этой формуле ширина среза δ не является независимой величиной. Ширина среза δ зависит или от t , или от V_u ; D и $S_{p.з.}$, в зависимости от соотношения между t и S_N (см. выше расчет „а“ и „б“).

Если расшифровать влияние всех этих факторов на ширину среза зерном, то формула подобная вышеуказанной неправильно отразит влияние режима резания на стойкость зерна.

Кроме того, нельзя не учитывать своеобразие влияния ширины среза зерном на стойкость инструмента при шлифовании. В отличие от резания металлическим инструментом температура резания при шлифовании сравнительно мало влияет на прочность зерна и его износ, сам износ зерна часто происходит неравномерно — путем периодического скалывания частиц по величине иногда больших чем частица срезанного металла. Следовательно вопрос о теплоотводе от режущих кромок и вопрос о влиянии удельной нагрузки по длине режущих кромок стоит при шлифовании иначе, чем при резании металлическим инструментом. Поэтому кажется нецелесообразным механическое использование зависимостей вида: $V_u = \frac{C_r}{T_m \cdot \delta^{x_y} \cdot a^{y_r}}$.

Заключение

1. Предлагаемые закономерности, единые для всех видов шлифования и доводочного шлифования, довольно хорошо согласуются с практикой и позволяют обосновать некоторые явления, которые

раньше считались случайными — не вытекающими из самой теории шлифования.

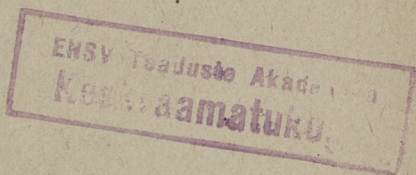
2. При выводе этих закономерностей были сделаны допущения менее грубые, чем при выводе других, в настоящее время широко распространенных зависимостей для толщины среза, площади среза зерном, усилий шлифования и т. д.
 3. Предлагаемые зависимости все еще содержат много неточностей.
 4. Ввиду всего вышеизложенного можно полагать целесообразным дальнейшее накопление практического исследовательского материала применительно к предлагаемым зависимостям с целью уточнения и совершенствования теории и практики шлифования.
-

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Н. Маслов — Основы теории шлифования металлов, Машгиз, 1951 г.
2. ЭНИИПП — Выпуск 3, Современные методы обработки деталей подшипников, Машгиз, 1950 г.
3. А. В. Никольский — Свойства поверхностной зоны закаленной стали после обычного и доводочного шлифования.
Статья в сборнике 1—Качество поверхности деталей машин, Издательство Академии наук СССР, 1951 г.
4. А. В. Никольский — Выбор состава жидкости для тонкого доводочного шлифования.
Статья в сборнике — Охлаждающе-смазывающие жидкости, Машгиз, 1954 г.
5. А. Каширин и
Ф. А. Барбашев — Обобщение экспериментальных зависимостей при обработке абразивным инструментом.
Статья в сборнике „ЭНИМС—„Динамика процесса резания металлов, Машгиз, 1953 г.
6. А. В. Никольский — Анализ исходных положений теории шлифования, Труды Таллинского политехнического института, Эстгосиздат, Таллин, 1954 г.
7. Е. Н. Маслов и
Б. А. Игнатов — Зависимость стойкости шлифовального круга от режима шлифования.
Статья в сборнике — Некоторые вопросы технологии машиностроения, Машгиз, 1954 г.
8. Н. И. Волский — Обрабатываемость металлов шлифованием, Машгиз, 1950 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Классификация методов шлифования и доводочного шлифования	3
II. Единые зависимости для расчета средних размеров отдельных срезов при шлифовании и доводочном шлифовании	5
1. Длина среза — l	5
2. Средняя площадь поперечного сечения среза зерном — f	16
3. Толщина и ширина среза (a и b)	29
III. Некоторые вопросы производительности шлифования	35
Заключение	47
Литература	49



А. В. НИКОЛЬСКИЙ

ЕДИНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА
СРЕДНИХ РАЗМЕРОВ ОТДЕЛЬНЫХ СРЕЗОВ
ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ДОВОДОЧНОМ
ШЛИФОВАНИИ

Эстонское Государственное Издательство,
Таллин, Пярну маантеэ 10.

*

Редактор В. Треуер
Технический редактор А. Сепп
Корректор Н. Круглова

Сдано в набор 19 II 1955. Подписано к печати
18 VI 1955. Бумага 54×84. 1/16. Печатных листов
3,25. По формату 60×92 печатных листов 2,67.
Учетно-издательских листов 1,97. Тираж 800.
МВ-10995. Заказ № 2330.

Типография «Коммунист», Таллин, Пикк 2.

Цена 1 руб. 40 коп.