

Er 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 55

1954

А. В. НИКОЛЬСКИЙ
КАНД. ТЕХН. НАУК

**АНАЛИЗ
ИСХОДНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ
ШЛИФОВАНИЯ**

P 18105

ENSV Teadus- ja Akadeemia
Keskraamatukogu



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1954

В современном машиностроении большое значение придается сокращению припусков на обработку металлов резанием за счет усовершенствования и более широкого применения методов литья,ковки и штамповки.

С уменьшением припусков сокращается доля черновой обработки резанием и увеличивается доля чистовой обработки.

В настоящее время основным методом чистовой обработки резанием является шлифование металлов.

Все возрастающее применение разных видов шлифования требует глубокого знания его закономерностей. Между тем современные теоретические представления о законах шлифования и доводочного шлифования не всегда согласуются с практикой и потому не всегда могут быть основой для усовершенствования методов шлифования на производстве.

В этой работе мы постараемся наметить некоторые исходные положения для дальнейшего развития теории шлифования.

Выбор исходных положений, как мы увидим ниже, является чрезвычайно важным в деле построения всей теории шлифования, от этого зависит степень соответствия теории практике, от этого зависит успех исследований в области шлифования.

* * *

*

Шлифованием называется процесс резания множеством абразивных зерен.

Ввиду относительно небольших размеров режущих зерен и сравнительно небольших срезаемых стружек при шлифовании может быть получена большая точность и высокое качество поверхности изделия.

Сочетание высокой производительности с хорошим качеством изделий и обуславливает широкое применение шлифования в промышленности. Так по данным профес-

сора доктора техн. наук Е. Н. Маслова [1] на современных автозаводах парк шлифовальных станков достигает 25% от общего станочного парка, а на заводах по производству шарикоподшипников доходит до 55%—60%.

Знание законов шлифования тем более важно, что от этой окончательной обработки зависит долговечность деталей машин.

Процесс шлифования сравнительно недавно приобрел большое практическое значение, в особенности, в связи с требованием взаимозаменяемости и повышенного качества поверхностей деталей машин. Поэтому вопросы теории резания для шлифования стали объектами научного исследования значительно позже, чем для других видов обработки металлов резанием.

На пути разработки теории шлифования стоят большие трудности, связанные с особенностями этого процесса, потому что при шлифовании отдельные реальные срезываемые металлы имеют разнообразную, неопределенную форму и размеры, потому что режущие абразивные зерна разнообразной формы и размеров расположены в объеме связанного инструмента беспорядочно, на разном расстоянии друг от друга и разновысотны по отношению к обрабатываемой поверхности.

Отдельные зерна врезаются в обрабатываемый металл на разную глубину, как вследствие разновысотности зерен, так и вследствие макро- и микронеровностей поверхности, причем высота микронеровностей иногда больше чем средняя глубина врезания. Действительное число зерен, которые встречаются с металлом изделия и режут его, значительно меньше, чем можно было бы ожидать, не приняв во внимание разновысотность зерен и неровности обрабатываемой поверхности.

Отдельные проблемы процесса шлифования разрабатываются у нас в СССР многими научно-исследовательскими институтами [ВНИИАШ, ВНИИ, ВИМС, ЭНИМС, ЦНИИТМАШ, ЭНИИПП], лабораториями почти всех крупных металлообрабатывающих заводов и в ряде высших учебных заведений. Результаты этой коллективной работы советских исследователей и достижения передовых рабочих-шлифовальщиков является хорошей основой для создания общей теории шлифования. Наиболее разработанной в настоящее время является теория шлифования проф. Е. Н. Маслова.

По вопросу о том, что в теории шлифования является главным, определяющим все его стороны, Е. Н. Маслов пишет [л. 1 — стр. 35], что следует согласиться с Г. М. Ипполитовым в следующем: «Зависимость удельного напряжения режущих зерен шлифовального круга от толщины стружки настолько велика, что в настоящее время принято, что толщина стружки имеет преобладающее влияние на процесс шлифования».

Далее Е. Н. Маслов пишет [л. 1 — стр. 35]: «Несомненно, что износ связки, а следовательно и стойкость круга в сильной степени зависят от толщины слоя, снимаемого одним абразивным зерном. Чем больше указанная толщина, тем глубже проникают абразивные зерна в обрабатываемый материал, тем больше оказывается нагрузка на зерна и тем интенсивнее износ зерен и связки. Влияние толщины снимаемого слоя на процесс шлифования исключительно велико, причем при изменении толщины слоя резко изменяются режим работы круга, сила резания, стойкость круга, чистота шлифованной поверхности и температура шлифования. Указанное важнейшее влияние толщины снимаемого слоя отражает все эмпирические правила рационального шлифования, и оно красной нитью проходит в нашем теоретическом исследовании процесса шлифования».

Нет оснований не согласиться с этим мнением, что основой всякой теории шлифования является расчет размеров частиц металла, срезаемого каждым зерном, и прежде всего — толщины сечения среза, поэтому основными исходными положениями теории шлифования являются те положения и допущения, на основе которых производится расчет толщины среза или, как иногда говорят: толщины стружки или толщины срезаемого слоя.

Основные исходные положения теоретических формул Е. Н. Маслова можно выразить и в другом виде, и мы постараемся это сделать так, чтобы наметить пути дальнейшего развития теории шлифования.

В основу анализа положим конечные формулы, не вдаваясь в исследования хода их выводов и в оценку рассуждений, которыми сопровождается эти выводы Е. Н. Маслов.

Уравнение для толщины среза одним зерном шлифовального круга [л. 1 — стр. 76, 79, ф-лы 77, 84], например, для наружного круглого шлифования имеет вид:

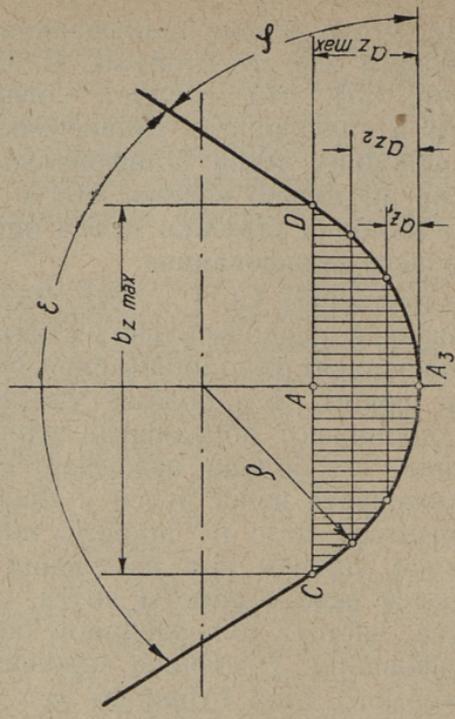
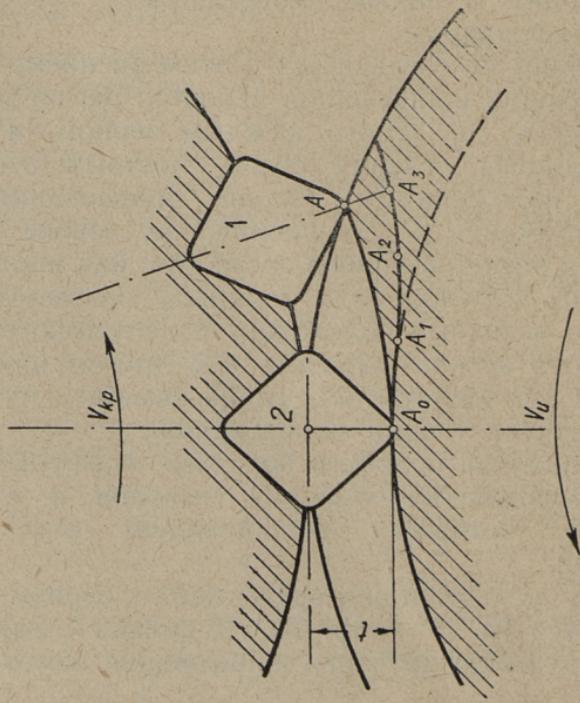


Рис. 1

$$a_{z_{max}} = 2a_{z_{cp}} = 2 \frac{V_u}{60 V_{kp} \pm 2 V_u} \cdot \sqrt{t_\phi} \cdot l_\phi \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d} \cdot \frac{S}{B}} \quad (1)$$

Здесь: $a_{z_{max}}$ — максимальная толщина среза.

На рис. 1 [л. 1 — стр. 24, фиг. 22] — $a_{z_{max}} = \overline{AA_3}$.

$a_{z_{cp}}$ — средняя толщина среза;

V_u — скорость изделия (окружная) в м/мин;

V_{kp} — скорость круга (окружная) в м/сек;

D — диаметр круга (шлифовального);

d — диаметр изделия;

t_ϕ — фактическая глубина резания при шлифовании с установившимся режимом;

t_ϕ не равна поперечной подаче t . Обычно $t_\phi > t$ [л. 1 — стр. 18];

l_ϕ — фактическое среднее расстояние между режущими зернами;

S — продольная подача;

B — ширина цилиндрической части круга, (без закругленных уголков) иначе говоря — ширина контакта [л. 1 — стр. 20 и стр. 143].

Это уравнение (1) используется, в частности, для расчета ширины и площади сечения среза, изображенного на рис. 1 и 2 [л. 1 — стр. 24, фиг. 23]. Допуская, что все срезы отдельных зерен шлифовального круга имеют форму изображенную на рис. 1 и 2, Е. Н. Маслов находит, в зависимости от угла между гранями зерна (E_m), от радиуса затупления вершины зерна (ρ — рис. 1 и 2) и от толщины среза (в общем случае $a_{z'}$ для точки m на рис. 2), что ширина среза определяется следующим уравнением [л. 1 — стр. 25, ф-ла 7]:

$$b_{z'} = b_z + 2b_1 = 2 \left[\sqrt{2\rho a_z - a_z^2} + (a_{z'} - a_z) \operatorname{tg} E_m \right], \quad (2)$$

а сечение среза [л. 1 — стр. 25, ф-лы 8 и 9] $f_m = f_1 + f_2$,
(3)

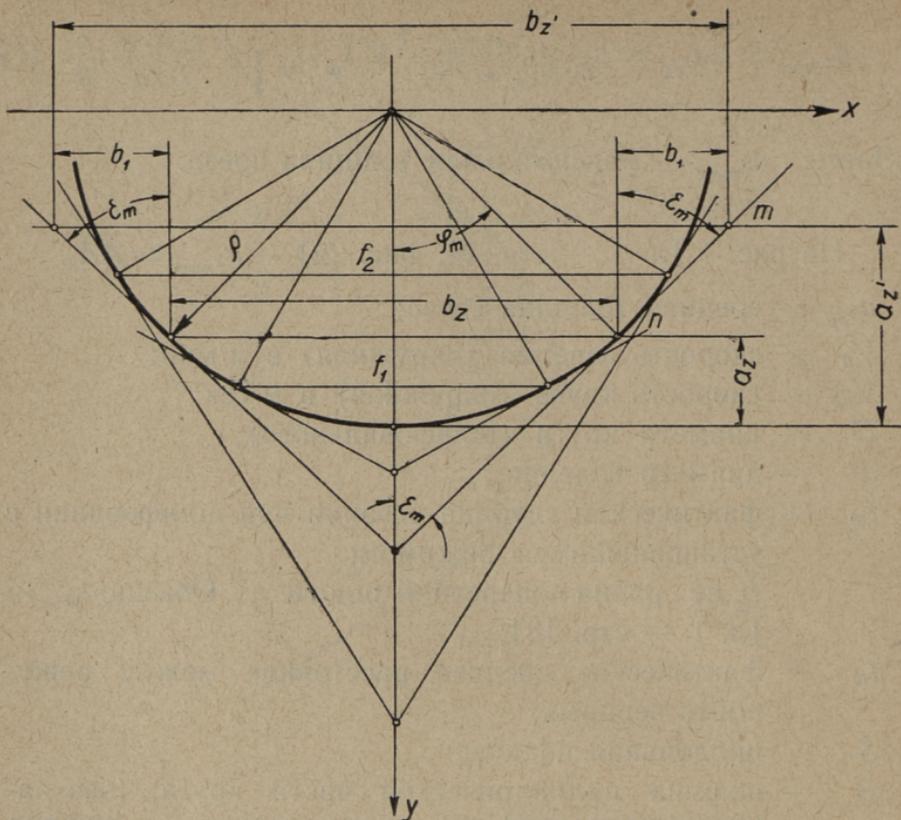


Рис. 2

где f_1 — площадь сегментообразного участка:

$$f_1 = \varrho^2 \left(\pi \frac{90 - E_m}{180} - \sin E_m \cdot \cos E_m \right); \quad (4)$$

f_2 — площадь трапециoidalного участка:

$$f_2 = [2\sqrt{2\varrho a_z} - a_z^2 + (a_{z'} - a_z) \operatorname{tg} E_m] (a_{z'} - a_z). \quad (5)$$

Размеры сечения и толщины среза могут, в частности, лежать в пределах лишь сегментообразного участка и тогда:

$$b_1 = 0 \text{ и } f_2 = 0.$$

Это имеет место при условии [л. 1 — стр. 26 ф-ла 10]:

$$a_z \leq 0,293 \varrho; \quad b_z \leq 1,414 \varrho; \quad (6)$$

причем выражение (6) справедливо для $E_m = 45^\circ$.

Зная сечение среза одним абразивным зерном шлифовального круга, определяется сила резания зерном [л. 1 — стр. 146, ф-ла 125]:

$$P_{z_z} = p \cdot f, \quad (7)$$

где в общем виде $f = f_m$ — по ф-лам (3), (4), (5), (6);

$$p = \frac{A}{a_z^k} \text{ кг/мм}^2 \text{ — удельная сила резания.}$$

Для определения суммарной силы шлифования P_z , развивающейся от действия всех режущих абразивных зерен в пределах зоны контакта, необходимо знать число одновременно действующих зерен (z).

На основании рис. 3 [л. 1 — стр. 143, фиг. 115 и ф-ла 117]:

$$Z = \frac{L}{l_\phi} \cdot \frac{B}{l_\phi} = \frac{L \cdot B}{l_\phi^2}, \quad (8)$$

где L — длина дуги контакта;

тогда [л. 1 — стр. 147, ф-ла 130]: $P_z = Z \cdot P_{z_z}$. (9)

Развернутые формулы для P_{z_z} и P_z получаются Е. Н. Масловым в результате подстановки выражений для f и z , указанных выше с некоторыми упрощениями [л. 1 — стр. 146—7, ф-лы 125 и 130].

Все приведенные выше формулы, составляющие основу теории шлифования Маслова, выведены в предположении, что в процессе шлифования каждое абразивное зерно шлифовального инструмента делает срезы, имеющие форму сечения, изображенную на фиг. 1. Причем при определенной геометрии режущей части зерен, для каждого любого положения зерна на дуге контакта площадь (f_m) и ширина ($b_{z'}$) сечения среза полностью определяются (ф-лы 2—3—4—5—6) толщиной среза (a_z), которая определенным образом зависит от режимов резания (ф-ла 1) и фактического расстояния между абразивными зернами (l_ϕ).

Очевидно, что все режущие зерна шлифовального круга будут делать срезы принятой Е. Н. Масловым формы (рис. 1) с толщиной, определяемой формулой (1) только при условии, что эти зерна врезаются строго вслед друг

другу без отклонений в стороны. Для этого режущие зерна должны быть расположены на поверхности круга стройными рядами в плоскостях вращения (подобно тому, как это изображено на рис. 3, заимствованном из работы Е. Н. Маслова, и на рис. 5-б).

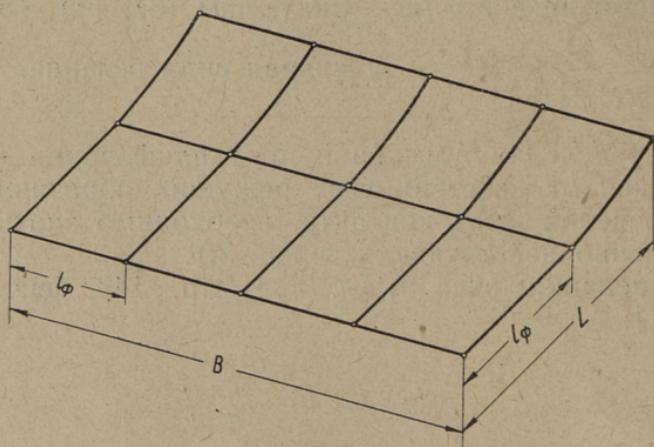


Рис. 3

Посмотрим, как изменяются форма и размеры сечений срезов, если эти срезы не следуют строго вслед друг за другом.

На рис. 4-а срезы частично накладываются друг на друга и следуют вслед друг за другом — форма и размеры сечений соответствуют формулам Маслова.

На рис. 4-б срезы, равномерно покрывая поверхность, лишь соприкасаются друг с другом. Форма и размеры таких «полных» срезов не имеют ничего общего с формой и размерами срезов Е. Н. Маслова.

Здесь $a_{z_{max}} = t_{\phi}$ — действительной глубине врезания.

Сотрудники лаборатории шлифования ЭНИИПП считают такие полные срезы характерными для равномерного шлифования [л. 3 — стр. 50].

Исходя из равенства суммарного объема всех срезов и действительно срезанного с изделия объема металла при равномерном распределении зерен на поверхности круга, выведена формула для врезного шлифования [л. 3 — стр. 54], которую мы даем в тех же обозначениях, что и

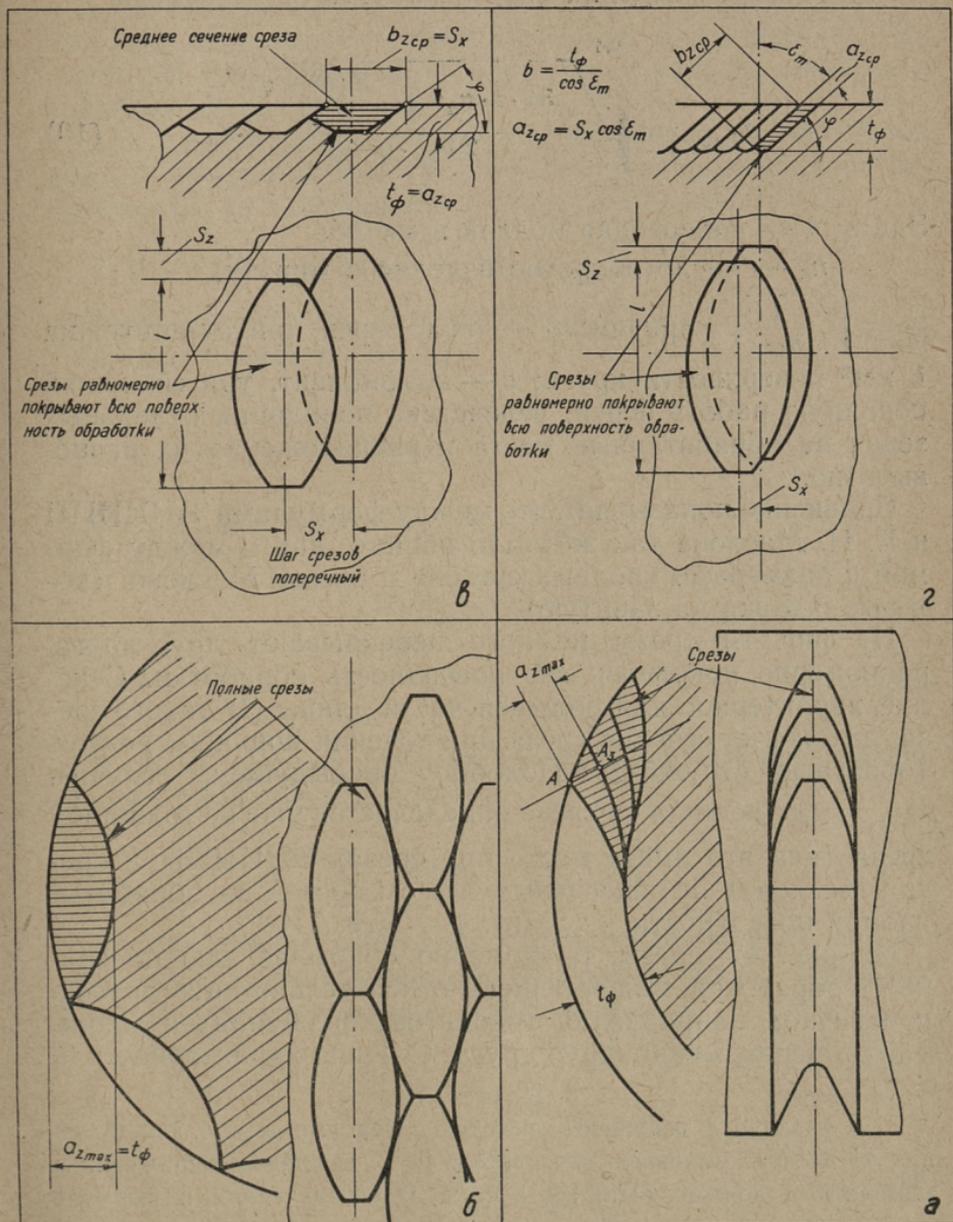


Рис. 4

формулу Маслова, заменив минутную поперечную подачу поперечной подачей (t) в мм/об, умноженной на число оборотов изделия (n_u) в минуту.

$$a_{z_{max}} = \sqrt[0,4]{\frac{3\pi \cdot t \cdot n_u \cdot \sqrt{\frac{d(D+d)}{D}}}{2 V_{kp} \cdot \text{tg } E_m}} \cdot l_{\phi}. \quad (10)$$

Здесь: t — поперечная подача в мм/об;

n_u — число оборотов изделия в минуту;

$l_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{n_1 \cdot c}}$; причем: n_1 — число зерен, приходящихся на

1 мм² поверхности круга; c — коэффициент, учитывающий неполную работу зерен, вследствие попадания отдельных зерен на обработанные места и расположения их разно-высоотно.

Сравнение показывает, что между формулами ЭНИИПП и Е. Н. Маслова так же мало общего, как и между формой и размерами «полных срезов» и срезов Маслова (которые похожи на занятую).

На фиг. 4-в срезы немного перекрывают друг друга, равномерно покрывая всю поверхность обработки. Сечение, характерное для большей части длины (l) такого среза, похоже на сечение среза при точении широким резцом (обратные стружки). Подобно предыдущему случаю $a_{z_{max}} = t_{\phi}$, но ширина среза определяется уже не толщиной среза (как это имеет место при срезах ЭНИИПП и срезах Маслова), а поперечным шагом срезов на обрабатываемой поверхности — S_x (л. 4 — стр. 71).¹

На рис. 4-г срезы, равномерно покрывая всю поверхность обработки, мало смещены относительно друг друга в поперечном направлении (вдоль оси вращения) и значительно перекрывают друг друга. Сечение характерное для

¹ В издании 4 допущены опечатки. Оба выражения для S_x на стр. 71 следует умножить в числителе на 2. В правом выражении в знаменателе должно быть V_{kp} а не k . В обозначениях к формуле должно быть:

V_u — скорость изделия — м/мин.

V_{kp} — скорость круга — м/мин.

большей части длины (l) такого среза, похоже на сечение среза при точении обычным резцом (прямые стружки).

В отличие от предыдущего случая, здесь глубина резания (t_ϕ) определяет не толщину среза, а его ширину. Поперечный шаг срезов (S_x) определяет уже не ширину, а толщину среза.

Для равномерного распределения срезов на обрабатываемой поверхности могут быть написаны следующие зависимости (в обозначениях формул Маслова):

С л у ч а й 1 (рис. 4-в). $S_x > \frac{t_\phi}{\sin \varphi}$,
 причем $\varphi = 90 - E_m$ (см. рис. 4-г и 1).
 В этом случае $a_{zcp} = t_\phi$, (11)

$$b_{zcp} = S_x.$$

С л у ч а й 2 (фиг. 4-г). $S_x < \frac{t_\phi}{\sin \varphi}$
 и $a_{zcp} = S \cdot \sin \varphi$
 $b_{zcp} = \frac{t_\phi}{\sin \varphi}$. (12)

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

$$f = t_\phi \cdot S_x = a_{zcp} \cdot b_{zcp}. \quad (13)$$

Распределение срезов на поверхности зависит от продольного (S_z) и поперечного (S_x) шагов срезов. Для круглого наружного врезного шлифования:

$$S_z = l_\phi \frac{V_u}{60 V_{kp}}, \quad (14)$$

$$S_x = \frac{l_\phi^2}{l_{cp}} \cdot \frac{V_u}{60 V_{kp}}, \quad (15)$$

где l_{cp} — длина линии среза зерном, в данном случае, равная длине среза (l — на рис. 4-в и 4-г).

С достаточной для практики точностью можно написать:

$$l = z \sqrt{t_{\phi} \cdot \frac{D \cdot d}{D + d}}, \quad (16)$$

подставляя выражение (16) в формулу (15) получим:

$$S_x = \frac{l_{\phi}^2}{l} \cdot \frac{V_u}{60 V_{kp}} = \frac{V_u \cdot l_{\phi}^2}{120 V_{kp} \cdot t_{\phi}^{0,5}} \cdot \sqrt{\frac{D + d}{D \cdot d}}. \quad (17)^2$$

В формулах (11), (12), (13), (16) и (17) величина t_{ϕ} представляет собой действительную подачу на врезание (с учетом деформаций системы, вследствие которых действительное врезание круга может быть меньше перемещения супорта).

Применительно к врезному шлифованию:

t_{ϕ} — действительная подача круга в мм/об. изделия.

Заметим, что предлагаемая система определения характерных размеров срезов при шлифовании отвечает условию равенства суммарного объема всех срезов (теоретических) объему металла действительно срезанному с изделия.

Докажем это:

Объем каждого среза зерном в среднем составит:

$$O_3 = l \cdot f = l \cdot t_{\phi} \cdot S_x, \quad (18)$$

подставив в ф-лу (18) выражение для S_x по формуле (15), получим:

$$O_3 = t_{\phi} \cdot l_{\phi}^2 \cdot \frac{V_u}{60 \cdot V_{kp}}. \quad (19)$$

Действительно срезанный объем металла за 1 оборот изделия составит:

$$O_1 = \pi \cdot d \cdot t_{\phi} \cdot B. \quad (20)$$

² В других работах мы принимаем обычно иные обозначения, а именно:

$$l_{\phi} = S_{p.3}; \quad a_{zcp} = a; \quad b_{zcp} = b;$$

вместо t_{ϕ} или t , или y_0 .

Число срезов, делаемое зернами круга за 1 оборот изделия, может быть выражено следующим образом:

$$M = \frac{V_{kp} \cdot B}{l_{\phi}^2 \cdot n_u} 60 \cdot 1000. \quad (21)$$

Нужно доказать, что: $M \cdot O_3 = O_1$.

Подставим в это равенство значения величин M ; O_3 и O_1 по формулам (19), (20) и (21):

$$60 \cdot 1000 \frac{V_{kp} \cdot B}{l_{\phi}^2 \cdot n_u} \cdot t_{\phi} \cdot l_{\phi}^2 \cdot \frac{V_u}{60V_{kp}} = \pi \cdot d \cdot t_{\phi} \cdot B.$$

Имея в виду, что $\frac{V_u}{n_u} = \frac{\pi \cdot d}{1000}$, после сокращения получим

тождество, что и требовалось доказать.

Подсчеты по формулам (11), (12) и (17) для распространенных режимов шлифования показали, что на практике встречаются оба случая шлифования и с прямыми и с обратными стружками.

При черновом и получистовом шлифовании чаще имеет место случай II (прямые стружки), при тонком и доводочном шлифовании — случай I (обратные стружки).

Переход из одного случая в другой, как видно из формулы (17), зависит от сочетания элементов режима шлифования

$$V_u, V_{kp}, t_{\phi}, l_{\phi} \text{ и других.}$$

В разных случаях толщина среза различно зависит от режимов шлифования (ф-лы 11—12—17). Это позволяет объяснить наблюдаемое на практике переменное количественно и иногда качественно влияние одного и того же фактора (например V_u при постоянной минутной подаче и др.). Дальнейший анализ процесса шлифования на основе предлагаемых исходных положений является предметом отдельной работы.

Рассмотрев зависимость расчета толщины среза от принятой схемы распределения срезов на обрабатываемой поверхности вернемся к теории Е. Н. Маслова с тем, чтобы на основе вышеизложенного выяснить физический смысл формулы (1) и исходных положений Е. Н. Маслова, а так же степень соответствия этой теории практике.

Можно считать, что все основные фор-

мулы теории Е. Н. Маслова исходят из предположения, что срезы располагаются на обрабатываемой поверхности строго вслед друг другу, причем образуется ряд канавок (рис 5, а), а шлифовальный круг условно подобен набору дисковых фрез, у которых зубья заменены абразивными зернами (рис. 5, б).

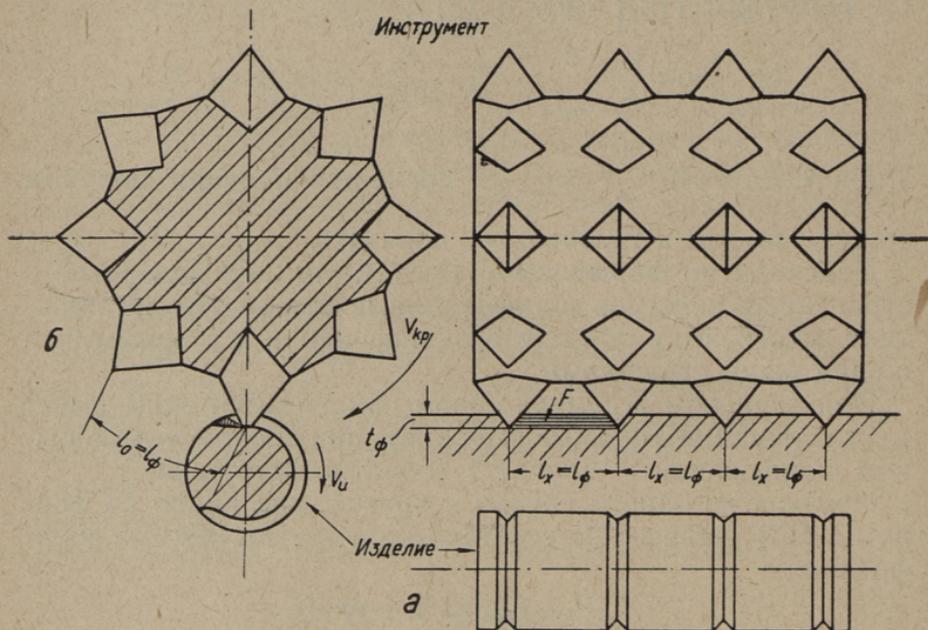


Рис. 5.

Для доказательства сказанного выведем, исходя из этого, основную формулу Маслова (1) и попутно покажем, что величина l_ϕ , фигурирующая в формуле (1), должна быть равна окружному шагу режущих зерен (l_0) условного шлифовального круга, отвечающего схеме, изображенной на рис. 5, б. На рис. 5, б условно изображены только режущие зерна и не показаны зерна, находящиеся на поверхности инструмента, но не достающие до срезаемого слоя и поэтому не режущие.

Рассмотрим простейший случай наружного круглого врезного шлифования поперечной подачей. В этом случае

$$B = S \text{ (л. 1 — стр. 76) и в ф-ле (1) } \frac{S}{B} = 1.$$

Кроме того упростим уравнение (1), имея в виду, что обычно

$$60V_{kp} \gg 2V_u.$$

Если например $V_u = 30 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$, а $V_{kp} = 30 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, то

$$\frac{60V_{kp}}{2V_u} = \frac{60 \cdot 30}{2 \cdot 30} = 30.$$

Следовательно обычно слагаемым $2V_u$ можно в ф-ле (1) пренебречь, допуская при этом небольшую неточность. Тогда формула Е. Н. Маслова, которую нам нужно вывести для врезного шлифования, примет вид:

$$a_{z_{max}} = \frac{V_u}{30V_{kp}} \cdot \sqrt{t_{\phi}} \cdot l_{\phi} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}. \quad (1-a)$$

Напомним, что в случае врезного шлифования формула Е. Н. Маслова (1-a) совпадает с общеизвестной формулой для толщины среза при шлифовании. Эту формулу и ее вывод можно найти в учебниках по резанию металлов. Особенность ф-лы Е. Н. Маслова во введение индексов «Ф» у величин

$$l \text{ и } t \text{ (} l_{\phi}; t_{\phi}\text{),}$$

что означает — фактическая глубина врезания (t_{ϕ}) и фактический шаг зерен круга (l_{ϕ}). Но никакой определенной связи между t и t_{ϕ} , l и l_{ϕ} , достаточной для расчета, Е. Н. Маслов не дает и в своих расчетных примерах полагает $t = t_{\phi}$; $l = l_{\phi}$ (л. 1 — стр. 144).

Воспользуемся, например, выводом проф. д. т. н. А. М. Даниеляна (л. 5 — стр. 395) применительно к схеме резания, изображенной на рис. 5, и с обозначениями Е. Н. Маслова.

При вращении шлифовального круга (устроенного условно так, как показано на рис. 5, б) какое-либо зерно, режущее строго вслед за другим зерном, (на рис. 6 зерно «2» вслед за «1») переместится на дуге контакта из точки

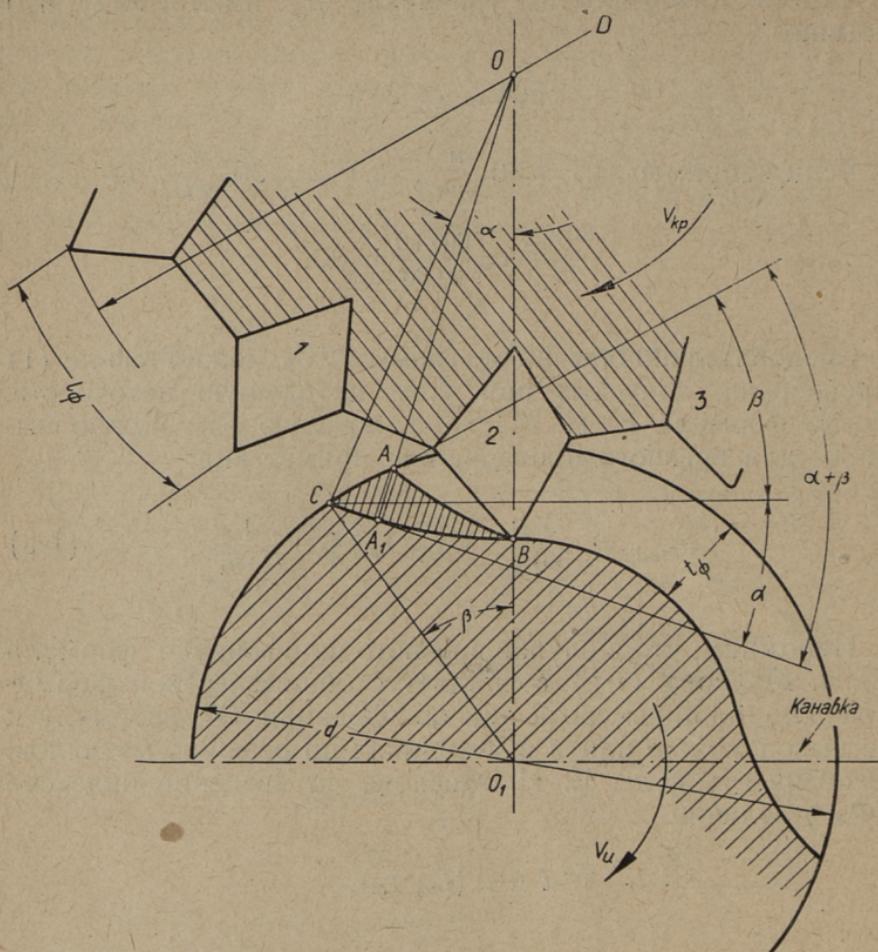


Рис. 6

В в точку С, за время T сек. Очевидно, что при этом длина пути этого зерна будет равна длине дуги контакта (длина среза) $\overset{\sim}{BC}$:

$$\overset{\sim}{BC} = V_{кр} \cdot T.$$

За это же время точка С детали переместится по дуге $\overset{\sim}{CA}$ навстречу кругу в точку А. Длина дуги $\overset{\sim}{AC}$ равна:

$$\overset{\sim}{AC} = \frac{V_u \cdot T}{60}.$$

Таким образом за время T сек. зерна круга, следующие вслед друг за другом, срезают площадь ABC (рис. 6). Наибольшая толщина срезания всеми зернами (Z_k), находящимися на длине дуги \overline{BC} , равна $\overline{AA_1}$, отсюда максимальная толщина среза одним зерном:

$$a_{z_{max}} = \frac{\overline{AA_1}}{Z_k}, \text{ где } Z_k = \frac{\overline{BC}}{l_\phi} \text{ и } a_{z_{max}} = \frac{\overline{AA_1}}{\overline{BC}} \cdot l_\phi. \quad (22)$$

Выражение (22) справедливо для значений Z_k больше единицы и меньше единицы.

Заменив (рис. 6) ввиду незначительности их величин дуги \overline{AC} и $\overline{A_1C}$ прямыми, касательными к ним в точке C , можем написать:

$$\sphericalangle ACA_1 = \alpha + \beta.$$

Поэтому приближенно можно написать, что:

$$\overline{AA_1} = \overline{AC} \cdot \sin(\alpha + \beta).$$

Подставив вместо \overline{AC} ее выражение, получим:

$$\overline{AA_1} = \frac{V_u \cdot T}{60} \sin(\alpha + \beta).$$

Подставив в формулу (22) значения $\overline{AA_1}$ и \overline{BC} , получим:

$$a_{z_{max}} = \frac{V_u}{60 V_{kp}} l_\phi \cdot \sin(\alpha + \beta).$$

В результате преобразования согласно данным фиг. 6 приближенно можно принять, что

$$\sin(\alpha + \beta) = 2 \sqrt{t_\phi} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}.$$

Детальный вывод этой формулы можно найти в учебниках по резанию металлов.

Окончательно получаем:

$$a_{z_{max}} = \frac{V_u}{30 V_{kp}} \cdot \sqrt{t_\phi} \cdot l_\phi \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}.$$

Эта формула полностью совпадает с формулой Е. Н. Маслова (1-а).

Таким образом доказано, что все основные формулы теории шлифования Е. Н. Маслова исходят из схемы на рис 5, причем (l_0) окружной шаг режущих зерен равен l_ϕ . Аналогичный вывод, но более сложным путем, получается и в том случае, если в формуле (1) не пренебречь величиной $2V_u$ в знаменателе. Расстояние между соседними рядами режущих зерен (l_x), расположенными в плоскостях вращения или иначе расстояние между вышлифовываемыми канавками при врезном шлифовании ($l_k = l_x$) также равно l_ϕ , как это следует из формулы (8) и рис. 3.

Никаких режущих зерен между соседними рядами следовательно не должно быть (иначе ф-ла 8 не будет справедлива), и объем металла между канавками (на фиг. 5-а) должен остаться не срезанным, если допустить, что толщина отдельного среза при врезном шлифовании определяется формулой Е. Н. Маслова (1-а).

В этом случае поверхность детали будет обрабатываться по всей ширине контакта только после того, как глубина врезания станет достаточно большой и канавки сомкнутся друг с другом (рис. 7). При шлифовании с продольной подачей (S), в отличие от всего вышеизложенного для врезного шлифования, шаг между канавками (l_k) должен быть соответственно меньше: $l_k = \frac{S}{B} l_\phi$, как это видно из сравнения формул (1) и (1-а).

Выясним, насколько количественно далеки от действительности исходные положения, которым отвечают основные формулы теории Е. Н. Маслова, на примерах расчета высоты шероховатости шлифованной поверхности, фактической глубины врезания и усилий врезного шлифования.

1. Высота шероховатости

Допустим, что вышлифовываемые условные канавки сомкнулись (фиг. 7), и глубина врезания (t_ϕ) равна расчетной высоте гребней шероховатости шлифованной поверхности (H). При этом мы условно не принимаем во внимание деформации и все другие искажающие факторы.

Так как $\rho \ll l_k = l_\phi$, то пренебрегая затуплением вершин зерен получим:

$$H = t_\phi = \frac{l_\phi}{2 \cdot \operatorname{tg} E_m}. \quad (23)$$

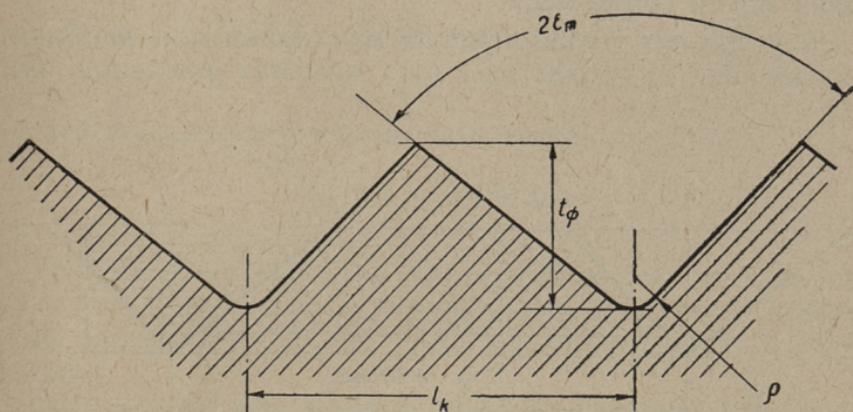


Рис. 7

Для наиболее часто встречающегося зерна, имеющего, как пишет Е. Н. Маслов [л. 1 — стр. 26], угол при вершине $2\varepsilon_m = 90^\circ$:

$$H = \frac{l_\phi}{2}.$$

Например, для круга Э46СМ1К5 — $l = 0,369$ мм — по данным Е. Н. Маслова (л. 1 — стр. 144). Полагая, что $l = l_\phi$, т. е. не учитывая разновысотность зерен, найдем, что высота шероховатости после шлифования при работе по схеме, изображенной на рис. 5, должна быть порядка $H = \frac{0,369}{2} 1000 \approx 180$ мк. На практике в средних условиях

шлифования даже максимальная высота неровностей получается от 3 до 10 мк, то есть примерно в 30 раз меньше, чем теоретическая.

Если учесть разновысотность зерен, находящихся на поверхности круга, то есть то, что часть зерен вообще не достает до срезаемого металла и $l_\phi > l$, то действительный разрыв между практикой и теорией еще больше.

2. Фактическая глубина врезания и возможность срезать весь припуск на шлифование при заданной чистоте поверхности изделия

Не всегда припуск на шлифование (Δ) достаточно велик, чтобы условные вышлифовываемые по схеме (5) канавки могли сомкнуться.

Допустим, что задан припуск на сторону для чистового шлифования $\Delta = 0,05$ мм. (это обычная величина при-

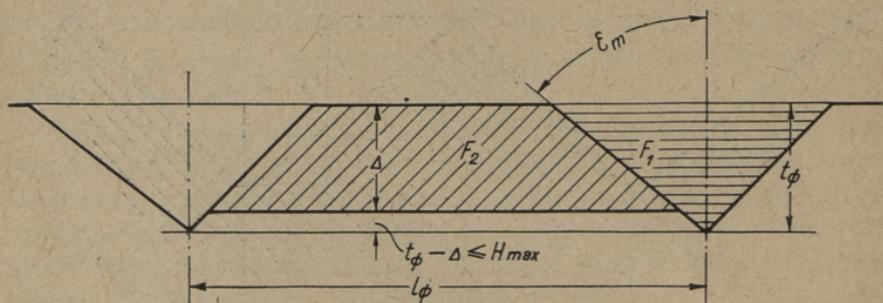


Рис. 8

пуска для небольших валиков диаметром до 18 мм и длиной до 100 мм., ранее начерно шлифованных). Чистота поверхности изделия, положим, должна быть $H_{max} = 5$ мк. Шлифовальный круг Э46СМ1К5 с $l = 0,369$ мм.

Очевидно, чтобы H_{max} не превышала 5 мк, нужно соблюсти условие (фиг. 8):

$$t_\phi \leq \Delta + H_{max} = 0,05 + 0,005 = 0,055 \text{ мм.}$$

Потому что, если канавки, оставшиеся после обработки, ($t_\phi - \Delta$) будут глубже, чем 5 мк, то заданная чистота поверхности не может быть достигнута (рис. 8). Но при этом поверхность вообще невозможно обработать, сечение F_1 , будет срезано, а значительно большая часть металла F_2 останется при схеме шлифования (5) не срезанной.

Например, если принять $l = l_\phi = 0,369$ мм, $\Delta = 0,05$ мм, $2\epsilon_m = 90^\circ$,

$$t_\phi = \Delta + H_{max} = 0,05 + 0,005 = 0,055 \text{ мм,}$$

то действительно срезанное при реальном шлифовании сечение

$$F_z + F_1 = l_{\phi} \cdot \Delta = 0,369 \cdot 0,05 \approx 0,02 \text{ мм}^2,$$

а сечение, срезанное по схеме (5), составит всего:

$$F_1 = t_{\phi}^2 = 0,055^2 \approx 0,003 \text{ мм}^2 \text{ и } \frac{F_z + F_1}{F_1} = \frac{0,02}{0,003} \approx 7.$$

Действительная разница еще больше, так как

$$l_{\phi} > l = 0,369 \text{ мм.}$$

То есть объем металла, срезанный в действительности, во много раз больше «теоретически» срезанного объема, если пользоваться ф-лой (1-а) для определения толщины среза.

Если рассчитать объем отдельного среза зерном по его толщине (ф-ла 1-а) и длине и умножить этот объем на число срезов во время одного оборота изделия (ф-ла 21), то при обычных значениях t и l (приняв в ф-ле 1-а: $t_{\phi} = t$ и $l_{\phi} = l$) получим, что этот «теоретически» срезанный объем в десятки раз меньше действительно срезанного объема (ф-ла 20).

3. Усилия шлифования и удельная сила резания при шлифовании

Порядок величин удельных сил (иначе условного напряжения) при шлифовании установлен экспериментально рядом исследователей.

В частности (л. 1 — стр. 95) при исследовании процесса царапания разных металлов алмазной иглой, имеющей геометрию характерную для абразивных зерен шлифовального круга, Е. Н. Маслов получил значение удельной силы (p) в пределах от 300 до $3800 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Величина удельной

силы изменялась в зависимости от толщины среза (глубина царапины), причем максимальные значения для разных металлов получились следующие:

Обрабатываемый материал	Удельная сила в кг/мм ²
сталь ШХ15 закаленная	3800
сталь 80 закаленная	3000
сталь 40 незакаленная	900
чугун	1200

При доводочном шлифовании (л. 4 — стр. 72—73) закаленной стали 40 величина удельной силы колеблется в пределах от 450 кг/мм² до 4900 кг/мм² в зависимости от состава охлаждающе-смазывающей жидкости. В случае применения жидкостей, обычных на производстве в настоящее время, величина удельной силы доводочного шлифования колеблется в более узких пределах от 450 кг/мм² до 1500 кг/мм² [л. 6 — стр. 98].

По формулам Гипромаша (л. 5 — стр. 405) удельная сила шлифования для стали с $\sigma_b = 50$ кг/мм² при $S = 20$ мм/об и $t = 0,009$ мм, составляет:

$$p = \frac{1500}{t^{0,47} \cdot S^{0,47}} = \frac{1500}{0,009^{0,47} \cdot 20^{0,47}} = 3050 \text{ кг/мм}^2.$$

Е. Н. Маслов определил расчетом величину удельной силы шлифования, которая нужна была бы для того, чтобы по его формулам получить действительную силу шлифования, наблюдаемую на практике [л. 1 — стр. 144]. Для расчета Е. Н. Маслов воспользовался своими формулами следующим образом: из ф-л (7) и (9) получаем:

$$p = \frac{P_{zz}}{f_m} = \frac{P_z}{Z \cdot f_m} \text{ кг/мм}^2, \quad (24)$$

где Z — определяется по ф-ле (8), f_m — по формулам (3), (4), (5), (6), P_z — берется по данным эксперимента.

Например, для незакаленной стали 40

$$P_z = C_p \cdot V_u^{0,7} \cdot S^{0,7} \cdot t^{0,6} \text{ кг.}$$

[л. 1 — стр. 142, ф-ла 115].

Е. Н. Маслов приводит [л. 1 — стр. 144] конкретный пример расчета удельной силы для круглого наружного

шлифования незакаленной стали 40 кругом Э46СМ1К5. $D = 500$ мм, $B = 32$ мм, $S = 20$ мм/об, $V_{кр} = 32$ м/сек, $V_u = 30$ м/мин, $t = t_{\phi} = 0,009$ мм, $l = l_{\phi} = 0,369$ мм, $d = 55$ мм. В этих средних условиях, характерных для шлифования с продольной подачей, получилось, что удельная сила шлифования должна бы быть:

$$p = 16.000 \text{ кг/мм}^2 \quad [\text{л. 1 — стр. 144}].$$

«Теоретическая» величина удельной силы получилась во много раз больше величин, наблюдаемых на практике шлифования, и в 8 раз — против царапания той же стали.

Следовательно, силы шлифования, определяемые по теории Е. Н. Маслова, получаются во много раз меньше действительных сил шлифования, определяемых экспериментально.

Выясним физический смысл формул Е. Н. Маслова для определения толщины среза зерном (ф-лы 1 и 1-а).

Это необходимо выяснить прежде всего потому, что не смотря на все количественные расхождения теории Е. Н. Маслова с практикой, рассматриваемые формулы позволяют сделать ряд качественно правильных выводов о влиянии на процесс шлифования части факторов ($V_{кр}$ и др.). Именно поэтому общеизвестная формула вида (1-а) фигурировала как единственная десятки лет в литературе по шлифованию и до работы Маслова.

Сравним формулу толщины среза Е. Н. Маслова для случая врезного шлифования с нашей формулой для площади сечения среза.

Согласно формулам (1) и (1-а) имеем по Е. Н. Маслову:

$$a_{zcp} = \frac{V_u \cdot l_{\phi}}{60 V_{кр}} t_{\phi}^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}. \quad (25)$$

Согласно формулам (13) и (17) имеем для среднего сечения среза:

$$f = t_{\phi} \cdot S_x = \frac{V_u \cdot l_{\phi}^2}{120 V_{кр}} \cdot t_{\phi}^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}}. \quad (26)$$

Из уравнения (26) можно написать:

$$\frac{V_u \cdot l_{\phi}}{60 V_{кр}} \cdot t_{\phi}^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} = \frac{2 \cdot f}{l_{\phi}}. \quad (27)$$

Следовательно формулы Е. Н. Маслова определяют не среднюю толщину среза, а отношение средней площади сечения среза зерном к шагу режущих зерен с некоторым поправочным коэффициентом.

В ф-ле (27) коэффициент 2 в числителе появился потому, что по схемам на фиг. 4-в-г длина среза в 2 раза больше, чем по схеме Е. Н. Маслова, изображенной на рис. 4, а, б и 1.

В этом физический смысл формул Е. Н. Маслова и его предшественников. Из выражения (27) ясно, что формулы Е. Н. Маслова согласуются с практикой качественно лишь в той мере, в какой определяют площадь сечения среза (по формуле 27), ясно так же, что не может быть количественного согласования с практикой этих формул (1; 1-а), как формул для толщины среза. Таким образом доказано, что формулы Е. Н. Маслова (1) и (1-а) не определяют ни максимальную, ни среднюю толщину срезов при шлифовании, не определяют они полностью и среднюю площадь сечения срезов.

Поэтому применение в теории шлифования формул вида (1) и (1-а) и им подобных надо считать нецелесообразным. Повидимому более целесообразно использовать для определения площади среднего сечения среза формулу (26) с поправками для разных видов шлифования. Для определения толщины и ширины срезов (и выявления в связи с ними влияния различных факторов на процесс шлифования) можно пользоваться формулами (11), (12) и (17) с теми же поправками к формуле (17) для разных видов шлифования. Не трудно убедиться в том, что предлагаемые формулы и их исходные положения хорошо согласуются с практикой и более удобны для вывода силовых и других зависимостей.

Выводы

1. Теория Е. Н. Маслова является большим достижением советской науки, — первой теорией шлифования в полном смысле этого слова, рассматривающий все основные стороны этого особенно сложного процесса резания. Работа Е. Н. Маслова содержит много чрезвычайно важных для практики и дальнейшего развития теории экспериментальных данных и теоретических обобщений. Особенно большое значение имеют разделы о силах и условных напряжениях резания — царапания отдельным

зерном шлифовального круга. Эти разделы подводят физическую основу под теорию шлифования.

2. Е. Н. Маслов высказал ряд совершенно правильных на наш взгляд исходных положений, на основе которых должна строиться теория шлифования. Особенно важным является положение о том, что в реальном процессе шлифования отдельные зерна срезают частицы металла равномерно по всей обрабатываемой поверхности.

К сожалению, это исходное положение не согласуется с основными теоретическими формулами Е. Н. Маслова для расчета размеров сечения срезов отдельными зернами, усилий шлифования, чистоты обработанной поверхности и т. д.

3. Доказано, что основные теоретические формулы Е. Н. Маслова могут быть выведены исходя из допущения, что шлифовальный круг подобен набору дисковых фрез, у которых зубья заменены абразивными зернами, врезающимися в металл строго вслед друг другу. Причем расстояние между этими рядами зерен (расположенными в плоскостях вращения) оказывается настолько большим, что вся поверхность изделия вообще не может быть обработана (рис. 5, 7, 8).

Объем «теоретически» срезанного металла во много раз меньше того объема, который срезается на самом деле, если определить толщину отдельных срезов по формулам Е. Н. Маслова (ф-ла 1 и др.).

Усилия шлифования, определяемые по теоретическим формулам исходя из удельных сил установленных экспериментально (для шлифования целым кругом или царапая отдельным зерном), оказываются во много раз меньше действительно наблюдаемых усилий при шлифовании.

Шероховатость поверхности «теоретически» рассуждая оказывается в десятки раз больше, чем на практике. Доказано также, что формулы (1 и 1-а) Е. Н. Маслова определяют не толщину срезов, они имеют иной физический смысл, а именно: определяют отношение средней площади сечения среза зерном к среднему расстоянию между соседними режущими зернами круга с некоторым поправочным коэффициентом (формула 25—26—27). При таком понимании физического смысла этих формул они удовлетворяют условию равенства теоретически срезанного объема металла действительно срезанному.

4. Для того, чтобы теория шлифования больше совпала с практикой и могла служить еще лучшим руковод-

ством для дальнейшего усовершенствования производственных процессов шлифования, необходимо вернуться к исходному положению о равномерном распределении срезов на поверхности обработки и на его основе вывести новые формулы для расчета размеров сечения отдельных срезов, формулы, которые могли бы служить надежной базой для развития всех сторон теории шлифования и, прежде всего, для расчета усилий шлифования.

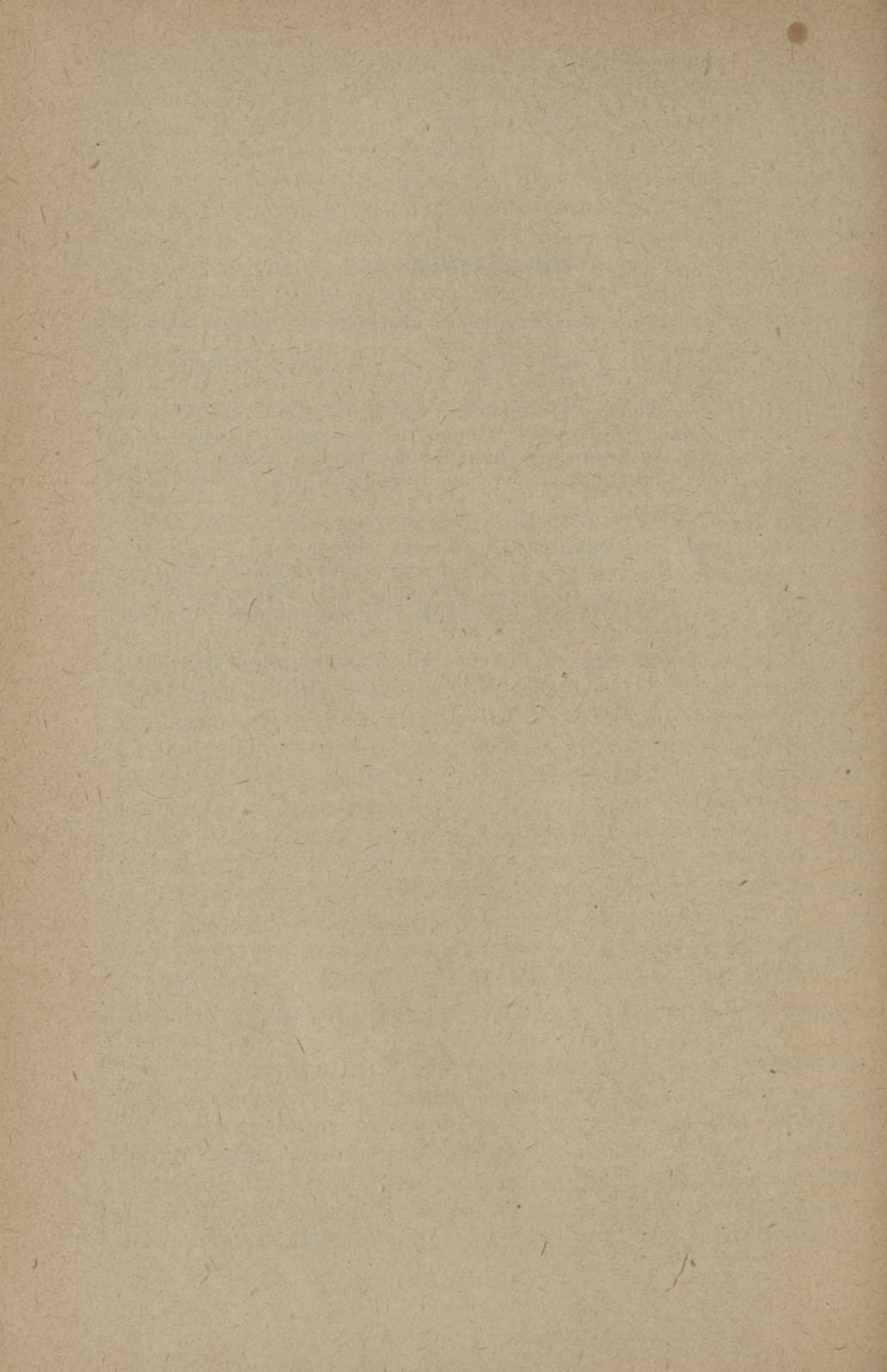
5. Идя в этом направлении, сотрудники лаборатории шлифования ЭНИИПП предложили свою формулу для определения максимальной толщины среза отдельными зернами (ф-ла 10). Эта формула дает качественное представление о влиянии ряда факторов на процесс шлифования, но, к сожалению, не используется для вывода основных формул теории шлифования, необходимых для количественных и более глубоких качественных решений, в частности, для определения средних усилий шлифования исходя из закона удельной силы резания. Повидимому эта формула ЭНИИПП не может быть использована для вывода таких основных формул теории шлифования, если не дополнить формулу (10) расчетом коэффициента «С», который должен зависеть также от режимов резания.

Исходным положением этой формулы (10) является допущение, что отдельные срезы равномерно распределяются на поверхности и покрывают ее полностью, соприкасаясь друг с другом со всех сторон (рис. 4, б), но не накладываясь друг на друга (рис. 4, а, в, г). Подсчеты расстояний между срезами в процессе шлифования — продольного и поперечного шага срезов по формулам (14) и (17) показывают, что такая схема распределения срезов условно возможна лишь, как частный случай, соответствующий вполне определенным режимам и условиям шлифования. Обычно срезы обязательно накладываются друг на друга в продольном (S_z) и в поперечном направлении (S_x).

6. Представляется целесообразным строить расчет размеров срезов и основные формулы теории шлифования на определении расстояний между соседними срезами, равномерно распределенными по всей обрабатываемой поверхности, учитывая при этом разновысотность зерен (рис. 4, в, г и формулы 26, 11, 12 и 17) с поправками на рассеивание действительных размеров срезов относительно средних.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов. Машгиз. 1951.
2. Волский Н. И. Обрабатываемость металлов шлифованием. Машгиз. 1950 г.
3. ЭНИИПП — Экспериментальный научно-исследовательский институт подшипниковой промышленности. Выпуск 3. Современные методы обработки деталей подшипников. Машгиз. 1950 г.
Статья — пути повышения производительности при круглом шлифовании.
4. Академия наук СССР. Качество поверхности деталей машин. Сборник 1. Изв. Акад. наук СССР. Москва 1951 г.
Статья — А. В. Никольский. Свойства поверхностной зоны закаленной стали после обычного и доводочного шлифования.
5. Даниелян А. М. Резание металлов и инструмент. Машгиз. 1950 г.
6. Охлаждающие смазывающие жидкости. Сборник, Машгиз, 1954 г.
Статья — А. В. Никольский. Выбор состава жидкости для тонкого доводочного шлифования.



Редактор В. Трейер
Технический редактор Х. Коху
Корректор Н. Круглова

Сдано в набор 23 III 1954. Подписано
к печати 8 VII 1954. Тираж 800. Бумага
54 × 84, ¹/₁₆. Печатных листов 2. По
формату 60 × 92 печатных листов 1,64.
Учетно-издательских листов 1,17.
МБ-11831. Типография имени Ханса
Хейдеманна, Тарту, Валликраави 4.
Заказ № 1126.

Цена 85 коп.

