

ТРУДЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНСТИТУТА
АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ
им. П. И. БАРАНОВА

ВЫПУСК 30

30.

Ииж. П. Е. ДВЯЧЕНКО

ШЛИФОВАЛЬНЫЙ КРУГ И ЕГО РЕЖУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

30. 11
6420

ОБОРОНГИЗ

1939

Депозитарий

Инж. П. Е. ДЬЯЧЕНКО

ШЛИФОВАЛЬНЫЙ КРУГ
И ЕГО РЕЖУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

05-
Цена 4 руб. 3
Установлена заказчиком

11305696

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ
МОСКВА 1930 ЛЕНИНГРАД



Редактор В. А. Рубец
Техн. редактор И. М. Зудачин

Изд. № 171. Сдано в набор 11/V
1939 г. Подп. к печ. 20/VI 1939 г.
Печ. листов 6 $\frac{1}{2}$, Бум. листов 3 $\frac{1}{4}$.
Формат бумаги 60 92 $\frac{1}{4}$. Уполн.
Главшта А-12973. Учетн. автор,
лист. 7,28. Учетн. № 10196/42.
Занав № 833.

Киевская типография Оборонгиза,
Крещатик, 42.

ВВЕДЕНИЕ

Шлифование представляет собой более сложный процесс, нежели другие виды обработки металлов снятием стружки. Несмотря на то, что процесс шлифования появился очень давно и широко внедрился в производство, до сих пор не разработаны теоретические основы процесса шлифования, до сих пор мы очень слабо знаем инструмент, применяемый при шлифовании, — шлифовальный круг.

Проблема шлифования трудна потому, что она комплексна.

Основными характеристиками шлифовального круга считаются: твердость, зернистость, структура, сорт абразива и сорт связки. Изучение всех этих характеристик находится в зародышевом состоянии. Понятие твердости неясно и не имеет научного смысла, так как твердость является производным фактором от основных физических параметров. Понятие зернистости, на первый взгляд наиболее простое и зависящее от геометрических размеров абразивных зерен, также не изучено. При дроблении абразива для изготовления шлифовального круга невозможно получить зерна одинаковой и требуемой формы. Зерна шлифовального круга получают различной формы, режущие грани зерен имеют разнообразную, не поддающуюся изучению форму, большей частью не отвечающую законам резания. Понятие структуры шлифовального круга возникло позже, чем все остальные его характеристики. Структурные круги не вышли еще из стадии освоения как у нас, так и за границей. Поэтому характеристика круга по структуре изучена еще менее, чем другие. Сорт абразива, определяющий способность зерна расщепляться, образовывать новые режущие грани, сопротивляться усилиям в процессе резания, является чрезвычайно важным для качества круга, но до сих пор мы имеем лишь слабое представление о свойствах различных сортов абразивов. Изучение свойств абразивов находится в начальной стадии. Сорта связки изучены еще меньше, чем сорта абразивов.

Таким образом шлифовальный круг, работоспособность которого зависит от ряда факторов, изучен крайне недостаточно.

Автор поставил своей целью изучить режущие свойства шлифовального круга, положив в основу исследования работоспособность круга, т. е. работу, которую может совершать круг в различных условиях. При этом работа выражается произведением действующего при шлифовании усилия на пройденный путь и измеряется в килограммометрах. Работоспособность является наиболее верным критерием при исследовании производственной характеристики круга, так как этим мы обобщаем несколько свойств, трудно поддаю-

щихся изучению отдельно и в комбинации с другими свойствами, и исследуем практически наиболее необходимые показатели (изучение круга базируется на количестве удаляемого кругом металла при известных условиях).

Автор подошел теоретически к вопросу работоспособности шлифовального круга, построил прибор для исследования работоспособности круга, провел ряд экспериментов на этом приборе с целью исследования влияния различных факторов на процесс шлифования и подтверждения приводимых теоретических предпосылок, а также показал способ определения режущей способности круга в условиях производственного шлифования.

На основе принятых теоретических предпосылок разработан вопрос о количестве режущих зерен шлифовального круга, о количестве тепла, образующегося при шлифовании, и предложена конструкция прибора для определения работоспособности как основной характеристики шлифовального круга.

При описании характеристик шлифовального круга автор приводит собственное исследование наиболее распространенных в настоящее время приборов для определения твердости шлифовальных кругов — градометра, прибора Макензена и прибора Прокофьева.

В основном настоящая работа дает теоретический подход к определению работоспособности шлифовального круга, методику практического использования найденных величин и ряд фактических материалов, определяющих характеристику шлифовального круга.

1. ШЛИФОВАЛЬНЫЙ КРУГ

Шлифовальный круг представляет собой конгломерат абразивных зерен (корунд, карборунд и т. д.), соединенных при помощи связующего вещества.

Абразивное зерно может быть или в виде монокристалла или же — чаще всего в виде друзы (несколько кристаллов, или их обломков, связанных в зерне вместе). Зерно-друза раскалывается по междукристаллической прослойке, которая расположена без какой-либо закономерности. Монокристалл раскалывается по плоскостям спайности, расположенным в определенных направлениях относительно осей кристалла. Зерно корунда, имеющего кубическую решетку, обычно рассечено трещинами механического происхождения и трещинами сдвигов под влиянием внешних сил.

Кристаллы электрокорунда (по данным ЦНИЛАШ — Центральной научно-исследовательской лаборатории абразивов и шлифования Глав-союзабразива) имеют следующие размеры: крупные от 0,8 до 2,4 мм (искусственно можно вырастить кристалл размером 4 мм в поперечнике), средние от 0,4 до 0,9 мм, мелкие от 0,08 до 0,4 мм (редко до 0,004 мм). Трещины механического происхождения проникают в кристалл на глубину 0,2—0,6 мм, иногда на 1 мм. В том месте, где связка соприкасается с зерном в готовом круге, имеется реакционная полоса (зона) толщиной в несколько микрон. Эта полоса более прочно удерживает зерно в связке. Здесь происходит очевидно химическое взаимодействие и проникновение частиц связки в кристалл зерна. Между реакционными полосами связка менее прочна. При разламывании или разрыве круга, при вырывании зерна из круга разрушение связки происходит между реакционными полосами. Таким образом выломанное из круга зерно всегда покрыто слоем прочно приставшей связки. При измерении размера выпавших в процессе шлифования зерен очень трудно освободить зерно от некоторого слоя связки (реакционной зоны), что искажает результаты исследования.

Абразивные зерна по форме делятся на нормальные или изометрические (с отношением размеров в трех взаимно-перпендикулярных направлениях 1 : 1 : 1) и дефективные (клиновидные, мечевидные и т. д., с отношением размеров от 1 : 1 : 2 до 1 : 1 : 4).

Содержание зерен различной формы в круге по данным ЦНИЛАШ выражается приблизительно данными табл. 1.

Основные свойства зерен корунда и карборунда следующие: 1) химический состав; 2) наличие механических примесей; 3) форма зерна; 4) состояние поверхности зерна; 5) величина кристаллов; 6) острота

Таблица 1

Форма зерна	Зернистость											
	Американ- ский корунд фирмы Ован			Корунд завода им. Ильича								
				I сорт			II сорт			III сорт		
	24	46	80	24	46	80	24	46	80	24	46	80
Относительное количество различных зерен %												
Нормальное	94	92	88	95	91	87	86	80	78	82	19	23
Мечевидное	4	4	8	3	6	8	12	15	16	14	19	23
Пластинчатое	2	4	4	2	3	5	2	4	6	4	6	8

граней; 7) минералогический состав; 8) твердость; 9) вязкость; 10) шлифуемая способность.

Имеется еще ряд других не менее важных свойств (капиллярность, спекаемость и т. д.).

Работа шлифовального круга (если учитывать кроме перечисленных еще свойства связки, свойства зерен в комбинации со связкой, технологию изготовления круга, условия производственного шлифования) зависит от такого огромного количества действующих факторов, что дать суммарную зависимость от всех этих условий является совершенно невыполнимым делом даже и в том случае, если бы все они были достаточно изучены. Но трудности исследования процесса шлифования заключаются в том, что ни один из действующих факторов не изучен достаточно полно для того, чтобы можно было им управлять по желанию и знать его влияние на процесс шлифования. При других видах обработки металлов резанием (точении, фрезеровании и т. д.) мы достаточно хорошо знаем режущий инструмент. Мы можем исследовать качество металла, из которого изготовлен инструмент, имеем возможность полно изучить геометрическую форму инструмента и т. д. При шлифовании мы лишены всего этого. Мы почти не знаем режущего инструмента при шлифовании. Вот почему до сих пор очень слабо разработана теоретическая сторона процесса шлифования по сравнению с остальными видами обработки резанием. В процессе шлифования более, нежели в других видах обработки приходится пользоваться эмпирическими зависимостями. Разные исследователи выводят свои эмпирические формулы, которые очень трудно увязать взаимно; зачастую они противоречат одна другой.

О громадной пестроте в характеристиках шлифовальных кругов говорит хотя бы относительное количество связки (при одной твердости круга) в кругах различных заводов. Оно выражается следующими цифрами (%):

Фирма «Универсал»	16,32
» «Электрит»	15,47
Завод им. Ильича, лучший круг	25,39
» худший круг	22,05
Челябинский абразивный завод, лучший круг	15,83
То же, худший круг	17,75

Шлифующая способность абразивных зерен (идентичная твердости абразива) исследуется несовершенным способом Миндта путем истирания абразивного порошка между двумя стеклянными дисками, причем определяется потеря дисков в весе. По методу Миндта и подобным методам (Шубникова, Лемлейн и Койфмана) определяется твердость не абразива, а взятых для испытания дисков стекла и стали. На приборе ЦНИЛАШ производится измельчение абразивной крупки между двумя стальными пластинками, измеряется работа, затрачиваемая на измельчение, и количество разрушенной крупки. Все эти способы дают не физические свойства вещества, а косвенные характеристики, различные для каждого прибора.

Острота абразивных зерен проверяется очень несовершенным прибором — пенетрометром или конусом, проникающим в зерно на определенную глубину. Остальные свойства зерен исследуются еще в меньшей степени, чем вышеприведенные, или же совсем не исследуются.

К. Круг¹ производил определение хрупкости абразивных материалов. Он отсортировывал 150 по возможности одинаковых зерен (сначала корунда, затем карборунда) и подвергал их одновременному давлению в течение короткого времени (по некоторой аналогии с процессом шлифования). Отходы просеивались через сита разных номеров и взвешивались. Чем больше прочность зерна, тем меньше оно крошится. Суммарная поверхность зерен после испытания больше, чем до испытания. Чем хрупче материал, тем большая образуется поверхность при восприятии приложенной энергии. По величине образовавшейся поверхности фракций можно судить о способности абразивных зерен сопротивляться растяжению и скалыванию. Поверхность раздробленных частиц приблизительно вычислялась по весу этих частиц. На фиг. 1 нанесена σ — величина суммарной прочности абразивных зерен под влиянием кратковременного давления в зависимости от C — величины хрупкости зерна. Эти величины обратны одна по отношению к другой, или $C = \frac{1}{\sigma}$. На левой стороне фиг. 1 эти величины даны для 30 сортов зерен корунда, на правой стороне — для 8 сортов карборунда.

К. Круг подметил при своих опытах, что зерна корунда при скалывании стремятся образовать поверхность минимального размера, т. е. шарообразную. При последовательном откалывании частиц от зерна форма остающейся части будет все более приближаться к шару. Шарообразные зерна требуют затраты большей работы при шлифовании, чем острогранные, для получения одинакового эффекта.

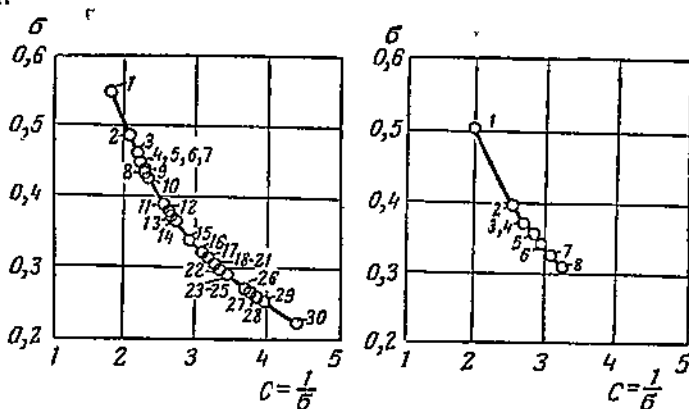
Подобные опыты были произведены Валликсом и Гедике². Зерна алунда подвергались троекратному испытанию при различных условиях — различных весах падающего груза и различных высотах падения грузов, т. е. с затратой различного количества работы. Была

¹ VDI, 1929, т. 78, стр. 1707, К. Круг, Определение хрупкости абразивных материалов.

² TZ für praktische Metallbearbeitung, 1935, № 23/24, стр. 587, Wallichs und Goedecke, «Способность шлифуемых материалов к дроблению во время шлифования».

сделана попытка установления стандарта испытаний зерна на хрупкость. Результаты испытаний даны на фиг. 2.

Если два шлифовальных круга одной и той же твердости и зернистости подвергаются одинаковой нагрузке в процессе шлифования, то вязкие зерна затупятся, не успевая расколоться, чем увеличивают работу трения круга об изделие. При хрупких же зернах при каждом новом приложении нагрузки от зерна отламываются новые осколки, независимо от степени затупления граней. Непрерывно образуются новые режущие грани. Дробление зерна происходит до его полного израсходования. Шлифовальный круг с вязким зерном будет иметь меньшее количество режущих элементов, нежели круг с хрупким зерном.

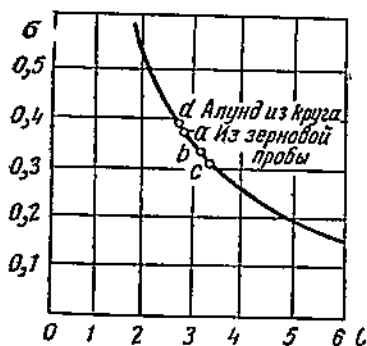


Фиг. 1.

Суммируя сведения, имеющиеся в настоящее время о свойствах абразивных зерен, можно констатировать, что изучение этих свойств находится в зачаточном состоянии.

Еще в меньшей степени изучены свойства связок шлифовальных кругов.

В то время, как абразивный материал представляет собой кристаллическое вещество, связка аморфна и похожа на стекло. Шлифовальные круги фирм Нортон и «Универсал» дают картину насыщенного зерна без связки¹. Связка не видна: она прозрачна, так как сплавилась до стекловидного состояния. Связки кругов завода им. Ильича в настоящее время непрозрачны (белого или серого цвета), но завод стремится путем соответствующего режима отжига получить прозрачные связки. Про-



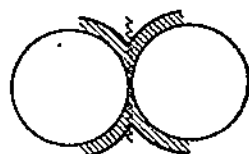
Фиг. 2.

ответствующего режима отжига получить прозрачные связки. Про-

¹ Бюллетень ЦНИЛАШ, 1937, № 7.

зрачная связка имеет гладкую поверхность после застывания; поры круга с прозрачной связкой имеют гладкие стенки, что облегчает снятие стружки.

При высокой температуре во время термообработки круга связка становится подвижной, растекается по поверхности зерна (в силу поверхностного натяжения) и собирается в местах соприкосновения зерен, образуя после охлаждения мостики между зернами (фиг. 3). Связка, смачивая зерна, обволакивает их тонкой пленкой.



Фиг. 3.

Для исследования абразивных изделий изготовляют микрошлифы. На микрошлифах керамическая связка представляет собой стекло, большей частью бесцветное или окрашенное в слабожелтый цвет и пронизанное тонкими бесцветными игольчатыми кристалликами (повидимому разных минералов). Эти кристаллики растут как от поверхности зерен корунда, так и от центров кристаллизации в самом стекле, расходясь радиально во всех направлениях.

Имеется большое количество разнообразных связок. Силикатовая связка (жидкое стекло) целиком может быть приравнена по прочности к стеклу. Керамическая связка имеет много сортов. Завод им. Ильича применяет 4—6 сортов керамических связок, но стремится к установлению единой керамической связки. Некоторые сорта керамической связки имеют кристаллический скелет, в порах которого расположено аморфное стеклоподобное вещество. Скелет, размеры и прочность которого зависят от температуры обжига связки, отличает связку от стекла. Такая связка является полуаморфной. При соответствующей температуре обжига круга скелет исчезает, и связка становится стекловидной и целиком аморфной (неспекающейся).

Вопрос о механической прочности связок совершенно не изучен. Но механические свойства стекловидных связок можно получить, пользуясь данными для определения прочности стекла. Григорьев и Муравлев¹ дают эмпирические формулы для определения механических свойств стекла, исходя из его химического состава.

Эмпирические константы для стекла по Григорьеву и Муравлеву даны в табл. 2.

Таблица 2

Химические компоненты связки	Коэффициенты x для определения:			
	сопротивления разрыву	сопротивления сжатию	модуля упругости	удельного веса
SiO ₂	0,09	1,23	65	2,24
Al ₂ O ₃	0,05	1,0	160	2,75
CaO	0,2	0,2	100	4,3
MgO	0,01	1,1	600	3,5
K ₂ O	0,01	0,05	71	3,2
Na ₂ O	0,02	0,6	100	3,2

¹ П. Н. Григорьев и Л. Н. Муравлев, Стекло, 1938.

Эти коэффициенты x нужно вставить в следующие формулы:
для определения прочности на разрыв и на сжатие и для определения модуля упругости первого рода E :

$$E = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots;$$

для определения удельного веса:

$$\gamma = \frac{S}{\frac{a_1}{x_1} + \frac{a_2}{x_2} + \frac{a_3}{x_3} + \dots};$$

В этих формулах:

S — сумма процентного содержания отдельных химических компонентов связки;

a_1, a_2 — процентное содержание отдельных компонентов;

x_1, x_2 — соответствующие эмпирические коэффициенты для них (из табл. 2).

В табл. 3 приведен химический состав некоторых связок.

Таблица 3

Компоненты	Процентное содержание в связках:			
	керамической		силикатовой	
	Нортон	«Универсаль»	№ 1	№ 2
SiO ₂	44,61	53,75	27,27	32,23%
Al ₂ O ₃	32,66	19,23	—	—
TiO ₂	—	5,1	—	—
Fe ₂ O ₃	1,62	2,3	—	—
CaO	3,2	4,05	0,13	0,11
MgO	3,9	2,81	0,01	0,04
K ₂ O	2,53	2,41	0,49	0,28
Na ₂ O	11,98	9,84	9,5	11,91

После подстановки в формулы соответствующих значений получим следующие значения механических свойств связок (табл. 4).

Таблица 4

Связка	Сопротивление разрыву кг/см ²	Сопротивление сжатию кг/см ²	Модуль упругости E кг/см ²
Керамическая—Нортон	639	9993	1216800
» «Универсаль»	684	9515	982500
Силикатовая № 1	267	3926	277400
» № 2	317	4683	334600

Удельный вес керамической связки Нортон, определенный по вышеприведенной формуле, выразится 2,59. По данным ЦНИЛАШ

удельный вес керамической связки равен 2,4—2,6. Это указывает на то, что приведенным методом расчета можно пользоваться при определении механических свойств связки.

Дж. Гест¹ считает, что усилие, вырывающее зерно из связки, с некоторым приближением пропорционально площади поперечного сечения стружки. Основываясь на этом, Гест выводит формулу (для случая круглого наружного шлифования) для так называемого проверочного коэффициента (the controlling factor)

$$c = \frac{v_u^2 (D_u + D_k) \cdot t}{D_u \cdot D_k},$$

где v_u — окружная скорость изделия;

D_u — диаметр изделия;

D_k — диаметр круга;

t — двойная радиальная глубина резания.

Гест считает, что проверочный коэффициент приблизительно пропорционален усилию, вырывающему зерно из связки. При большом износе круга нужно уменьшить величину проверочного коэффициента. При засаливании круга коэффициент нужно увеличивать. При максимальной производительности круга

$$v_u \cdot t = \text{const},$$

но при этом величины v_u и t должны так изменяться, чтобы величина проверочного коэффициента оставалась постоянной.



Фиг. 4.

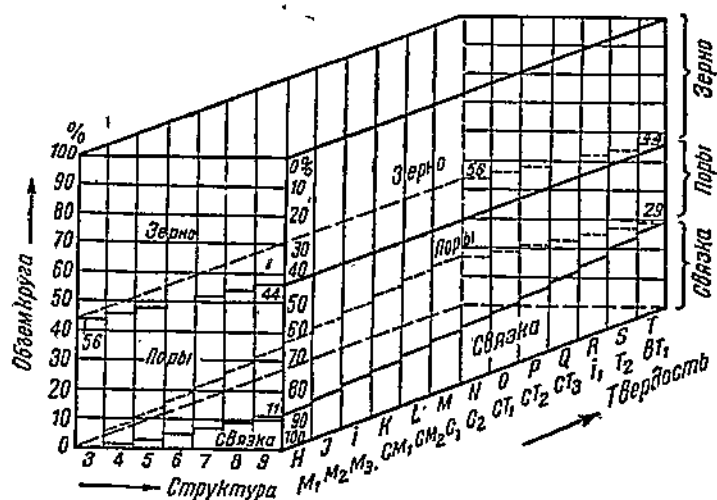
Шлифовальные круги нерегулируемых структур при одних и тех же характеристиках дают различную производительность. Американская фирма Нортон с 1920 г. занималась разработкой методики производства кругов с регулируемой структурой, или структурных кругов. В настоящее время наши абразивные заводы им. Ильича в Ленинграде и Челябинский абразивный (ЧАЗ) — уже выпускают и внедряют в производство структурные круги.

На фиг. 4 даны структурные круги трех различных структур. По системе Нортонa имеется 13 структур (от нулевой до двенадцатой): нулевая структура — самая плотная, № 12 — самая открытая. Наиболее ходовыми структурами при шлифовании являются структуры от № 5 до № 8. Для объяснения сущности строения структурных

¹ J. Guest, «Grinding Machinery», 1915.

кругов приведем таблицу объемного содержания зерна, связки и пор в кругах с регулируемой структурой (табл. 5).

На фиг. 5 эти же соотношения выражены графически в системе трех координат для единицы объема круга.



Фиг. 5.

Структурные круги различаются (при одинаковой зернистости) объемным содержанием в круге зерна и связки. Объем зерна не зависит от твердости круга. С повышением твердости при одной и той же структуре уменьшается объем пор и увеличивается объем связки. С повышением номера структуры при той же твердости увеличивается объем связки и уменьшается объем зерна. При этом суммарная пористость остается неизменной, увеличиваются размеры пор и уменьшается их число.

Круги одинаковой структуры и (зернистости) имеют на единице поверхности одинаковое количество режущих кромок; зерна расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Таким образом разница между кругами различных структур заключается в сближении или удалении зерен друг от друга, что зависит от объемного содержания связки. При малых номерах зерна расположены очень близко. Чем больше номер структуры, тем больше требуется связки для того, чтобы зерно так же прочно держалось в круге при неизменной твердости. Структура регулируется только количеством связки, но не качеством ее. Связка должна иметь подвижность при температуре обжига круга.

Структурные круги изготавливаются только путем прессования. Литые структурные круги делать нельзя. В зависимости от давления при прессовании можно получить различные структуры при одном и том же количестве связки.

Так, по данным ЦНИЛАШ, при одной и той же твердости круга изменялось давление при прессовании. При этом получались такие структуры:

J_4	при давлении свыше 300 кг/см ²	
J_5	»	200 »
J_6	»	125 »
J_7	»	75 »
J_8	»	50 »

С увеличением давления при прессовании резко возрастает механическая прочность круга; пористость же круга уменьшается.

2. КОЛИЧЕСТВО РЕЖУЩИХ ЗЕРЕН ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Резание при шлифовании производится теми зернами, которые лежат на поверхности круга. Количество режущих зерен, приходящихся на единицу поверхности круга, определяется зернистостью круга и процентным соотношением в круге зерна, связки и пор.

Размеры абразивных зерен по ОСТ (полагая условно, что зерно имеет форму шара) выражаются табл. 6.

Таблица 6

Зернистость №		16	20	24	36	46	60	80	100
Диаметр зерна мм	от до средний	0,84	0,71	0,5	0,35	0,25	0,177	0,149	0,125
		1,19	0,84	0,71	0,5	0,35	0,2	0,177	0,149
		1,02	0,78	0,6	0,42	0,3	0,19	0,163	0,137
Объем зерна $\frac{\pi d^3}{6}$ мм³		0,553	0,268	0,1135	0,0355	0,0141	0,0042	0,00215	0,00144

Обозначим:

i_1 — количество режущих зерен в 1 мм³ объема круга;

i — количество режущих зерен на 1 мм² поверхности круга;

d — диаметр зерна в мм;

W_k — часть объема круга, занимаемая зернами.

Количество режущих зерен на поверхности круга можно подсчитать двумя способами.

По первому способу полагаем, что зерна расположены в круге так, как изображено на схеме (фиг. 6). В 1 мм³ шлифовального круга содержится по объему $W_k\%$ зерна. Объем одного зерна, если принять зерно приближенно за шар, равен $\frac{\pi d^3}{6}$ и дан в табл. 6. При этих условиях

$$i_1 = \frac{1 \cdot W_k}{\frac{\pi d^3}{6}} = \frac{6 \cdot W_k}{\pi d^3} = 1,91 \frac{W_k}{d^3}.$$

Количество режущих зерен на 1 мм^2 поверхности круга, считая, что толщина слоя связки незначительна, и ею можно пренебречь, будет

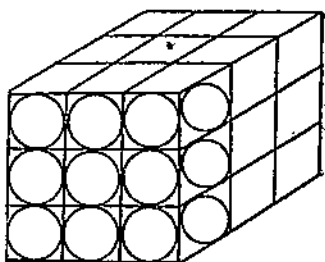
$$l = \sqrt[3]{i_1^3} = i_1^{1/3};$$

$$i = \left(1,91 \frac{W_k}{d^3} \right)^{3/2} = 1,54 \frac{W_k^{1/2}}{d^3}.$$

Этот способ верен только в первом приближении, так как неправильно представлять шлифовальный круг наполненным только абразивными зернами. В кругах с регулируемой структурой особенно ярко выражена разница в количестве режущих зерен, определяющаяся номером структуры и зернистости.

По второму, более точному способу подсчета выделяем в шлифовальном круге элементарный объем (фиг. 7) в виде параллелепипеда со сторонами a , a и b .

Такое расположение зерен отвечает структуре круга, изображенной на фиг. 63. В правой части фиг. 63 показано схематически расположение режущих зерен, если смотреть на рабочую поверхность шлифовального круга. Вокруг каждого зерна ближайшие соседние зерна размещены в вершинах правильного шестиугольника. Расстояние между зернами в вертикальном направлении равно стороне шестиугольника a , в горизонтальном — хорде описанной окружности



Фиг. 6.

$$b = \frac{a}{\operatorname{tg} 30^\circ}$$

(фиг. 8). В левой части фиг. 63 показано расположение зерен в плоскости, перпендикулярной к только что рассмотренной (вглубь круга). Как видно, размещение зерен подчиняется тому же закону, т. е. плоскости центров зерен удалены друг от друга на $\frac{b}{2}$, а зерно от зерна в направлении, перпендикулярном к рабочей поверхности, на расстояние b .

В объеме элементарного параллелепипеда (фиг. 7) заключено по $\frac{1}{8}$ зерна в каждом углу и по $\frac{1}{2}$ зерна на каждой из шести граней, или

$$6 \cdot \frac{1}{2} + 8 \cdot \frac{1}{8} = 4 \text{ зерна.}$$

Объем зерен, заключенных в параллелепипеде, $4 \frac{\pi d^3}{6}$.

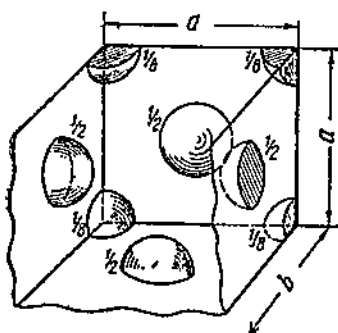
В 1 мм^3 круга содержится $W_k\%$ зерна. Найдём количество параллелепипедов объемом ab^2 , приходящееся на 1 мм^3 круга.

$$c = \frac{1 \cdot W_k}{4 \cdot \frac{\pi d^3}{6}}.$$

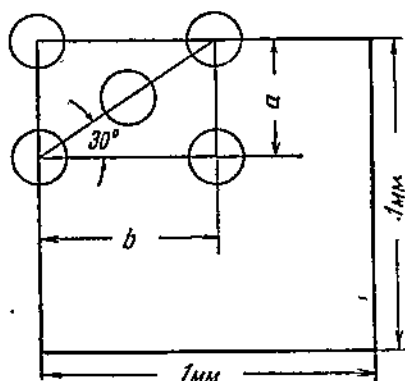
На поверхности 1 мм^2 в прямоугольнике со сторонами a и b (фиг. 8) заключено 1 зерно ($\frac{1}{2} + 4 \cdot \frac{1}{8}$). Число режущих зерен на 1 мм^2 поверхности круга равно:

$$i = \frac{1}{ab} = \frac{\text{tg } 30^\circ}{a^2} = \frac{\text{tg } 30^\circ \cdot W_k^{1/2}}{1,13 \cdot d^2},$$

$$i = 0,5 \frac{W_k^{1/2}}{d^2}.$$



Фиг. 7.



Фиг. 8.

Подставляя соответствующие значения для W_k и d (для различных номеров структур и различных зернистостей) в формулу, выведенную для i , получим табл. 7, в которой дано количество режущих зерен на 1 мм^2 поверхности круга.

Таблица 7

Структура №	Количество зерен на 1 мм^2 поверхности круга зернистостью							
	16	20	24	36	46	60	80	100
0	0,35	0,6	1,0	2,08	4,06	10,0	13,6	19,3
1	0,34	0,58	0,99	2,01	3,93	9,9	13,2	18,7
2	0,33	0,57	0,97	1,98	3,86	9,7	12,9	18,3
3	0,32	0,55	0,94	1,93	3,76	9,4	12,5	17,8
4	0,31	0,54	0,91	1,87	3,66	9,1	12,2	17,3
5	0,31	0,53	0,89	1,83	3,6	8,9	11,9	17,0
6	0,3	0,52	0,87	1,8	3,53	8,7	11,7	16,6
7	0,3	0,50	0,85	1,75	3,4	8,5	11,4	16,2
8	0,29	0,49	0,83	1,7	3,32	8,3	11,1	15,8
9	0,28	0,48	0,8	1,65	3,22	8,0	10,7	15,3
10	0,27	0,46	0,78	1,59	3,12	7,8	10,4	14,8
11	0,26	0,44	0,75	1,53	3,0	7,5	10,0	14,2
12	0,25	0,42	0,72	1,49	2,9	7,2	9,7	13,8

В журнале Werkstattstechnik¹ дается количество режущих зерен на 1 мм² для алундовых кругов на керамической связке твердостью О (табл. 8).

Таблица 8

Сравнивая эти данные с данными табл. 7, полученной автором, мы видим, что они различаются очень мало. Для зернистости 60 Нортон дает $i = 5,12$. Для этой же зернистости Джамс Гест² приводит цифры: $i = 2,33$ и $i = 2,48$. Дж. Гест дает также приблизительную формулу для подсчета количества режущих зерен любой зернистости, если мы знаем количество режущих зерен для какой-нибудь одной зернистости:

Зернистость	i
24	0,62
36	2,0
46	2,9
60	6,2

$$a_1 = a_2 \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2$$

или

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2,$$

где a — количество режущих зерен на единице поверхности круга;
 b — номер зернистости

Таблица 9

$\frac{b_1}{b_2}$	$\frac{16}{20}$	$\frac{20}{24}$	$\frac{24}{36}$	$\frac{36}{46}$	$\frac{46}{60}$	$\frac{60}{80}$	$\frac{80}{100}$
$\left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2$	0,64	0,69	0,44	0,61	0,59	0,56	0,64
$\frac{a_1}{a_2}$	0,59	0,6	0,48	0,51	0,41	0,73	0,70

Таблица 10

$\left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2$	0,44	0,61	0,59
$\frac{a_1}{a_2}$	0,31	0,69	0,47

Для примера выберем ряд значений $\frac{a_1}{a_2}$ и $\left(\frac{b_1}{b_2} \right)^2$, причем значения a_1 и a_2 возьмем из табл. 7. Сопоставление чисел дано в табл. 9.

Проверяя формулу Дж. Геста по немецким данным, получим табл. 10.

Из табл. 9 и 10 видно, что формула Дж. Геста верна только с некоторым приближением и пригодна для ориентировочных подсчетов.

Вообще же количество режущих зерен зависит от многих факторов. При увеличении, например, глубины шлифования в работу вступают новые зерна, не работавшие при малой глубине шлифования.

¹ Werkstattstechnik, 1 Januar 1932, H. 1, S. 19.

² J. Guest «Grinding Machinery», London, 1915.

Количество режущих зерен зависит также от режима правки круга и от степени затупления круга.

3. К ПРОЦЕССУ ШЛИФОВАНИЯ

Существуют две области работы шлифовального круга: работа круга с затуплением и с самозатачиванием.

Наиболее распространен в производстве способ работы с затуплением круга, по которому круг работает до появления тех или иных признаков затупления, после чего круг правится алмазом.

О степени затупления шлифовального круга можно судить по следующим признакам:

- 1) количеству сошлифованного материала;
- 2) чистоте шлифуемой поверхности;
- 3) наличию цветов побежалости на изделии в зависимости от поднимавшейся при шлифовании температуры;
- 4) изменению микроструктуры изделия;
- 5) состоянию поверхности круга;
- 6) износу круга;
- 7) характеру звука при шлифовании;
- 8) количеству искр;
- 9) цвету искр;
- 10) вибрации круга и изделия;
- 11) мощности, потребляемой на вращение круга;
- 12) изменению тангенциального и радиального давления.

Для правильного выбора критерия затупления круга необходимо учитывать весь комплекс признаков затупления. Но при различных видах шлифования некоторые из этих признаков являются более важными или проявляют себя более ярко. Так, при глубинном шлифовании (снятии всего припуска на шлифование глубиной до 0,3 мм за один проход) главным признаком затупления круга является износ круга и состояние поверхности круга и обрабатываемого изделия. При обдирке заметными признаками являются характер звука и наличие цветов побежалости. При отделочном шлифовании важна чистота поверхности изделия.

Работа с самозатачиванием редко встречается в заводской практике. Такой способ работы можно наблюдать на некоторых зарубежных заводах (преимущественно в США). Для этого обычно берутся чрезвычайно мягкие шлифовальные круги из специального шлифующего материала и на специальной связке. Обычно применяемые на заводах круги не годятся для работы с самозатачиванием.

При работе с самозатачиванием правка специальных мягких кругов производится через несколько рабочих смен, причем производительность круга непосредственно после правки меньше, нежели тогда, когда круг приработается и работает без правки. Но такой способ можно применять только при обдирочном и в крайнем случае при полусточном шлифовании. Для чистовой обработки самозатачивание неприменимо, так как при таком способе работы круг постепенно утрачивает свою круглую форму и не дает точности обработки и нужной чистоты поверхности.

Правка служит как для восстановления режущих свойств круга, так и для придания ему круглой формы. При этом нужно отметить, что при шлифовальных работах, требующих большой точности, правку алмазом нужно производить при той же скорости круга v_k , при которой производится шлифование изделия. Правку на пониженной скорости (в целях меньшего износа алмаза) можно допускать только при менее точном шлифовании.

Для подтверждения этого автор проделал такой опыт. Образец из термически обработанной стали 53а 1 диаметром 95 мм был прошлифован окончательно (прекратилось искрение и материал уже не удалялся) при скорости круга 27,7 м/сек и при нормальных для данной стали прочих условиях. Затем скорость круга была повышена до 34 м/сек без изменения остальных условий. Хотя образец был до этого прошлифован начисто, при увеличении скорости вновь началось искрение и было удалено 0,005 мм по диаметру (без поперечной подачи). Это говорит о том, что с увеличением v_k увеличилось радиальное давление, абразивные зерна получили возможность внедриться в изделие и снять некоторое количество материала. Это говорит также и о том, что при изменении скорости шлифовальный круг изменяет свою внешнюю форму. Строго цилиндрически заправленный при одной v_k круг приобретает иную наружную форму при другой v_k .

Существует старая точка зрения на сущность явления самозатачивания, по которой по мере затупления режущих зерен круга сопротивление резанию возрастает и, достигнув некоторой величины, выламывает зерно из связки. Связка выкрашивается и обнажает следующий ряд острых зерен, продолжающих работу резания. Несмотря на то, что такое объяснение самозатачивания плохо увязывалось с действительностью, оно все же вошло в техническую литературу и удерживалось до появления работы Франца (W. Franz)¹ и ее лабораторной проверки другими исследователями.

Указанная точка зрения на самозатачивание опровергается рассмотрением вопроса об износе шлифовального круга, как это будет показано дальше. Износ круга в основном получается за счет правки круга алмазом, но не за счет самоизнашивания в процессе шлифования. Если бы при самозатачивании затупившиеся зерна целиком вырывались из связки, то круг имел бы самоизнос во много раз больший, нежели мы имеем в практике шлифования.

За одну рабочую смену пришлось бы израсходовать несколько шлифовальных кругов, которые быстро осыпались бы. Шлифование было бы невозможно ввиду того, что скорость круга при быстром уменьшении диаметра круга так стремительно падала, что не могло бы быть речи о постоянном режиме шлифования.

По В. Францу выкрашивания затупившихся зерен целиком или большими частями не происходит, а имеет место лишь постепенное изнашивание острых кромок и выступов зерен таким образом, что все время образуется поверхность с новыми, более мелкими и острыми

¹ «Werkstatt und Betrieb», № 13/14, 1937, стр. 180, W. Franz «Исследование процесса шлифования корундовыми кругами на керамической связке».

кромками. Зерно не вырывается из связки, а расщепляется, давая новые режущие выступы. По мере постепенного расщепления и изнашивания целого зерна его режущая поверхность (предполагая примерно круглую форму зерна) увеличивается, количество режущих кромок увеличивается, и давление на одну кромку уменьшается. Если это давление уменьшается до такой степени, что получающееся усилие шлифования оказывается недостаточным для дальнейшего расщепления зерен и образования новых режущих выступов, то имеющиеся выступы начинают сглаживаться, и наступает затупление круга. Если нагрузка или другие условия шлифования таковы, что зерно в любом сечении будет изнашиваться с непрерывным образованием новых режущих выступов, мы получили работу круга с самозатачиванием.

Такая точка зрения на самозатачивание согласуется с исследованием величины износа круга.

4. ИЗНОС ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Доктор технологии Рагнар Воксен (Швеция) в 1931 г. провел серьезное исследование износа шлифовальных кругов при цилиндрическом шлифовании¹ в лаборатории фирмы Нортон. Приводимые им данные говорят о том, что величина износа круга за один оборот ничтожна по сравнению с размерами зерна, т. е. при шлифовании не может быть вырывания целых зерен из круга, а имеет место только постепенное и очень незначительное дробление зерна и выкрашивание его чрезвычайно малых частичек.

Р. Воксен исследовал обдирочное шлифование холоднокатаной стали SAE 1020 (твердость по шкале В Роквелла 53—56) двумя кругами. Возьмем таблицы № 2 и 3 из труда Воксена, в которых он дает минимальный и максимальный износ круга при его опытах, и обработаем данные Воксена следующим образом (табл. 11).

Таким образом износ круга настолько ничтожен, что при производственном шлифовании не происходит вырывания целых зерен из круга, как это иногда трактуется в литературе.

При таком понимании характера изнашивания круга можно притти к абсурдным выводам, а именно — можно подобрать такие условия шлифования, при которых абразивные зерна будут сразу вырываться из круга, и круг будет необычайно быстро изнашиваться. Однако же в практике шлифования такого явления никогда никем не наблюдалось. Об этом свидетельствуют результаты опытов Бабчиничера в Краснознаменном Механико-Машиностроительном институте им. Баумана (КрМММИ), опытов автора и опытов ЦНИЛАШ.

В КрМММИ при наружном цилиндрическом шлифовании получали износ круга, выражавшийся только в несколько сотых долях миллиметра в течение довольно продолжительного времени. При этом ввиду незначительности износа и неровности поверхности круга практически очень трудно уловить износ при опытах.

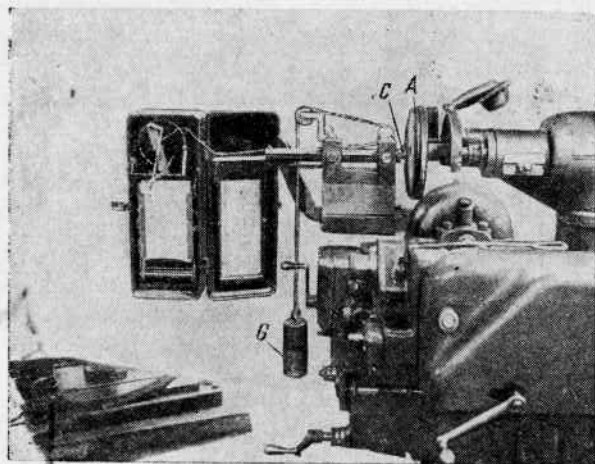
При опытах автора испытуемый стальной образец С (фиг. 9) действием постоянного груза G (менявшегося от 1,4 до 8,2 кг) прижимался

¹ R. Woxen, The wear of wheels in cylindrical grinding, «Handlingar», № 2, 124, Stockholm, 1933.

Таблица 11

Исследование величины	Значения величин при	
	минимальном износе	максимальном износе
Шлифовальный круг	3846-5	50-M5
Диаметр круга	28"	30"
Скорость круга, фут/мин	5860	7220
То же, м/сек	29,8	36,7
Продольная подача, равная $0,76B$, мм	58	58
Ширина круга B	3"	3"
Поперечная подача, мм/об	0,0127	0,019
Работающая поверхность круга $S\pi D_k$, мм ²	130000	139000
Количество сошлифованного металла M , дм ³ /мин	0,352	1,36
Отношение объема израсходованного материала круга к M	0,00503	0,077
Объем израсходованного материала круга, мм ³ /мин.	29,1	1725
Тот же объем за 1 оборот круга, мм ³ /об	0,0364	1,875
Глубина израсходованного материала круга за 1 оборот, мм	0,00000028	0,0000135
Диаметр зерна круга в среднем, мм	0,3	0,3
Количество оборотов круга до полного износа зерна	1000000	22000
Доля зерна круга, изнашиваемая за 1 оборот	0,0000001	0,0000455

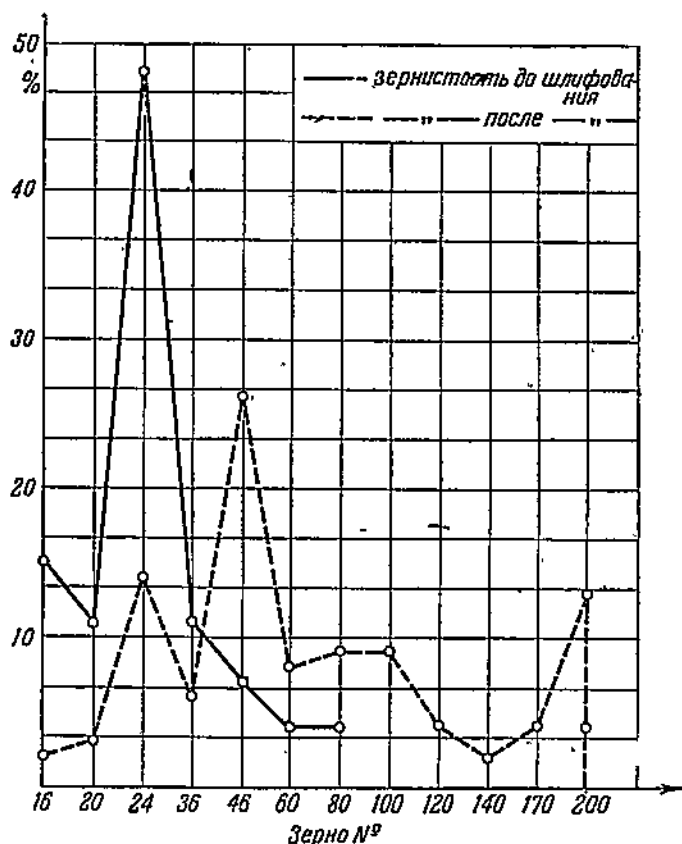
к вращающемуся шлифовальному кругу А. Окружная скорость круга изменялась от 5 до 32 м/сек (10 скоростей) путем изменения расстояния точки приложения образца от центра круга. Перед испытаниями



Фиг. 9.

круг правился алмазом. Во время работы в месте нажатия образца на поверхности круга образовывалась черная круговая полоса

(засаливание круга). На столе станка укреплялся индикатор, столу сообщалось движение параллельно поверхности круга. Но ни в одном случае не удалось индикатором уловить наличие канавки, которая на первый взгляд должна была образоваться при шлифовании.

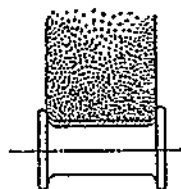


Фиг. 10.

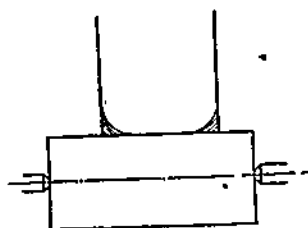
ЦНИЛАШ проделал такую работу. Перед шлифованием проверялся размер абразивных зерен шлифовального круга (зерна просеивались через набор сит и рассортировывались по размерам). Затем производилось шлифование на определенном режиме. При этом тщательно собирались отходы шлифования. Эти отходы высушивались, очищались магнитом от металлических частиц, просеивались и измерялись. Первое такое испытание, проведенное в 1937 г. при участии Механобра, показало, что при шлифовании из круга вырываются целые, нераздробленные зерна, смешанные с частицами связки. Но вторичное подобное испытание, проделанное более тщательно в 1938 г., показало, что первое испытание было выполнено неправильно. Результаты этого опыта изображены графически на фиг. 10. Здесь видно, что первоначально круг имел в основном зернистость 24 (48%), после

шлифования преобладающим оказалось зерно 46 (26%), все же остальные фракции стали значительно мельче. Повидимому и этот опыт не был проведен идеально. Практика шлифования в цеховых условиях говорит о том, что зерно постепенно откалывается ничтожными порциями.

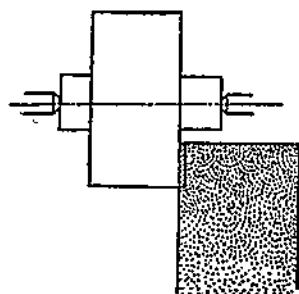
Автор исследовал характер износа шлифовального круга при помощи стробоскопа. Стробоскоп соединялся синхронно со шпинделем плоско-шлифовального станка, свет от неоновой лампы стробоскопа направлялся на поверхность шлифовального круга. Стробоскоп производил вспышку один раз в течение одного оборота шлифовального круга, так что круг казался остановившимся. Одно как бы остановившееся зерно круга наблюдалось при помощи бинокулярного микроскопа при увеличении 30. При таком наблюдении можно было видеть постепенное изменение одного режущего зерна, постепенное откалывание от зерна мелких фракций и образование новых режущих выступов.



Фиг. 11.



Фиг. 12.



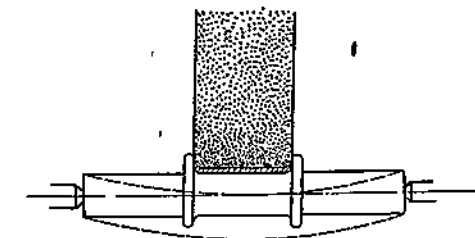
Фиг. 13.

Имеются различные методы шлифования деталей. На фиг. 11—15 изображено шесть видов наружного круглого шлифования. На фиг. 11 показан способ шлифования врезанием (без продольной подачи). При этом износ круга всегда меньше, чем при любом другом методе шлифования. Круг изнашивается равномерно по ширине, дает много искр и быстрее засаливается. Точно так же мало изнашивается и быстро засаливается круг и при торцовом шлифовании (фиг. 13). На фиг. 14 показано шлифование длинного валика (например, распределительные валики авиадвигателя). Круг сразу врезается на большую глубину. При этом шлифуемая поверхность сильно нагревается, механические качества металла в нагретом состоянии значительно понижаются, становится легче снимать дальнейшие слои металла. Ориентируясь на упругий прогиб шлифуемого валика, шлифовщик берет поперечную подачу большую, нежели действительная глубина резания, увеличивая тем самым радиальное давление и повышая производительность. Этот способ требует достаточной сноровки и применяется некоторыми стахановцами.

При обычном способе круглого наружного шлифования (фиг. 12) снимается тонкая стружка. Глубину резания в технической литературе не рекомендуется брать даже при обдирке более 0,05 мм, не говоря уже о чистовом шлифовании. Для увеличения производитель-

ности применяется максимальная возможная продольная подача. Припуск на шлифование снимается за несколько двойных проходов.

С развитием стахановского движения отдельные стахановцы начали практиковать глубинный способ, который значительно увеличивает производительность шлифования. Производительность при этом способе увеличивается как за счет уменьшения числа холостых проходов, так и за счет улучшения условий резания.

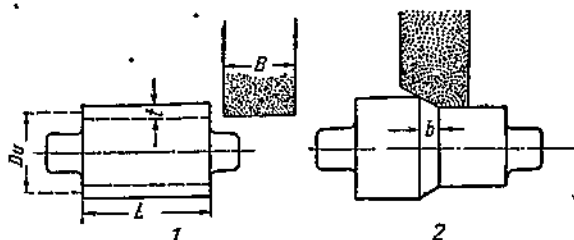


Фиг. 14.

Глубинный способ шлифования — такой способ, при котором весь припуск на шлифовку (от 0,1 до 0,3 мм на сторону при наружном круглом шлифовании) снимается за один проход. На фиг. 15 показано шлифование изделия, не имеющего буртиков.

Слева (1) изображен шлифовальный круг и изделие до начала обработки, справа (2) — в процессе резания. Шлифовальный круг работает одной стороной. На фиг. 16

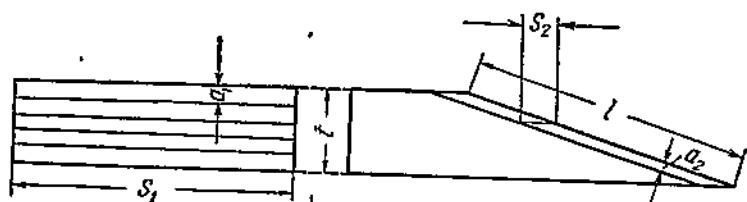
слева показаны постепенно удаляемые слои металла толщиной a_1 и длиной s_1 (продольная подача) на величину припуска t . Справа показан глубинный способ, которым при продольной подаче s_2 снимается стружка глубиной a_2 и длиной l . Из чертежа видно, что при глубинном способе мы можем при меньшей толщине стружки a_2 и меньшей продольной подаче s_2 снять то же сечение стружки (сечение вытягивается), что и при обычном способе шлифования.



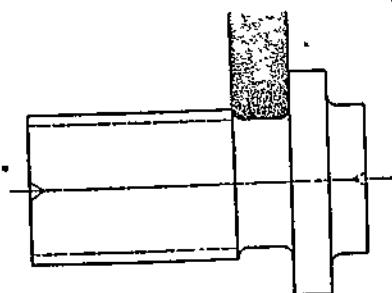
Фиг. 15.

Глубинный способ применяется при шлифовании изделий без буртиков (фиг. 15), с буртиками (фиг. 17) и при плоском шлифовании сегментами (фиг. 18). Ленинградский стахановец Строилов работал с большой производительностью такими сегментами. На шпинделе С имеется планшайба В с сегментами А, которые заправлены алмазом ступенчато или с наклоном.

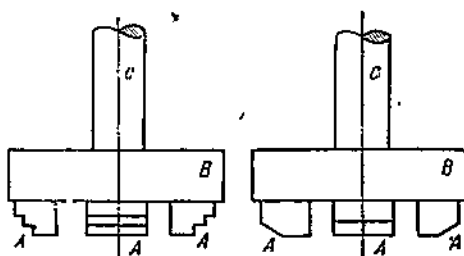
Шлифовальный круг при глубинном способе правится различно. На фиг. 19 показаны шлифовальные круги, заправленные различными способами и дан схематическое представление о характере износа кругов в процессе шлифования. При этом на фиг. 20 и 21 высота ступеней t_1 , t_2 и t_3 может варьировать; наиболее выгодно последнюю, зачищающую, ступень делать меньшей высоты. На фиг. 22 при правке у круга скошен край под углом 2° , что является естественным след-



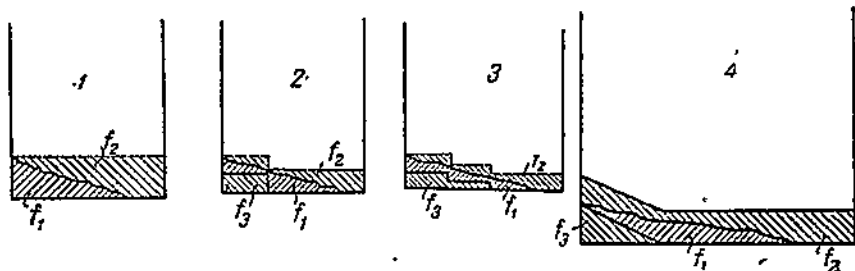
Фиг. 16.



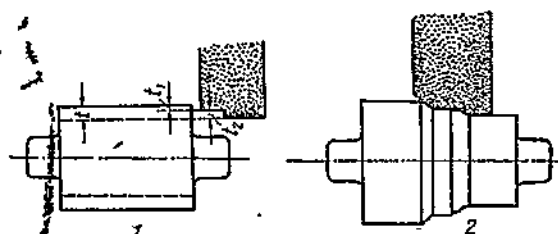
Фиг. 17.



Фиг. 18.

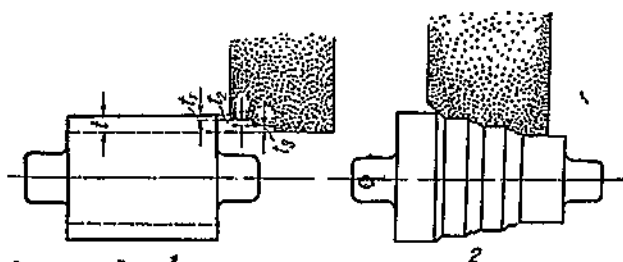


Фиг. 19.



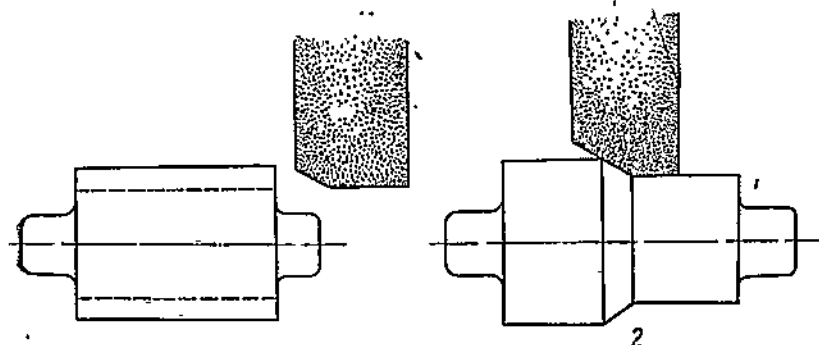
Фиг. 20.

ствием и завершением ступенчатой правки (мы имеем бесконечно большое количество ступеней). В процессе шлифования круг сам постепенно принимает скошенную форму, и такая правка облегчает для круга получение скошенной формы профиля.



Фиг. 21.

При шлифовании до сих пор не разработан вопрос о степени затупления шлифовального круга, не установлен критерий, по которому можно судить о необходимости правки круга.

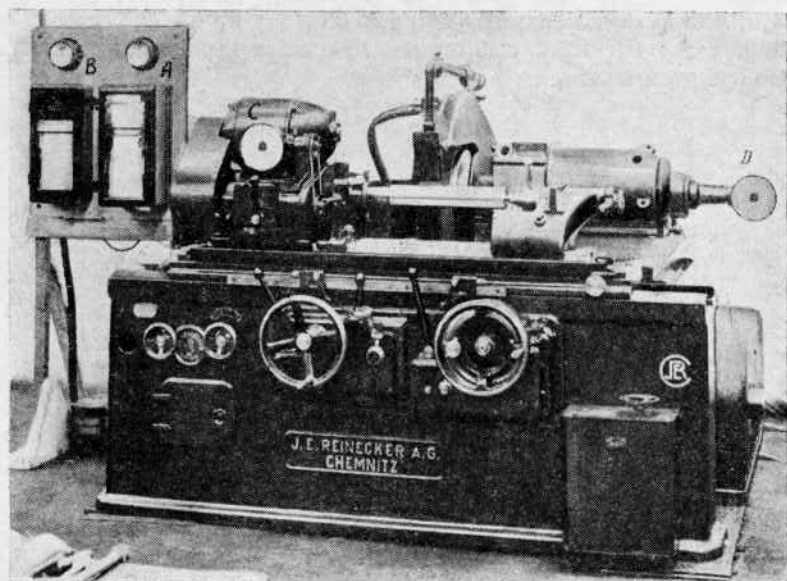


Фиг. 22.

При глубинном способе критерий затупления круга устанавливается очень просто и легко. На режущей поверхности шлифовального круга отчетливо видна линия, разграничивающая осыпавшуюся часть круга от еще не изношенной. То же самое хорошо видно по состоянию поверхности обрабатываемого изделия. На изделии (фиг. 15) отчетливо видна темная полоска шириной b , которая в процессе резания бежит вдоль изделия, постепенно расширяясь по мере затупления круга. Эта полоска представляет собой прижогенный слой металла изделия, находящегося в соприкосновении со шлифовальным кругом. Если остановить изделие, не окончив прохода, то на месте полоски b окажется очень грубая поверхность с крупными рисками, соответствующая грубой поверхности изношенной части круга.

При шлифовании сталей с большим содержанием углерода эта полоска имеет ясно выраженный коричневый цвет, при шлифовании малоуглеродистой стали ЭУ2 она плохо заметна.

Экспериментальное исследование глубинного способа производилось на кругло-шлифовальном станке Рейнекер с гидравлической подачей, имеющем моторы постоянного тока: для шлифовального круга 11,5 л. с. и для изделия 1 л. с. Станок снабжен самопишущим ваттметром А (фиг. 23), тахометрами С и D и самопишущим прибором, дающим величину продольной подачи. Применялся алундовый шлифовальный круг на керамической связке СМ₁-46. Охлаждение производилось содовой водой.



Фиг. 23.

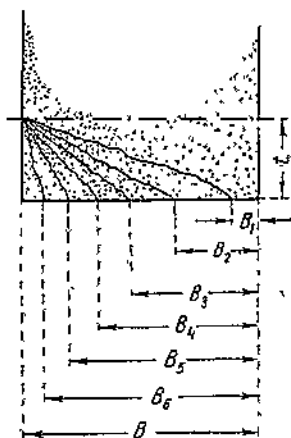
Алмаз при правке также охлаждается содовой водой в целях сохранения алмаза (хотя при правке с охлаждением качество шлифуемой поверхности хуже).

Шлифовальный круг в процессе резания постепенно изнашивается как изображено на фиг. 19, где дан характер износа перед новой правкой круга для четырех способов правки круга алмазом. Здесь через f_1 обозначена часть круга, осыпавшаяся в процессе резания, часть f_2 удаляется в процессе последующей правки, часть f_3 удаляется во время предыдущей правки.

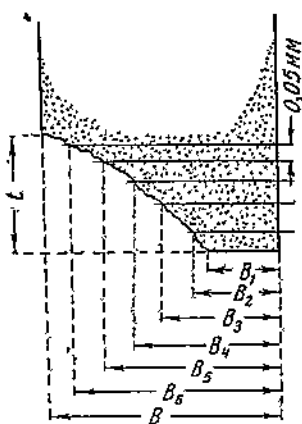
Износ шлифовального круга можно определять двояким способом: при помощи индикатора измерять непосредственно на шлифовальном круге уменьшение его диаметра, или пользоваться делительным диском механизма поперечной подачи станка. Опытю установлено что второй способ дает более надежные результаты. При описываемых экспериментах был использован способ поперечной подачи. Измерение износа круга производилось перед его новой правкой, т. е. после полного затупления круга, когда неизношенной оставалась

полоска B_1 (фиг. 24) шириной около 5 мм. Полоска B_1 , ширина которой меняется в процессе резания, совершенно не осыпается. Это можно видеть из того, что 10—15 изделий, прошлифованные одно за другим при одной правке круга, не меняют своего размера по диаметру.

При измерении износа алмаз подводится к вращающемуся кругу (фиг. 25) и передвигается вдоль неизношенной части B_1 , легко соприкасаясь с ней. Это дает возможность измерить ширину полоски B_1 при помощи штангеля. Затем алмаз подается на круг на 0,05 мм и через каждые 0,05 мм измеряется ширина полосок B_1, B_2, B_3 до тех пор, пока алмаз не будет захватывать всю ширину круга B . По полученным размерам B_1, B_2, B_3 в выбранном масштабе вычерчивается профиль кривой износа круга.



Фиг. 24.



Фиг. 25.

На фиг. 26 построены кривые износа круга после 13 проходов по изделию длиной 100 мм при работе на вышеприведенном режиме. Кривые даны для скоростей круга 20, 26 и 31 м/сек. При диаметре круга 467 мм и при масштабе по оси ординат: 1 см диаграммы = 0,05 мм круга, получим масштаб площади диаграммы: 1 мм² диаграммы = 1,433 мм³ объема шлифовального круга.

Определив вес снятой при шлифовании стружки для каждого случая и разделив объем осыпавшегося материала круга на вес стружки, получим удельный износ круга (табл. 12).

На фиг. 27 показано изменение удельного износа круга с изменением скорости круга. С увеличением скорости круга удельный износ уменьшается.

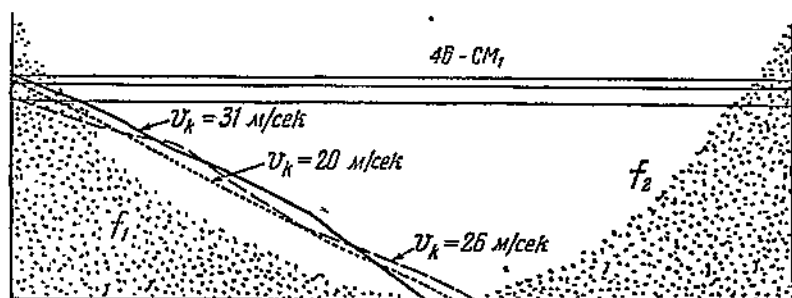
Рассмотрим зависимость удельного износа круга (в 1 мм³ материала круга на 1 г сошлифованного металла) от условий шлифования.

На фиг. 28 дана зависимость удельного износа круга от скорости продольной подачи при глубинном способе шлифования. Продольная подача более резко, нежели другие элементы режима, отражается на износе круга и мощности, затрачиваемой на процесс резания. С увеличением скорости продольной подачи удельный износ круга

Таблица 12

Скорость круга, м/сек	20	26	31
Объем изношенного круга, мм ³ . .	2820	2760	2370
Объем снятой стружки, мм ³	3740	4600	5620
Вес снятой стружки, г	29,2	35,8	43,8
Удельный износ круга (отношение объема круга к объему металла) :	0,753	0,597	0,422
Удельный износ круга M (отношение объема круга к весу металла)	96,5	77	54

возрастает. Чем больше скорость продольной подачи, тем больше усилие продольной подачи и тем больше изнашивается круг.



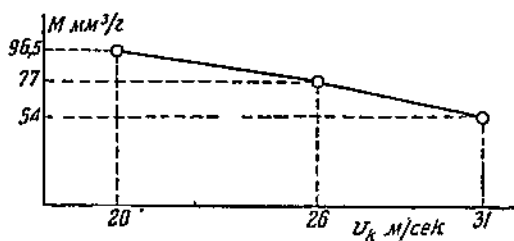
Фиг. 26.

На фиг. 29 показана зависимость удельного износа M от скорости изделия v_n . При увеличении скорости изделия износ круга увеличивается, так как при большей v_n каждое режущее зерно большее количество раз ударится об обрабатываемое изделие, а поэтому скорее разрушится.

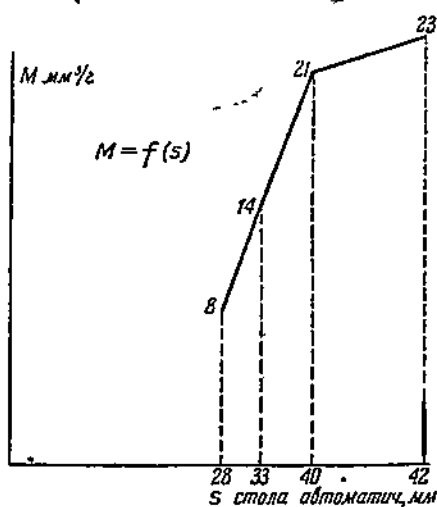
При увеличении глубины резания t (толщины снимаемой стружки) износ круга увеличивается, так как режущая поверхность круга (зерно и связка) работает с большим напряжением (фиг. 30).

При увеличении скорости продольной подачи алмаза s_d во время правки поверхность заправленного круга получается более шероховатой, зерна получают лучшие условия для выламывания. Поэтому при увеличении скорости подачи алмаза s_d увеличивается удельный износ круга (фиг. 31).

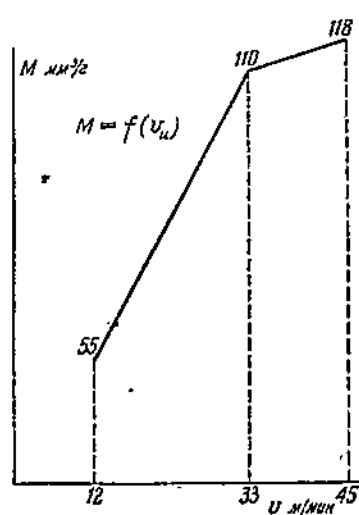
Автоматическая продольная подача более плавна, чем ручная. Ручная подача при глубинном способе осуществляется путем периоди-



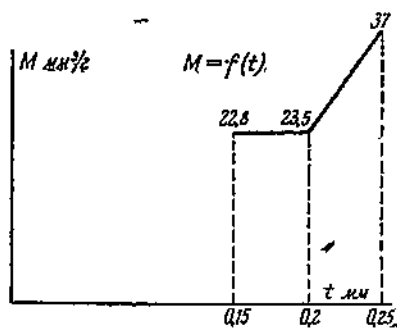
Фиг. 27.



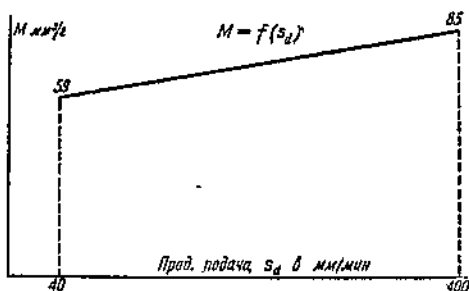
Фиг. 28.



Фиг. 29.

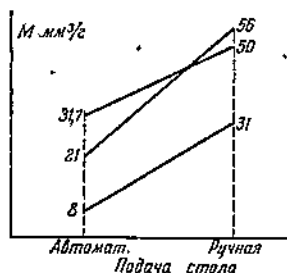


Фиг. 30.

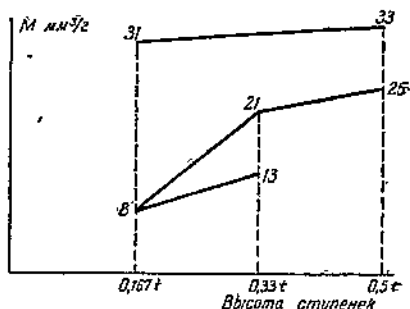


Фиг. 31.

ческих толчков, производимых маховиком поперечной подачи. На фиг. 32 видно, что при автоматической продольной подаче удельный износ круга меньше, нежели при ручной подаче.

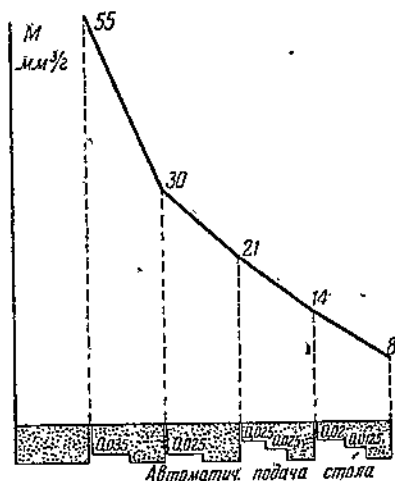


Фиг. 32.

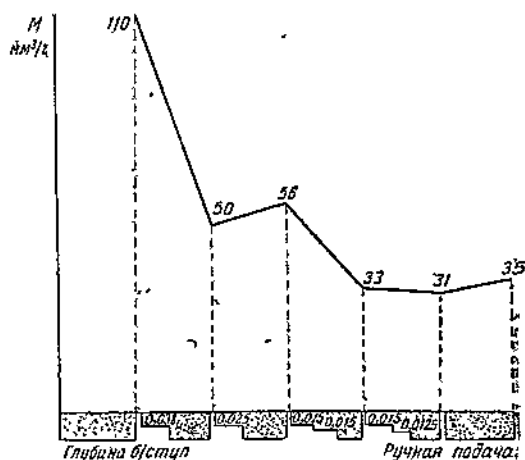


Фиг. 33.

При шлифовании большое значение имеет высота ступенек, которые создаются на круге при ступенчатой правке. При описываемых экспериментах высота ступенек изменялась от 0,07 до 0,5 толщин



Фиг. 34.



Фиг. 35.

снимаемой стружки t . На фиг. 33 видно, что с увеличением высоты ступенек удельный износ растет. Это объясняется следующим образом. Минимальный износ будет тогда, когда отсутствуют выступающие острые углы ступеней, т. е. когда вместо ступеней будем иметь прямую линию, по которой скошен профиль круга. Пока круг сам создает в процессе работы вместо ступеней прямую линию, острые выступающие углы будут быстро разрушаться. Чем выше ступенька, тем легче она разрушается.

На фиг. 34 и 35 сравнивается износ круга при различных способах правки круга при ручной и автоматической продольной подаче стола.

Из этих диаграмм видно, что с увеличением количества ступеней при глубинном шлифовании удельный износ круга уменьшается. Это объясняется тем, что для одной и той же глубины стружки при большем количестве ступеней размеры выступающих острых частей и углов меньше, чем при малом количестве ступеней.

На этих же диаграммах дано сравнение износа круга при глубинном способе с износом при обычном способе шлифования с малой глубиной резания ($t = 0,025$).

Независимо от прочих условий износ больше при малом диаметре круга и при внутреннем шлифовании и меньше при большем диаметре и наружном шлифовании.

Основной износ круга происходит за счет правки круга алмазом, но не за счет срабатывания во время процесса шлифования. Нужно взять исключительно мягкие круги и чрезвычайно высокое радиальное давление (какое никогда не применяется в практике шлифования), чтобы получить заметный износ круга. В опытах автора с алундовыми кругами на керамической связке твердости M_3 даже при радиальном давлении 12 кг/см^2 нельзя было заметить по индикатору самоизноса круга.

5. ТВЕРДОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

«Странное положение занимает в современной науке понятие о твердости», — говорит проф. В. Д. Кузнецов¹.

Мы не имеем точной формулировки понятия твердости. В слово «твердость» мы вкладываем самые разнообразные физические свойства. Твердость не является определенным свойством материала, а является только результатом некоторых операций с материалом, произведенных с определенными приборами. Твердость, измеряемая различными методами и на различных приборах, имеет различную размерность.

Для испытания шлифовальных кругов сконструировано много приборов. И тут наблюдается явление, характерное при технических испытаниях твердости любых материалов: наряду с цифрами, характеризующими твердость, непременно приходится указывать название прибора (например, по градометру, по Макензену и т. д.). Числа твердости, полученные для какого-либо шлифовального круга по одному методу, несравнимы с числами, полученными по другому методу, так как разные методы могут иметь дело с различными физическими величинами.

Твердость обычно определяется, как противодействие или сопротивление, которое оказывает данное вещество проникновению в него более прочного вещества. Комиссия по технической терминологии добавляет, что это прочное вещество не должно получать остаточных деформаций.

П. А. Ребиндер² определяет твердость, как работу, требующуюся для образования единицы новой поверхности твердого тела (при постоянстве остальных факторов), или усилие, численно пропорцио-

¹ А. Д. Кузнецов, «Физика твердого тела», 1937, Томск.

² Техническая энциклопедия, ст. «Твердость», т. XXII.

нальное этой работе. Если бы указанная работа была произведена обратимо (и изотермически), то твердость количественно определялась бы свободной поверхностной энергией или поверхностным натяжением твердого тела. Определяемую таким образом твердость Ребиндер называет склерометрической твердостью (хотя это название неуместно):

$$H = \frac{dA}{ds} = k \cdot \frac{dF}{ds} = k \cdot \sigma,$$

где H — твердость, или работа поверхностного диспергирования (измельчения) на единицу площади вновь образуемой поверхности раздела;

dA — работа диспергирования;

ds — увеличение поверхности;

$\frac{dF}{ds}$ — удельная свободная поверхностная энергия на границе твердое тело — среда;

$k \geq 1$ — коэффициент необратимости процесса диспергирования — величина, обратная его коэффициенту полезного действия.

Теоретически и экспериментально для хрупких тел доказано, что отношение работ, необходимых для сошлифовывания одного и того же объема, равно отношению поверхностных энергий. Для хрупких кристаллов единственно возможным критерием твердости нужно считать поверхностную энергию (для хрупких тел предел прочности ниже предела упругости).

Для шлифовального круга возможно уничтожить понятие «твердость», заменив его определенными физическими величинами: прочностью и поверхностной энергией.

Проф. Вейнберг говорит, что шкалу твердости можно рассматривать, как шкалу поверхностных натяжений твердых тел. Если мы проводим алмазом по стеклу, то острый алмаз зацепляется за неровности стекла и в этом месте поверхностный слой стекла тянет поверхностный слой алмаза назад, а поверхностный слой алмаза тянет поверхностный слой стекла вперед. Если натяжение поверхностного слоя у алмаза больше, чем у стекла, то ввиду того, что у стекла и алмаза поверхностные слои прочно скреплены с внутренними, поверхностный слой алмаза должен разорвать поверхностный слой стекла, на котором, и остается царапина.

Таким образом, понятие твердости может быть заменено понятием поверхностной энергии.

Однако, до сих пор еще для абразивов не установлена величина удельной поверхностной энергии, без чего нельзя определить и общую поверхностную энергию шлифовального круга. До настоящего времени не имеется метода испытания ни шлифовальных кругов, ни абразивных крупок, не имеется возможности на основании воздействия на круг или крупку в обычных условиях их работы непосредственно судить о механических качествах.

Вопрос определения твердости шлифовального круга осложняется несовершенными технологическими условиями образования круга —

трудностью соблюдения констант при формовке, обжиге и прессовании и вытекающей отсюда неравномерностью механических качеств на различных участках круга (боковых поверхностях круга, периферии, в отдельных точках).

Широко распространено представление о твердости шлифовального круга, как о пределе сопротивления резанию, или величине прилагаемого к инструменту предельного усилия, при котором наступает нарушение сцепления абразивных зерен с цементирующим веществом (связкой).

Однако наиболее распространенные приборы для определения твердости шлифовальных кругов работают не по этому принципу. Следуя такому определению твердости круга, при практическом определении твердости нужно было бы иметь такой прибор, который, захватив каким-то образом зерно и не деформируя его, вытащил бы зерно из связки и при этом измерил бы приложенное для этого усилие, или другую величину, являющуюся функцией усилия.

В действительности ни один прибор для определения твердости шлифовальных кругов так не работает. На каждом приборе наряду с аморфной связкой подвергается удару и хрупкое кристаллическое зерно. Отходы при работе по определению твердости кругов всегда содержат раздробленные при испытании абразивные зерна. Таким образом работа, затрачиваемая при испытании кругов, расходуется на измельчение абразивного зерна и связки. На этом принципе построены все существующие приборы для испытания твердости кругов, начиная от обыкновенной отвертки и кончая наиболее механизированными аппаратами.

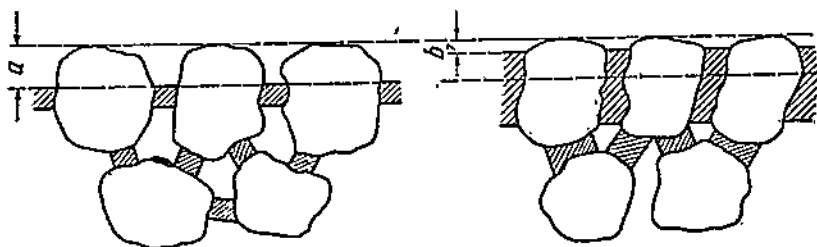
Если при испытании круга нужно рассматривать воздействие частей прибора на круг, как на неразделимую комбинацию зерна и связки (что гораздо сложнее), то возникает вопрос: почему в более мягких по показаниям приборов кругах (с меньшим содержанием связки) при одинаковом усилии удаляется большее количество материала круга?

Автор объясняет это следующим образом.

На фиг. 36 схематически изображена слева структура мягкого круга (с малым содержанием связки), а справа твердого круга. В мягком круге зерно выступает над поверхностью круга на величину a , в твердом — на величину b .

При шлифовании и при испытании круга на приборах тангенциальное усилие при мягком круге расщепляет зерно, действуя на плечо a , которое больше плеча b твердого круга. Мостики связки служат опорами, когда скалываются наружные кромки зерен. Когда зерна раздробляются на величину a для мягкого круга и на величину b для твердого круга, начинается одновременное дробление зерен и измельчение связки. У мягкого круга аморфная связка легче нежели у твердого, высыпается в виде пыли, измельчаемая деформирующимися под влиянием приложенных сил зернами. После изнашивания заточенного твердого круга на глубину b образуется почти сплошная поверхность, на которой связка мешает дальнейшему дроблению зерен, отчего уменьшается износ круга и ухудшаются условия резания.

Если круг подвержен ударам, направленным перпендикулярно к его поверхности, то после раздробления зерен на величину a или b (до мостиков связки) дальнейшее расщепление зерен затрудняется тем больше, чем больше круг имеет связки. Внешнее воздействие встречает у твердого круга вместо отдельно выступающих абразивных зерен сплошную поверхность с малым количеством пор. Эта поверхность состоит из притупленных зерен и большого количества связки, которая прочно цементирует зерна и создает монолитное тело, хорошо сопротивляющееся проникновению в него других тел.



Фиг. 36.

Таким образом, при любом способе приложения нагрузки мягкий круг изнашивается больше, нежели твердый.

6. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Наиболее старым способом определения твердости шлифовального круга является проба его вручную отверткой. Несмотря на свою примитивность, способ этот однако до сих пор применяется в своем первоначальном виде на лучших абразивных заводах СССР и за границей. К. Круг¹ пытался механизировать отвертку для испытания кругов, придав ей внутренний пружинный механизм и циферблат, но такая отвертка не получила большого распространения. Усложненные приборы для определения твердости круга пока применяются только при лабораторных работах.

Насколько можно верить опыту работника, определяющего твердость круга при помощи отвертки, показывает следующий опыт. На абразивном заводе им. Ильича (Ленинград) три квалифицированных браковщика при помощи отвертки определяли твердость кругов. Для одних и тех же кругов они дали заключения с такими отклонениями:

$M_1 - CM_1$

$CM_1 - BM_2$

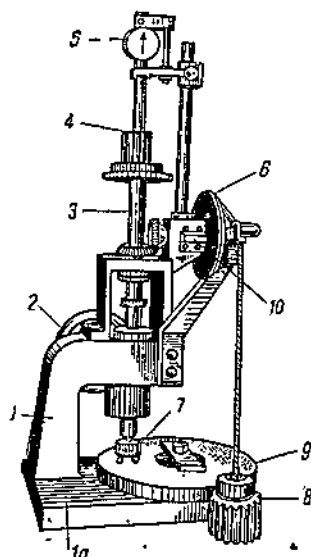
$CT_2 - CM_2$

$T_1 - CT_1$

¹ VDI, 6 August 1927, № 32, s. 1109.

$T_2 - C_2$ $T_2 - BT_2$

При зернистости кругов 20 и 36 и твердостях в области М и в области Т погрешность при испытании отверткой может возрасти до 4—5 степеней твердости (по ОСТ).



Фиг. 37.

В соответствии со сложностью и неясностью определения твердости шлифовального круга имеется много приборов для измерения твердости, работа которых основана на совершенно различных принципах. Наиболее распространенными приборами являются: американский прибор Градометр (Grade-o-meter), немецкий прибор Цейсса, работающий по принципу Маккензена, и прибор Линднера, выцарапывающий неподвижным алмазом канавку на периферии вращающегося круга. На Московском заводе им. Фрунзе внедрен в производство прибор, сконструированный инж. Прокофьевым. В 1933 г. Сэкигути и Хасягава предложили свой прибор.

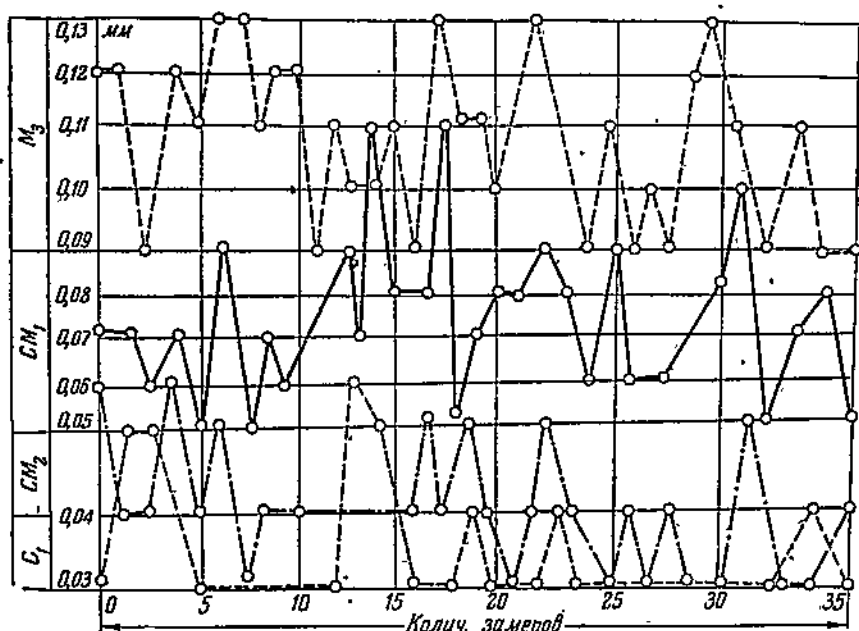
Проанализируем работу наиболее употребительных приборов.

На фиг. 37 изображен прибор Прокофьева. На станине 1 установлен шпindelъ 3, имеющий вращательное и поступательное движение. Верхний конец шпинделя каса-

ется ножки неподвижно укрепленного индикатора 5. На нижнем конце шпинделя укреплен коронка 7 с двумя вставными алмазами, расположенными на одинаковом расстоянии от оси шпинделя. Испытуемый круг 9 кладется на плиту станины 1а и прижимается болтом. Шпindelъ с алмазом при помощи маховичка 2 опускается на круг, и алмазы под действием веса шпинделя и дополнительного груза 4 внедряются в круг. Через блок 6 перекинут ремень, на конце которого висит груз 8. При освобождении стопора 10 груз падает и через посредство пары конических шестерен вращает шпindelъ. Алмазы процарапывают на шлифовальном круге окружность диаметром, равным расстоянию между алмазами. Длина ремня такова, что позволяет алмазам сделать один оборот вокруг центра шпинделя.

При испытании твердости шлифовального круга на данном приборе вначале алмазы делают подготовительный проход, после которого отмечается показание стрелки индикатора. Затем груз снова поднимается и падает, причем алмазы процарапывают круговую канавку, по глубине которой судят о твердости шлифовального круга. В конце рабочего прохода делается второй отсчет по индикатору. Разница между вторым и первым отсчетами представляет собою глубину канавки в сотых долях миллиметра. Чем мягче круг, тем больше глубина внедрения алмазов. Для испытания каждого круга производится

5—6 подобных проходов в различных местах круга и выводится средний отсчет.



Фиг. 38.

Глубина канавки (по показанию стрелки индикатора) зависит от величины груза 4 и веса шпинделя. Чем больше их общий вес, тем глубже будут проникать алмазы. В пределах твердостей кругов, применяющихся обычно на машиностроительных заводах, наиболее удобным оказался вес груза 4 (фиг. 37) в 2 кг. Вес груза 4 вместе со шпинделем составляет 7,76 кг. Вес груза 8 выбран в 1,9 кг. Алмазы берутся размерами 0,75—1,5 карата и меняются по мере износа.

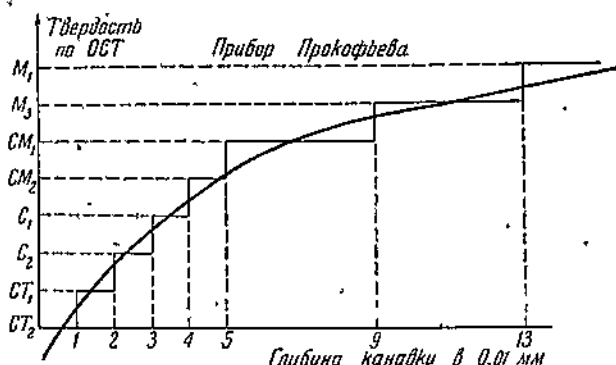
Прибор был протарирован на кругах фирмы Нортон и завода им. Ильича, имеющих различную зернистость и различный сорт шлифующего вещества (электрокорунд, алунд 38, алунд 19, карборунд, электрокарборунд). На фиг. 38 представлены тарировочные диаграммы, где по оси ординат отложена глубина канавки в сотых долях миллиметра, по оси абсцисс — номера замеров твердости на приборе Прокофьева. Диаграмма дает показания для четырех твердостей по 35 замерам для каждой твердости.

На фиг. 39 дана шкала твердости для прибора Прокофьева. В области высоких твердостей кривая на фиг. 39 более крутая, чем кривая для мягких кругов.

Автор произвел исследование работы прибора Прокофьева, градометра и прибора Макензена. Рассмотрим работу прибора Прокофьева.

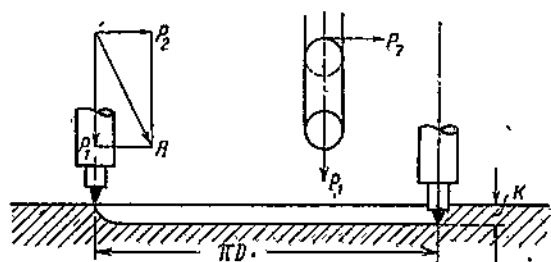
Во время работы прибора вес шпинделя вместе с сидящим на шпинделе грузом (сила $P_1 = 7,76$ кг) давит на алмазы, которые углубляются в шлифовальный круг на величину K (фиг. 40). Окружное усилие $P_2 =$

$\approx 1,9$ кг образует канавку глубиной K и длиной πD , где $D = 27,5$ мм (расстояние между алмазами). На фиг. 41 видно, что каждый алмаз при движении прочерчивает полную окружность. Алмаз A чертит окружность ABC , алмаз D — окружность DEK (пути алмазов утрированно изображены отдельно и заштрихованы для удобства объяснения кинематики процесса испытания на приборе). Следовательно, когда каждый алмаз сделает полный оборот, канавка будет подвергнута двукратному проходу алмаза.



Фиг. 39.

Дробящие крошки алмаза имеют различную форму, которая меняется по мере износа алмаза. Были обмерены коронки обоих алмазов прибора. Алмазы имели среднюю степень износа. Величины углов были 63° и 94° . В дальнейшем для расчетов угол при вершине алмаза принимается в 80° .



Фиг. 40.

Подсчитаем удельное давление, производимое силами P_1 и P_2 .

На фиг. 42 изображен алмаз в виде четырехгранной пирамиды с

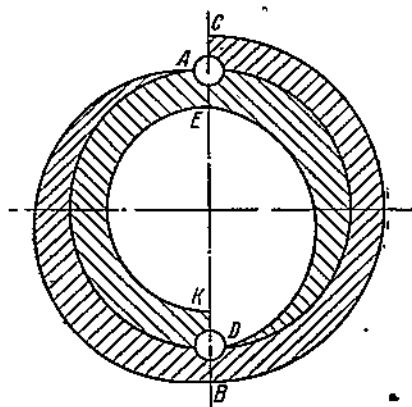
квадратными основаниями с углом при вершине 80° и расстоянием $M = 1,5$ мм. Канавку в испытуемом круге образует трапецидальная часть F боковой грани алмаза. Найдем величину этой поверхности F , как функцию от глубины канавки K .

$$N = M + 2K \operatorname{tg} 40^\circ = 1,5 + 1,68K;$$

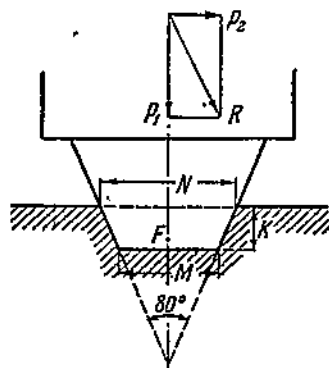
$$F = \frac{N+M}{2} K = \frac{1,5 + 1,68K + 1,5}{2} \cdot K = 0,84K^2 + 1,5K.$$

Глубина канавки K получается для соответствующих твердостей от 0,01 до 0,14 мм за четыре прохода алмаза по одной и той же канавке

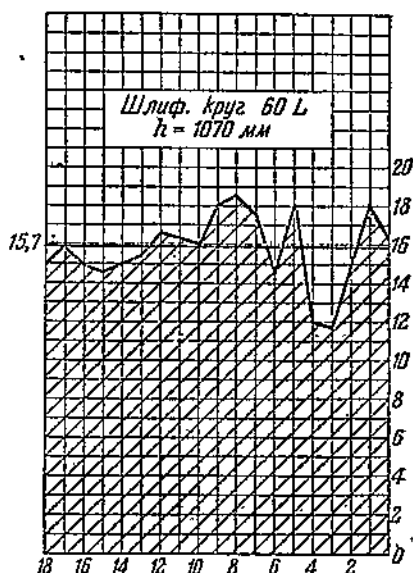
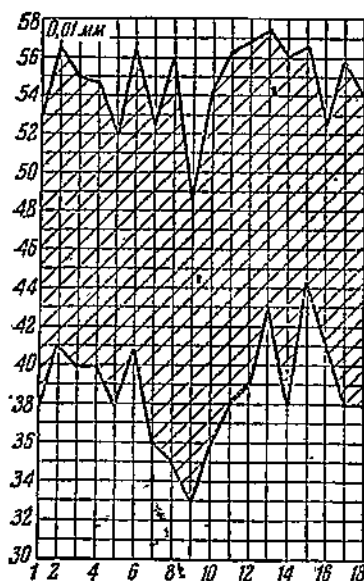
(на приборе производится один проход подготовительный, другой рабочий, за каждый проход алмазы дважды царапают дно и стенки канавки). Установим экспериментальным путем давление алмаза при первом проходе по канавке.



Фиг. 41.



Фиг. 42.

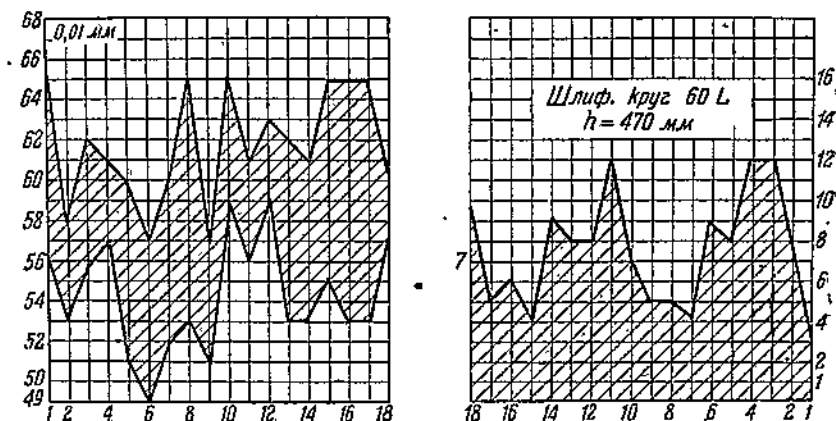


Фиг. 43.

Измерим при помощи индикатора 5 (фиг. 37) глубину получаемой канавки по окружности через 20° , разбив окружность на 18 частей.

На фиг. 43—46 представлены диаграммы, полученные путем таких промеров. По оси абсцисс отложены 18 положений алмазов по ок-

ружности прочерчиваемой канавки, по оси ординат — глубина канавки в сотых долях миллиметра. На левой диаграмме каждой фигуры верхняя ломаная линия дает глубинный профиль поверхности круга до испытания на приборе, следующие ниже ломаные линии получены после последовательных проходов алмазов (при этих испытаниях предварительный проход не заменялся). Длина пути на фиг. 44 и 46 была 470 мм (алмаз проходил по канавке 2 раза) и на фиг. 43 и 45 1070 мм (алмаз проходил по канавке 4,5 раза).



Фиг. 44.

Круги испытывались алундовые на керамической связке — фирмы Нортон 60 L (СМ₂) и завода им. Ильича 36 М₃. На диаграммах правой части каждой фигуры глубина полученной за время испытания канавки откладывается по оси ординат, начинаясь от оси абсцисс, а не от первоначального профиля поверхности круга перед испытанием.

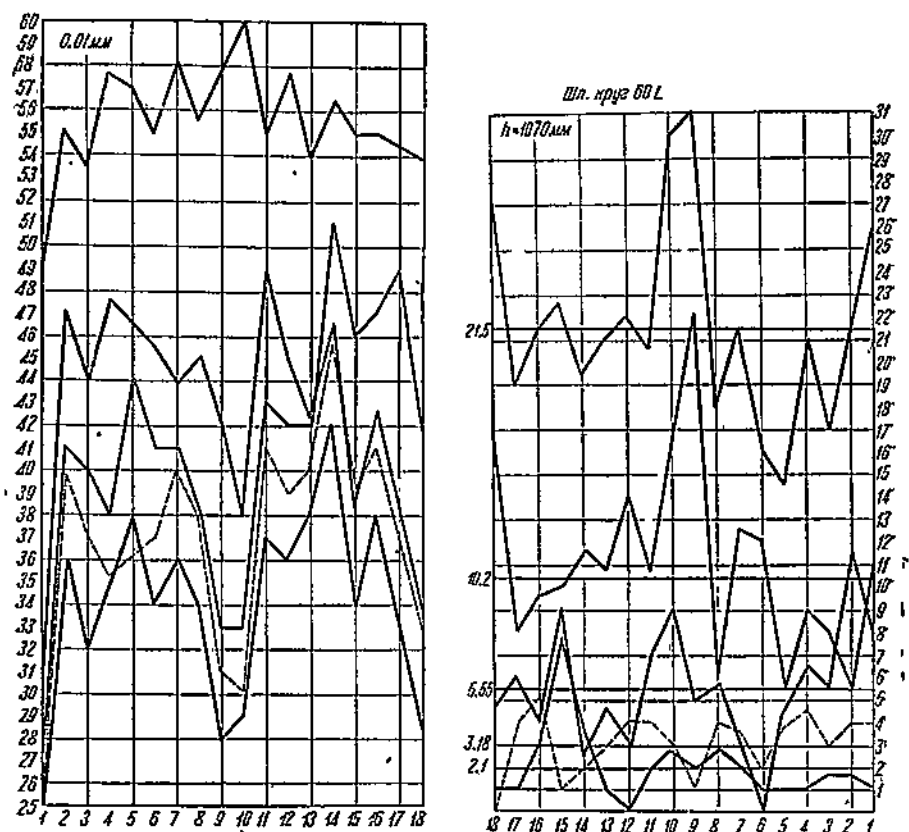
На фиг. 45 на одном и том же месте круга канавка прорезалась 4 раза подряд, постепенно углубляясь; длина пути 1070 мм, круг 60 L.

На фиг. 46 канавка прорезалась 2 раза при длине пути 470 мм (круг 36 М₃). Каждый последовательный проход давал меньшую глубину канавки.

На фиг. 47 и 48 на основании данных фиг. 43—46 показан характер изменения глубины канавки в зависимости от числа проходов алмаза по одной и той же канавке. На оси абсцисс дано количество проходов алмазов. Римскими цифрами даны проходы с длиной канавки 470 мм, арабскими — 1070 мм. По оси ординат отложена глубина канавки в сотых долях миллиметра после прохода алмазов. Кривая NKL (фиг. 47) дает зависимость глубины канавки от числа проходов для круга 36 М₃, кривая AEF — для круга 60 L. Эти кривые дают значения общей глубины канавки, постепенно увеличивающейся после каждого прохода. Кривые AB и CD дают значения последовательного увеличения глубины канавки за каждый проход алмазов.

По мере углубления в круг алмаза трапецидальной формы его поверхность соприкосновения с разрушаемым кругом увеличивается,

удельное нормальное давление уменьшается, глубина канавки растет замедленно и кривая (фиг. 47 и 48) становится более отлогой.



Фиг. 45.

По кривым АВ (фиг. 47) находим, что отношение глубины канавки после первого прохода к глубине канавки после второго прохода при длине пути груза 470 мм (условия опыта) выражается $\frac{12,5}{12,5+10,5} = 0,55$.

Следовательно, после первого прохода ее значение достигает только 0,0055 мм, при условии, что за два прохода она выразится в 0,01 мм. Подставляя соответствующие значения K в формулу для определения F , подсчитываем приблизительно k_s — удельное давление алмаза на поверхность F от горизонтальной силы в течение первого прохода алмазов по канавке, и k_n — удельное давление алмазов в вертикальном направлении при внедрении в круг по формулам:

$$k_s = \frac{P_2}{F} \cdot \eta_1 = \frac{9 \cdot 0,5}{F};$$

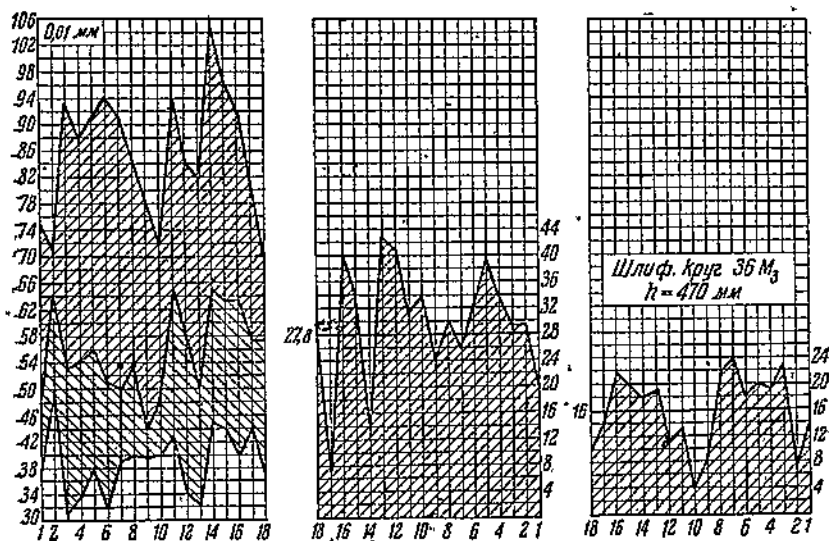
$$k_n = \frac{P_1 \cdot \eta_2}{1,5^2 + 3F \sin 40^\circ} = \frac{7,76 \cdot 0,8}{2,25 + 3F \sin 40^\circ};$$

где η_1 и η_2 — коэффициенты полезного действия передачи. Полученные результаты приведены в табл. 13.

Таблица 13

Твердость по ОСТ	K мм	F мм ²	k_s кг/мм ²	k_n кг/мм ²	k_s в % от прочности связки Нортон (100 кг/мм ²)
СТ ₁	0,0058	0,0087	109	2,7	109
С ₂	0,0116	0,0185	51	2,7	51
С ₁	0,0174	0,0286	33	2,7	33
СМ ₂	0,0232	0,0393	24	2,6	24
СМ ₁	0,0406	0,0703	13,5	2,55	13,5
М ₃	0,0638	0,1300	7	2,5	7
М ₂	0,078	0,1680	5,5	2,4	5,5

Прочность связки Нортон на сжатие около 100 кг/мм². Последняя графа таблицы показывает, что чем мягче шлифовальный круг, тем меньше горизонтальное усилие, необходимое для процарапывания канавки, по сравнению с усилием для процарапывания канавки на круге, сделанном из одной лишь связки (без зерна).



Фиг. 46.

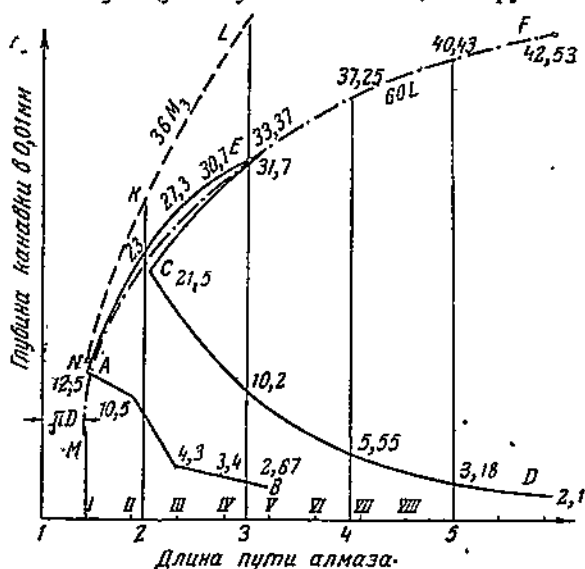
Помещенные в табл. 13 результаты выведены подсчетом полученных опытом средних значений (из двух крайних) для каждой твердости: значения k_s превосходят по величине значения нормальных давлений.

На фиг. 49 дана величина k_s в зависимости от твердости шлифовального круга.

На фиг. 50 нанесена кривая АС, подобная кривой, изображенной на фиг. 48. По оси ординат отложена глубина канавки в сотых долях

миллиметра, по оси абсцисс — количество последовательных проходов алмазов по одному и тому же месту (римские цифры показывают проходы при длине пути груза 1070 мм, арабские цифры — 470 мм). Если продолжим кривую СА до пересечения с осью ординат (фиг. 50), то получим точку В, соответствующую глубине канавки, которую может дать алмаз в начале хода.

Перейдем к исследованию работы американского прибора градометр. В этом приборе (фиг. 51) шток весом 510 г со сменной стальной пластинкой на нижнем конце делает 24 удара по испытываемому шлифовальному кругу, падая с высоты 10 мм и при каждом ударе поворачиваясь на 30°. Размер пластинки № 1 — 25,4 × 0,8 × 3,25 мм. Она ударяет в круг своей стороной с размерами 0,8 × 3,25 мм, образуя лунку цилиндрической формы. По глубине выбитой лунки судят о твердости круга. Цена деления при отсчетах по прибору 0,03 мм.



Фиг. 47.

Подсчитаем работу, которую совершает шток прибора за 24 удара.

Время падения штока при ударе

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,01}{9,81}} = 0,0452 \text{ сек.}$$

Скорость штока в момент удара

$$v = gt = 9,81 \cdot 0,0452 = 0,444 \text{ м/сек.}$$

Масса падающего штока

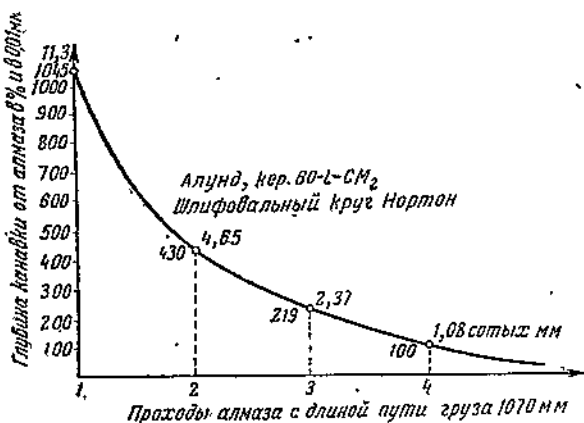
$$m = \frac{p}{g} = \frac{0,51}{9,81} = 0,052 \text{ кг сек}^2/\text{м.}$$

Работа за 24 удара, если считать приближенно, что живая сила падающего стержня целиком затрачивается на образование лунки выразится:

$$L = 24 \frac{mv^2}{2} = 24 \frac{0,052 \cdot 0,444^2}{2} = 0,123 \text{ кгм.}$$

Работа L расходуется как на образование лунки путем отламывания от круга частиц зерна и связки, так и на диспергирование зерна и связки.

Цифровые данные, полученные ЦНИЛАШ, изображены графически на фиг. 52 и дают зависимость глубины лунки от твердости и зернистости. Эталонном для проверки прибора служит свинец, на котором получается лунка глубиной 34 деления. На фиг. 52а кривые *a* дают ту же зависимость, а кривые *P* (слева) выражают вычисленную автором работу, совершенную прибором и отнесенную (в среднем) к 1 мм



Фиг. 48.

глубины лунки. Эта работа численно равна средней силе воздействия стержня на круг. Чем мягче круг, тем меньше сила *P*. Чем крупнее зерно круга, тем сила *P* также меньше. Это явление объясняется следующим образом. Если мы возьмем одинаковое по объему количество крупных и мелких зерен, то общая поверхность мелких зерен будет больше поверхности

крупных зерен. Удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) и тех и других зерен одинакова, так как мы взяли зерна из одного и того же абразива. Следовательно, общее количество поверхностной энергии у мелких зерен больше, нежели у крупных, и мелкозернистый круг сильнее сопротивляется раздроблению.

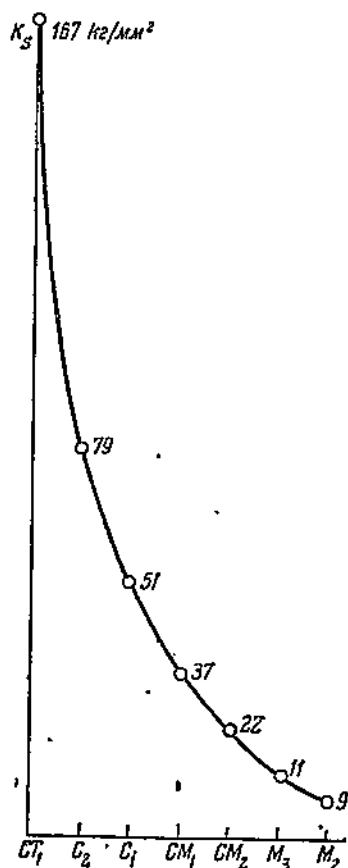
Количество связи в двух кругах одинаковой твердости, но различной зернистости, по объему одинаково. Но так как общая поверхность зерен крупнозернистого круга меньше, нежели мелкозернистого, то количество связи, приходящееся на единицу поверхности зерна, в крупнозернистом круге будет больше, нежели в мелкозернистом.

На фиг. 53 изображена схема структуры крупнозернистого шлифовального круга (слева) и мелкозернистого (справа). При раздроблении зерна во время испытания круга на градометре прилагаемое усилие действует на зерно крупнозернистого круга на плече *a*, на зерно мелкозернистого круга — на меньшем плече *b*. Следовательно, зерно крупнозернистого круга легче расколоть, нежели зерно мелкозернистого круга. Таким образом при испытании на градометре нужно учитывать действие двух величин — количества связи около зерна и длины плеча, на котором прилагается усилие, скалывающее зерно. Обе эти величины действуют в одном направлении, повышая прочность мелкозернистого круга, что и видно из диаграмм (фиг. 52 и 52а).

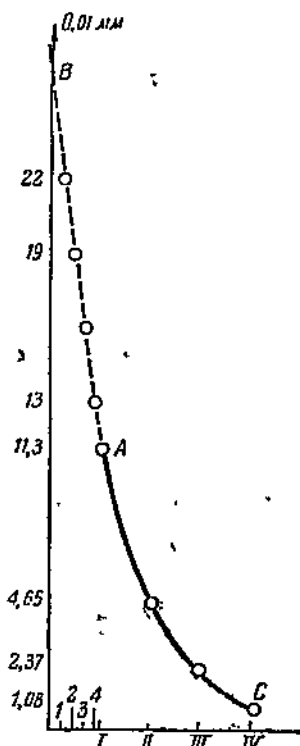
Исследуем работу прибора для испытания твердости круга фирмы Цейсс, работающего по принципу Макензена (фиг. 54).

В этом приборе воздух под давлением 1,5 ат увлекает песок, который, проходя через сопло, ударяет в испытуемый круг и выби-

вает лунку формы, изображенной на фиг. 55 (для кругов различных твердостей). Размеры сопла даны на фиг. 56. Для работы прибора употребляется кварцевый песок зернистостью 16—20.



Фиг. 49.



Фиг. 50.

Объем выдуваемого в продолжение 5,5 секунд песка равен 28 см³. Глубина лунки измеряется иглой, которая во время продувания песка поднимается. Размер A_1 изменяется от износа шайбы, опирающейся на испытуемый круг. Отработанный песок отводится по специальной трубке (фиг. 54).

Подсчитаем приближенно работу, совершаемую песком при выбивании лунки.

Падение давления, необходимое для того, чтобы сообщить песку рабочую скорость, выразится по формуле, применяемой Гипромашем для расчета транспортируемой по трубам формовочной земли:

$$p_n = \frac{G_n \cdot v_n^2}{2g \cdot F v_p},$$

где G_n — вес выдуваемого песка;

v_n — скорость песка в момент удара в испытуемый круг;

v_p — скорость воздуха;

F — сечение сопла;

g — ускорение силы тяжести.

Полагаем $v_n = 0,7 v_p$.

Сечение сопла (фиг. 56)

$$F = 0,006^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0,000028 \text{ м}^2.$$

$$p_n = 15000 \text{ кг/м}^2.$$

При диаметре зерна песка $d = 0,84 \text{ мм}$ (представляя зерно в виде шара) объем одного зерна будет $0,59 \text{ мм}^3$.

Число зерен в резервуаре (конусе прибора)

$$\frac{28}{0,00059} = 47500.$$

Вес одного зерна $0,00204 \text{ г}$ при удельном весе песка $\gamma = 0,0039 \text{ г/мм}^3$.

Вес всего выдуваемого песка

$$G_n = 0,00204 \cdot 47500 = 97 \text{ г} = 0,097 \text{ кг}.$$

Скорость песка в момент удара в круг

$$v_n = \frac{p_n \cdot g \cdot F \cdot 2}{G_n \cdot 0,7^2} = \frac{15000 \cdot 9,81 \cdot 0,000028 \cdot 2}{0,097 \cdot 0,7^2} = 22,2 \text{ м/сек}.$$

Работа, затрачиваемая на выбивание лунки, приближенно выражается (не учитывая затраты работы на изменение зерна круга, связи и песка):

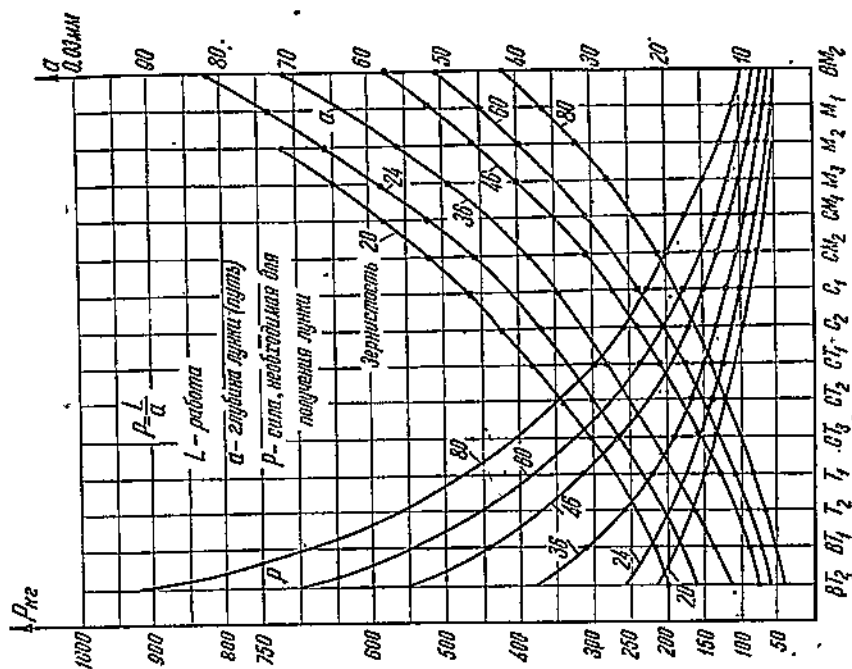
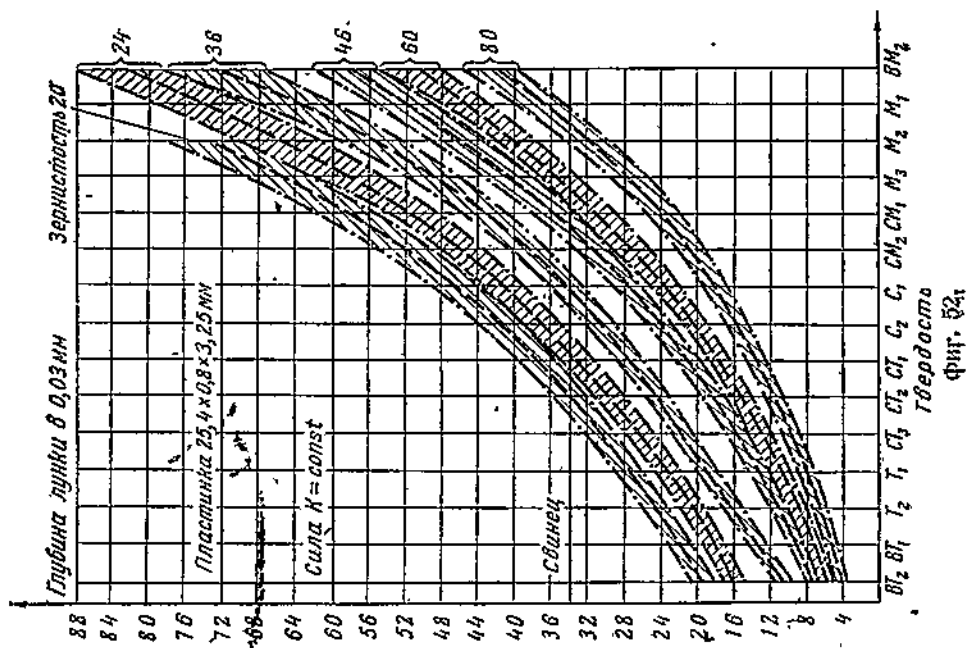
$$L = \frac{\pi v_n^2}{2} \cdot \frac{0,097 \cdot 22,2^2}{9,81 \cdot 2} = 2,43 \text{ кгм}.$$

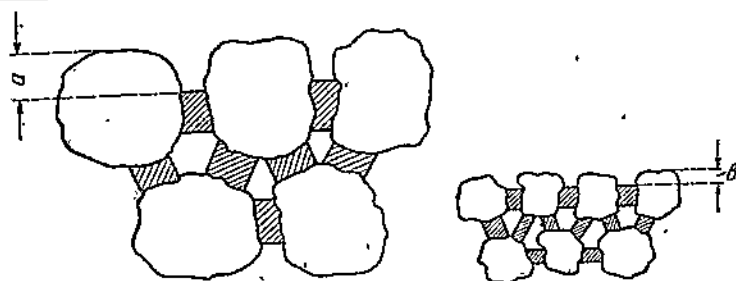
Принимаем для простоты полужайцевидную форму выбиваемой лунки (фиг. 55) за цилиндр диаметром 6 мм . Сечение лунки

$$q = \frac{\pi 6^2}{4} = 28,2 \text{ мм}^2.$$

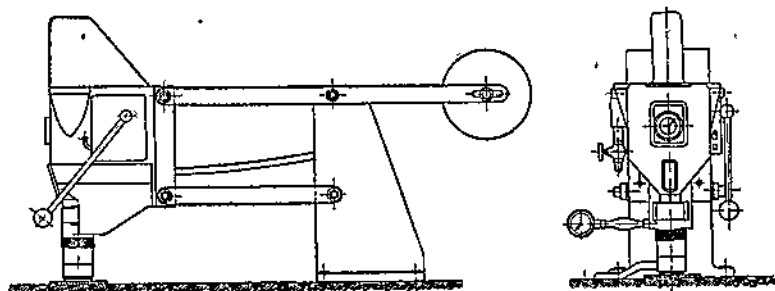
На фиг. 57 цифровые данные ЦНИЛАШ изображены диаграммой, где величины a дают зависимость глубины лунки от твердости и зернистости при количестве продутного песка 28 и 5 см^3 .

На фиг. 58 автором построены значения P — работы, отнесенной к 1 мм глубины лунки (или средней силы, с которой струя песка дей-

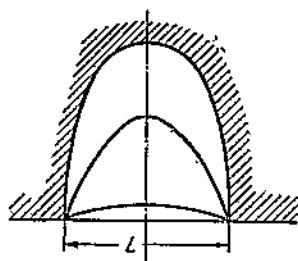
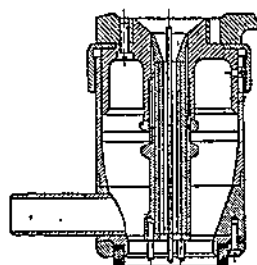




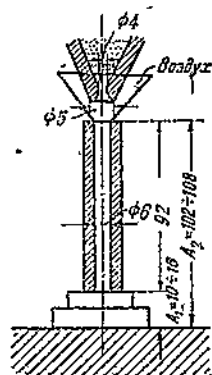
Фиг. 53.



Фиг. 54.

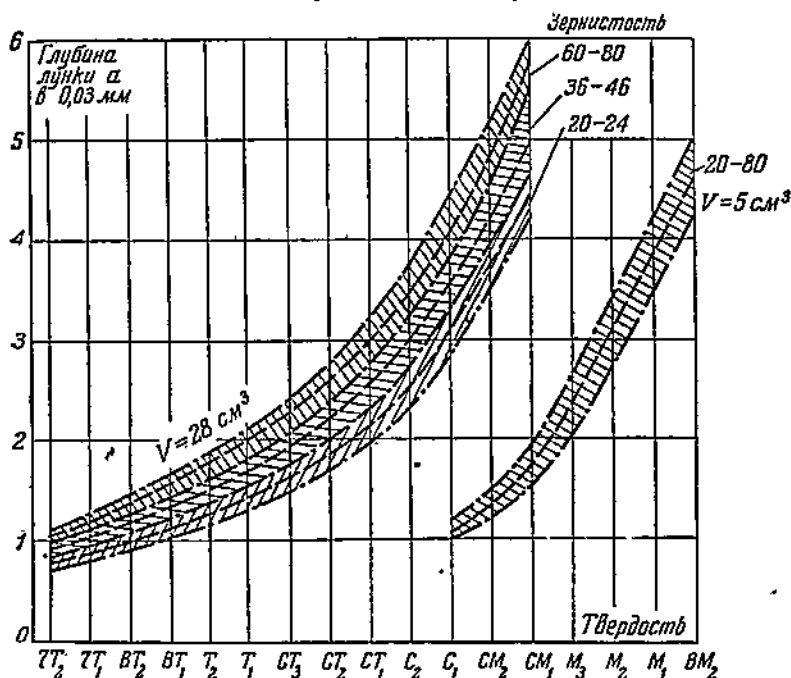


Фиг. 55.



Фиг. 56.

ствуе на лунку) в зависимости от твердости и зернистости. Чем мягче круг, тем меньшая сила требуется для образования лунки. Чем крупнее зерно круга, тем большая сила требуется для образования лунки. Это объясняется тем, что крупные зерна имеют большую массу и требуют большей силы для выдувания их из лунки.



Фиг. 57.

Значения, силы, прилагаемой к материалу круга (работы в кгмм, отнесенной к 1 мм глубины образуемой лунки) при испытании на градометре и на приборе Цейсса даны соответственно в табл. 14 и 15 для различной твердости и зернистости круга.

На фиг. 59 дана обобщенная диаграмма, показывающая величину работы, необходимой для удаления одинакового количества материала круга, в зависимости от твердости и зернистости круга при испытании на приборах Прокофьева, Макензена и градометре.

При диаметре выбиваемой на градометре лунки 3,25 мм и глубине лунки 1 мм объем удаленного из лунки абразива

$$\frac{\pi 3,25 \cdot 1}{4} = 8,35 \text{ мм}^3.$$

На фиг. 59 даны значения работы L в кг мм, необходимой для удаления из испытуемого шлифовального круга одного и того же объема абразива $8,35 \text{ мм}^3$ при испытании круга на трех приборах. Величина работы изменяется в зависимости от твердости круга, отложенной по оси абсцисс. Величина работы, затраченной при испытании на

Таблица 14

Твердость	Усилие в кг, действующее на круг при испытании градо- метром, для зернистости					
	20	24	36	46	60	80
ВМ ₂		47—52	52—60	66—75	75—85	89—102
М ₁		52—59	60—68	75—84	85—98	102—120
М ₂	52—59	59—67	68—79	84—95	98—111	120—137
М ₃	59—66	67—76	79—89	95—108	111—124	137—164
СМ ₁	66—75	76—85	89—100	108—124	124—141	164—187
СМ ₂	75—84	85—95	100—114	124—141	141—164	187—216
С ₁	84—93	95—105	114—128	141—158	164—186	216—241
С ₂	93—105	105—117	128—141	158—178	186—216	241—273
СТ ₁	105—114	117—132	141—157	178—205	216—256	273—316
СТ ₂	114—128	132—146	157—178	205—241	256—293	316—373
СТ ₃	128—141	146—164	178—205	241—293	293—342	373—456
Т ₁	141—158	164—186	205—241	293—342	342—410	456—512
Т ₂	158—178	186—216	241—273	342—410	410—512	512—587
ВТ ₁	178—195	216—242	273—342	410—512	512—587	587—820
ВТ ₂	195—228	242—274	342—410	512—587	587—820	820—1025

Таблица 15

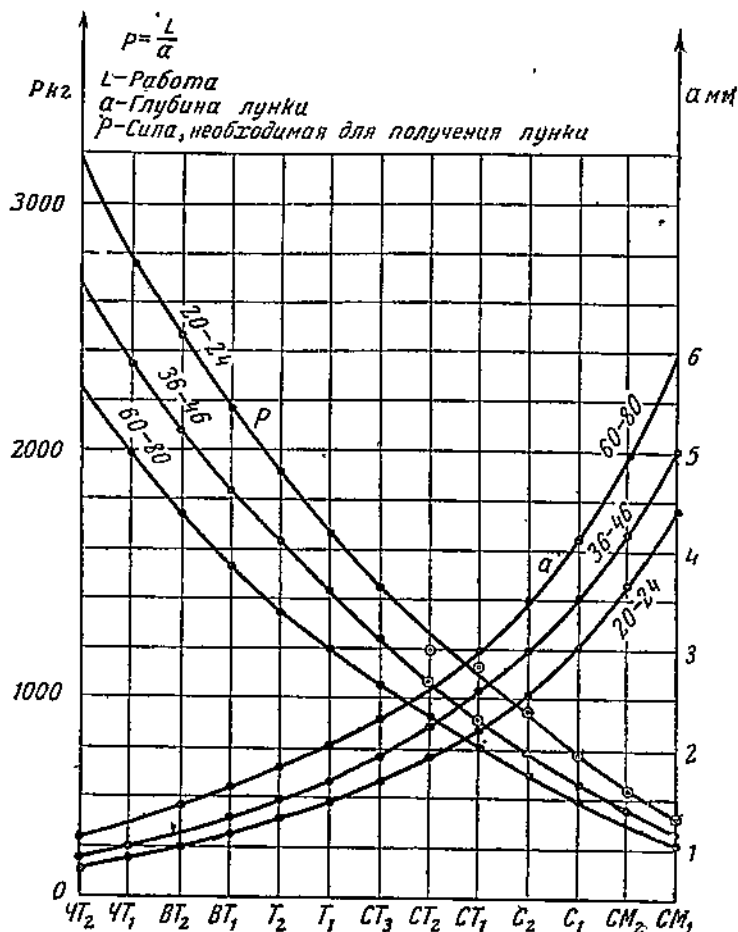
№ по пор.	Твердость	Усилие в кг, действующее на круг при испытании прибором Цейсса, для зернистости		
		20—24	36—46	60—80
1	СМ ₁	486—578	442—512	406—463
2	СМ ₂	578—705	512—608	463—540
3	С ₁	705—853	608—736	540—640
4	С ₂	853—1060	736—868	640—750
5	СТ ₁	1060—1215	868—990	750—870
6	СТ ₂	1215—1390	990—1156	870—990
7	СТ ₃	1390—1570	1156—1350	990—1130
8	Т ₁	1570—1800	1350—1520	1130—1280
9	Т ₂	1800—2020	1520—1730	1280—1430
10	ВТ ₁	2020—2310	1730—1940	1430—1620
11	ВТ ₂	2310—2560	1940—2210	1620—1870
12	ЧТ ₁	2560—2930	2210—2480	1870—2120
13	ЧТ ₂	2930—3370	2480—2800	2120—2310

градомере и приборе Макензена, изменяется также в зависимости от зернистости круга (верхняя и нижняя кривая для каждого из этих приборов).

Для построения на фиг. 59 кривой работы, затрачиваемой при испытании на приборе Прокофьева, необходимо найти длину пути, при котором удаляется объем 8,35 мм³. Для этого нужно разделить объем 8,35 мм³ на сечение F , на которое давит алмаз. Величина работы выразится:

$$L = P_2 \eta_1 \cdot a,$$

где a — путь, пройденный алмазом при удалении из круга $8,35 \text{ мм}^3$ абразива. В результате подсчетов получим табл. 16.



Фиг. 58.

На фиг. 59 видно, что показания трех приборов, приведенные к одинаковым единицам измерения, различаются не только по абсолютным величинам, но и по своему характеру. Так, прибор Прокофьева дает показания, не зависящие от зернистости круга; на приборе Макензена мелкозернистый круг требует меньше работы для выбивания лунки, нежели крупнозернистый круг; на градомере, наоборот — крупнозернистый требует меньшее количество работы.

Таким образом подтверждается то положение, что невозможно сравнивать между собой значения твердости, полученные на различных приборах, невозможно разработать единую шкалу твердости для всех приборов. Значения твердости, получаемые на различных приборах, не являются функциями одинаковых физических свойств.

Японские исследователи Сэкигути и Хасягава¹, считая, что под твердостью шлифовального круга следует разуметь силу сцепления, с которой соединены взаимно между собой зерна, предлагают прибор для испытания твердости круга, схематически изображенный на фиг. 60. Шлифовальный круг *C* укладывается на станину прибора *B*. С определенной высоты падает определенного веса стержень *A* и от-

Таблица 16

Твердость	<i>a</i> мм	<i>L</i> кгмм
СТ ₁	960	912
С ₂	450	427
С ₁	292	277
СМ ₂	218	200
СМ ₁	118	112
М ₃	64	61
М ₂	50	47

бывает от края испытуемого круга кусок материала шириной 1 мм. Такое выкрашивание кромки, по мнению изобретателей прибора, почти не портит круга. Давление стержня в момент удара измеряется сложным пьезо-электрическим прибором. Каждой степени твердости соответствует определенное давление стержня при ударе в килограммах. Авторы этого метода испытания указывают, что значения твердости круга, полученные на этом приборе, связаны с усилиями шлифования.

Приведенное исследование приборов для определения твердости шлифовальных кругов показывает, что характеристика твердости целиком зависит от конструкции прибора. Невозможно установить единую шкалу твердости для всех приборов, так как все приборы основаны на различных принципах и при испытании дают показания, являющиеся функциями от различных физических свойств. Ни один прибор не дает значений твердости, потому что такого физического понятия вообще не существует. Даже такой момент, как зависимость твердости от зернистости (вполне определенного свойства), на всех приборах для измерения твердости различен. Показания приборов являются результатом тех операций с материалом, которые мы производим на приборах.

Если показания приборов для определения твердости кругов не отражают одинаковых физических свойств, а дают какие-то условные отсчеты, зависящие от конструкции приборов и от операций, производящихся на приборе с кругом, то наиболее ценным будет прибор, принцип работы которого более, нежели у других, приближается к реальному процессу шлифования, к производственным условиям работ шлифовального круга. С этой точки зрения более других заслуживает внимания прибор Прокофьева. Алмазы этого прибора двигаются по испытуемому кругу со скоростью, достигающей в конце падения груза до 8 м/сек.

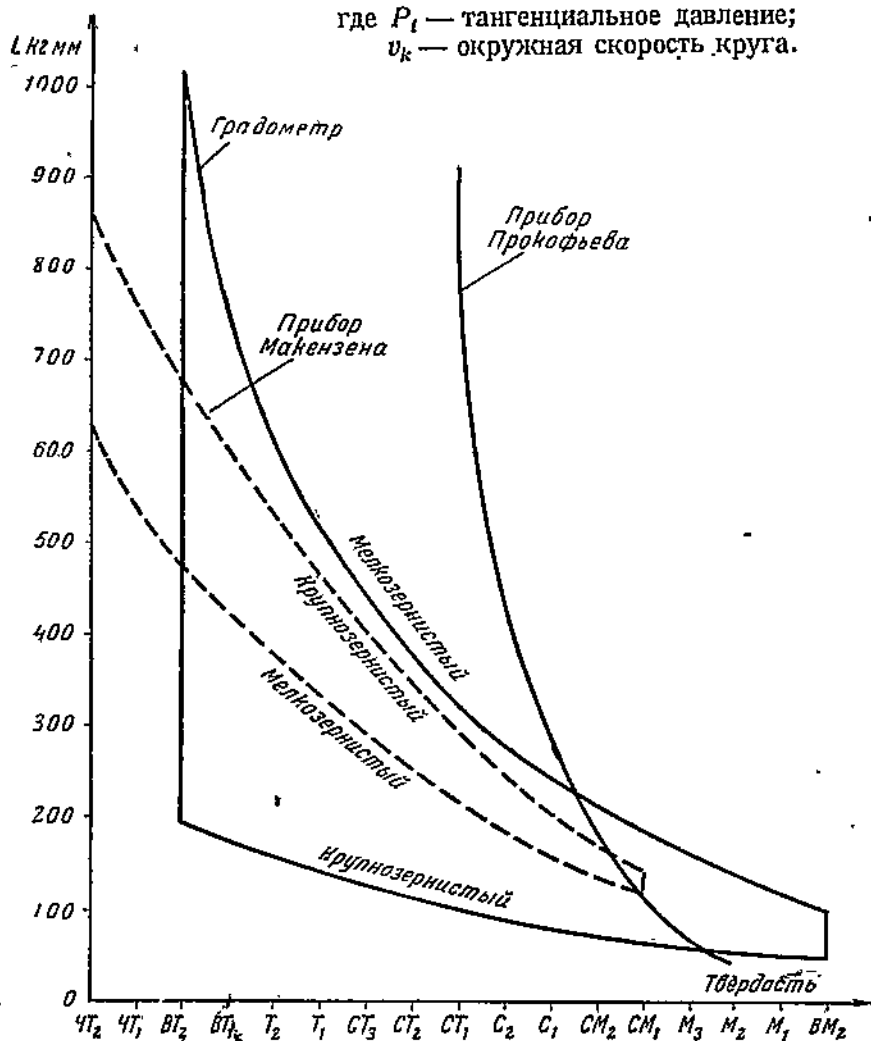
Движение алмазов по кругу аналогично движению круга около изделия в процессе шлифования. В том и другом случае вызывается тангенциальное давление (соответствующее значению *k*, на приборе Прокофьева).

¹ Journal of the Society of mechanical Engineers, Japan, Vol. XXXVI, № 198, окт. 1937, стр. 700: «Исследование абразивного действия шлифовального [круга] (на японско м яз.).»

Работа, затрачиваемая полезно (на снятие металла) при шлифовании, является прямой функцией от тангенциального давления

$$U_e = P_t \cdot v_k,$$

где P_t — тангенциальное давление;
 v_k — окружная скорость круга.



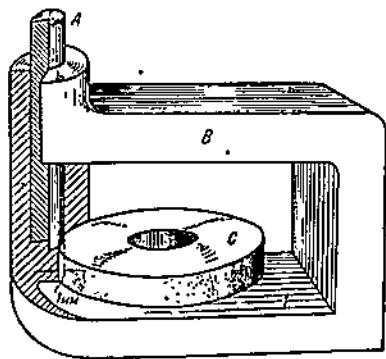
Фиг. 59.

При шлифовании нас более всего интересует работоспособность шлифовального круга, или количество металла, которое может снять тот или другой круг на определенном режиме. Поэтому наиболее правильным способом определения характеристики шлифовального круга

¹ Werkstattstechnik, 15 Mai 1928, H. 10, S. 293, M. Kurrein. — «Исследование твердости шлифовального круга».

является способ Куррейна¹, по которому классификация кругов по твердости производится во время обычного процесса шлифования.

Куррейн берет ходовые сорта металлов, применяемых в данном производстве, и составляет для них диаграммы, в которых дается зависимость тангенциального давления при шлифовании от мгновенного приведенного сечения стружки.



Фиг. 60.

В двойной логарифмической сетке даются кривые для шлифовальных кругов различных характеристик. Для испытания новых шлифовальных кругов неизвестной характеристики производится шлифование этими кругами с измерением тангенциального давления, данные обрабатываются, строится вышеописанная диаграмма и ее значения сравниваются с нормализованными диаграммами.

Этот способ нужно считать наиболее совершенным. Но он сложен. Для измерения величины тангенциальных давлений необходимо иметь

аппаратуру — механический пружинный динамометр Куррейна, электроприбор, работа которого основана на изменении емкости, или же пьезо-электрический прибор типа, применявшегося японскими исследователями Сэкигути и Хасягава. Очень сложно нахождение глубины резания путем определения количества снятого металла, износа круга и величины отжима механизма подачи. Далее следует кропотливая обработка полученных данных и вычерчивание диаграммы. Для подобного определения твердости круга нужно провести солидное лабораторное испытание. Поэтому данный способ, несмотря на принципиальную его правильность, не получил распространения.

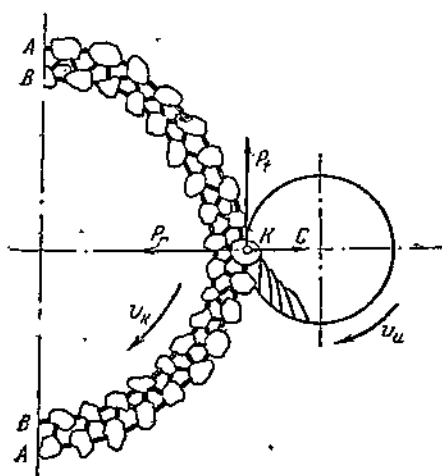
7. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

На фиг. 61 схематически показано строение шлифовального круга. По данным фирмы Нортон, подтвержденным работами ЦНИЛАШ¹, к такому строению наиболее приближаются структурные круги. Такое строение можно вообще принять для любого шлифовального круга. В процессе шлифования работает только верхний слой абразивных зерен А (слой режущих зерен). Остальная часть круга (от слоя В к центру) не работает, а служит лишь жестким каркасом, на котором укреплен слой режущих зерен. Можно провести аналогию между нормальным шлифовальным кругом и деревянным, или пробковым диском, периферия которого смазана клеем и обсыпана наждаком. По мере износа наждачных зерен деревянный круг нужно снова обмазывать клеем и обсыпать наждаком. У нормального же шлифовального круга по мере износа режущих зерен (в процессе шлифования и правки алмазом) обнажаются новые абразивные зерна следующего слоя.

¹ «Структурные круги», бюллетень ЦНИЛАШ № 7 за 1937 г.

Возьмем одно зерно K и рассмотрим его работоспособность.

При вращении вхолостую круга диаметром D_k с окружной скоростью v_k каждое режущее зерно находится под действием сил, изображенных на фиг. 62. Зерно сопротивляется вырыванию из круга сопротивлением связки a , действующим на каждый из 10 мостиков связки, удерживающих зерно на поверхности круга. Сопротивление связки вырыванию ослабляется центробежной силой

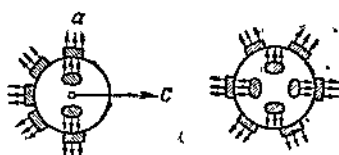


Фиг. 61.

где m — масса зерна.

$$C = \frac{2m v_k^2}{D_k},$$

где m — масса зерна.



Фиг. 62.

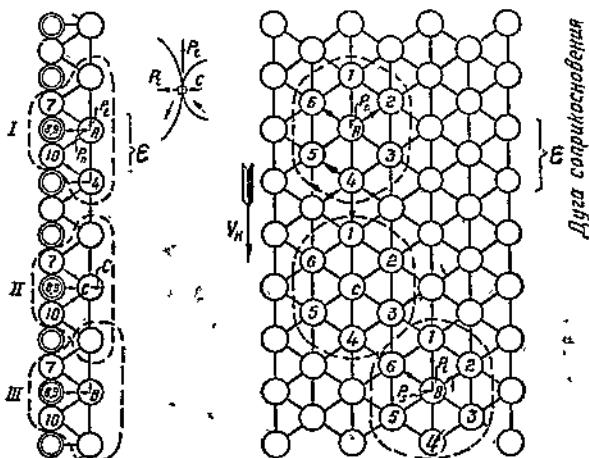
На фиг. 63 изображено строение структурного круга в двух проекциях и усилия, действующие на режущее зерно (зерна изображены кружками, связка — линиями). Положение II дает действие центробежной силы C .

Зерно имеет запас кинетической энергии или живую силу

$$U_1 = \frac{m v_k^2}{2},$$

величина которой меняется с изменением массы зерна (различная зернистость круга) и окружной скорости.

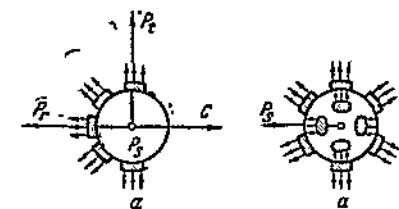
При ударе абразивного зерна в обрабатываемое изделие запас живой силы зерна отдается изделию, так как скорость зерна (при постоянной скорости всего круга) в течение короткого промежутка времени после удара уменьшается до нуля (и может оказаться даже отрицательной) за счет отгиба мостиков связки, на которых удерживается зерно. В это время живая сила зерна



Фиг. 63.

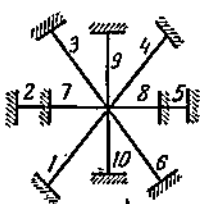
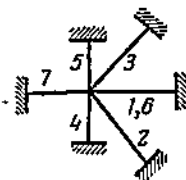
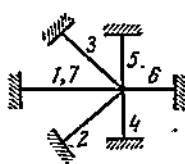
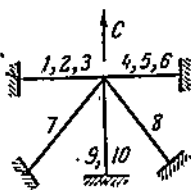
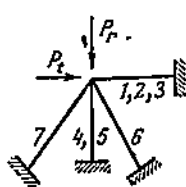
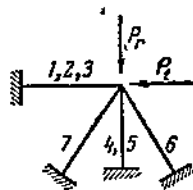
$$\frac{mv^3}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^3}{2} - 0$$

передается изделию. Затем отклонившееся назад зерно под влиянием непрерывно подаваемой от мотора энергии снова движется вперед со скоростью v и уже за счет напряжения зерна и связки удаляет какой-то объем металла с изделия. Двигаясь таким образом, толчкообразно с вибрациями, непрерывно меняя скорость от v до 0, пока срезается металл, зерно отдает при ударе свою кинетическую энергию.



Фиг. 64.

Представим себе, что режущие зерна подвешены к периферии шлифовального круга на неупругих нитях. Если бы живая сила режущих зерен, ударяющихся при вращении круга об изделие, была достаточна для того, чтобы произвести работу резания, то шлифовальный круг мог быть изготовлен без связующего вещества. Но так как живая сила режущих зерен недостаточна для совершения работы резания, то режущие зерна приходится соединять при помощи связки (содержание которой в наиболее употребительных в заводской практике шлифовальных кругах невелико).



Фиг. 65.

Фиг. 66.

Фиг. 67.

На фиг. 64 показаны силы, приложенные к зерну круга во время шлифования. Здесь так же, как и на фиг. 62, режущее зерно изображено в виде круга. Мостики связки, которыми зерно соединяется в круге с другими абразивными зёрнами, показаны заштрихованными площадками. Малыми стрелками показаны силы a , которыми каждое режущее зерно круга притягивается к каждому соседнему зерну посредством мостиков связки. Большие стрелки изображают усилия,

приложенные к зерну: P_t — тангенциальное усилие; P_r — радиальное усилие; P_s — усилие продольной подачи (осевое).

Усилие резания

$$P = \sqrt{P_t^2 + P_r^2 + P_s^2}$$

На фиг. 65—67 схематически показано расположение мостиков-связки, которыми зерно круга соединяется с соседними зернами. Режущее зерно изображено точкой, в которой пересекаются прямые линии — мостики связки, прикрепленные другим концом к соседним абразивным зернам (эти зерна заштрихованы). Стрелками показаны усилия, приложенные к зерну.

Допустим, что во время шлифования (фиг. 63) в соприкосновении с изделием по длине периферии круга находятся два зерна A и 4 (E — дуга соприкосновения). На фиг. 65 показано действие сил на зерно A (начало дуги соприкосновения), на фиг. 66 — на зерно 4 (последнее зерно, находящееся на дуге соприкосновения). На фиг. 67 показано воздействие на круг только центробежной силы C .

Учитывая все усилия, действующие на зерно, выразим работу, которую может совершить зерно вращающегося шлифовального круга.

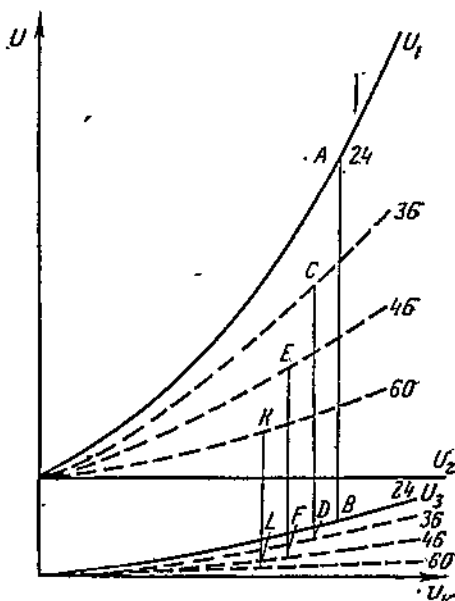
На фиг. 68 имеем:

U_1 — живая сила режущего зерна;

U_2 — потенциальная энергия связки, вычисляемая по сопротивлению связки силам, вырывающим зерно из круга;

U_3 — потенциальная энергия зерна, подвергнутого растяжению центробежной силой.

С. П. Тимошенко¹ говорит: «Количество потенциальной энергии деформации, накопленной в единице объема материала, иногда принимается за основу для определения предельного напряжения, при котором происходит разрушение». Мы обозначаем через U_2 и U_3 потенциальную энергию, накопленную в связке или зерне под действием предельного напряжения, вызывающего разрушение. Нужно отметить, что мы выбираем предельное напряжение разрушения в том случае, когда определяем работоспособность шлифовального круга, т. е. величину работы, которую способен дать шлифовальный круг. Если же мы вместо предельного напряжения возьмем напряжение, возникающее



Фиг. 68.

¹ С. П. Тимошенко, «Теория упругости», 1937, стр. 155.

в процессе шлифования, то получим работу, затраченную шлифовальным кругом на процесс резания.

На фиг. 68 схематически даны значения величин U_1 , U_2 и U_3 для шлифовальных кругов зернистости 24, 36, 46 и 60 (для каждого номера зерна масса различна), причем U_3 дано для одного диаметра круга D_k .

Составляющие работоспособности U_2 и U_3 можно определить двумя способами: расчетным и экспериментальным. Разберем расчетный способ определения количества потенциальной энергии деформации.

Пользуясь пространственным расположением абразивных зерен и соединяющих их мостиков связи в шлифовальном круге (что будет более правильно для шлифовальных кругов с регулируемой структурой), можно по правилам сопротивления материалов разложить прикладываемое при деформации усилие, решить статически неопределимую систему и таким образом определить искомую потенциальную энергию. Она выразилась бы следующим образом (согласно теории упругости):

$$U_2 = \frac{P_1^2 \cdot l_1}{2EF_1} + \frac{P_2^2 \cdot l_2}{2GF_2} + \frac{P_3^2 \cdot l_3}{2EF_3};$$

$$U_3 = \frac{\alpha^2 \left(\frac{2mv_k^2}{D_k} \right)^2 l_4}{2EF_4} + \frac{\beta^2 \left(\frac{2mv_k^2}{D_k} \right)^2 l_5}{2GF_5};$$

где P_1 — часть усилия, вырывающая зерно из связи (связка работает на растяжение);

P_2 — часть того же усилия, вызывающая срез связи;

P_3 — часть усилия, вызывающая сжатие связи;

E — модуль упругости связи при растяжении;

G — то же на сдвиг (E и G вычисляются по формулам, данным в книге Григорьева и Муравлева «Стекло»¹);

l_1 — l_5 — длины плеч, на которых действуют усилия, создавая потенциальную энергию;

F_1 — F_5 — сечения деформируемых мостиков связи.

Из теории упругости известно, что количество потенциальной энергии, приобретаемое стержнем длиной l и сечением F под влиянием силы P , равняется:

$$U = \frac{P^2 \cdot l}{2EF},$$

где E — модуль упругости при растяжении.

Эта формула верна для растяжения. При срезе в знаменатель подставляется модуль упругости G при срезе (вместо E).

Из приведенных выше формул для U_2 и U_3 видно, что величина потенциальной энергии связи U_2 складывается из трех частей. На фиг. 63 (положение Γ) показана статически неопределимая система расположения мостиков связи, удерживающих зерно от выпадения из круга, причем зерно находится в начале дуги соприкосновения E круга с изделием.

¹ Григорьев и Муравлев, «Стекло», 1923.

На фиг. 66 то же дано для последнего зерна в пределах дуги соприкосновения.

Из схем видно, что мостики связки под действием приложенных сил подвержены растяжению, срезу и сжатию. Деформации изгиба здесь не будет, так как длина мостиков связки меньше их диаметров (изгиб мог бы быть в том случае, когда длина изгибаемого стержня в 1,0—1,5 раза более его диаметра; при меньших отклонениях будет иметь место срез).

В формуле для U_2 первое слагаемое представляет собой долю потенциальной энергии, накапливаемой мостиками связки длиной l_1 и сечением F_1 под действием силы P_1 (часть общего прилагаемого усилия, вызывающая растяжение). Второе слагаемое — доля потенциальной энергии, вызываемая деформацией среза, и третье слагаемое — деформацией сжатия. В каждое слагаемое подставляется соответствующий модуль упругости.

На фиг. 67 дана подобная схема расположения мостиков связки, находящихся под действием центробежной силы C . В этом случае величина потенциальной энергии (формула для U_2) складывается из двух частей. Первое слагаемое представляет собой долю потенциальной энергии, накапливаемую мостиками связки длиной l_4 и сечением F_4 под действием центробежной силы

$$C = \frac{2mv_k^2}{D_k}.$$

При этом взята часть центробежной силы α , вызывающая растяжение. Второе слагаемое — доля потенциальной энергии, накапливаемая мостиками связки длиной l_5 и сечением F_5 под действием части центробежной силы β , вызывающей срез. Для обоих слагаемых взят соответствующий модуль упругости (E и G).

U_2 и U_3 можно было бы найти, пользуясь схемами, данными на фиг. 65 и 66, подставляя соответствующие данные из характеристики шлифовального круга (средние размеры зерна, мостиков связки и относительное расположение зерен и мостиков связки).

Однако, такой путь для определения U_2 при сегодняшнем уровне наших знаний в области механических качеств абразивов и связки, а тем более их комбинации, невозможен. Почти все величины входящие в формулу, недостаточно изучены. Кроме того, изучение автором характера изнашивания режущих зерен в процессе шлифования при помощи стробоскопа и бинокулярного микроскопа показало, что в процессе резания почти не имеет места вырывание целых абразивных зерен. Зерна изнашиваются очень мелкими фракциями, образуя все новые и новые режущие выступы на одном и том же зерне. Следовательно, необходимо определять совместное разрушение зерен и связки, что еще сложнее. Поэтому автор подошел к определению U_2 экспериментально, как это показано в дальнейшем.

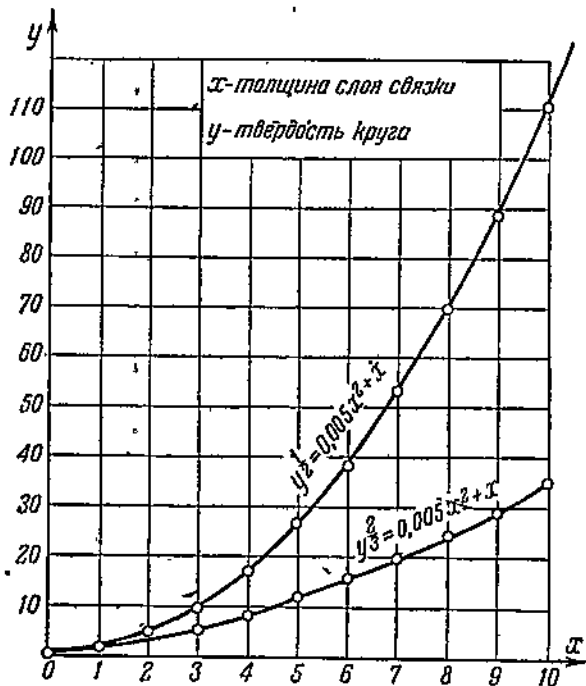
На диаграмме (фиг. 68) работоспособность зерна круга выражается для различных зернистостей отрезками AB , CD , EF и KL для соответствующих значений окружной скорости круга v_k . Работоспособность зерна

$$U = U_1 + U_2 - U_3.$$

Составляющая работоспособности U_1 изменяется по закону параболы, составляющая U_2 — по закону горизонтальной прямой.

Перейдем к изменению работоспособности зерна в зависимости от твердости круга, зернистости, процентного содержания в круге зерна и связки.

Автором выведены зависимости прочности связки от зернистости (по номеру которой мы знаем размер зерна в поперечнике), процентного содержания связки и зерна в круге (эти данные мы имеем в рецептуре круга).



Фиг. 69.

Обозначим через K относительную прочность шлифовального круга, или разницу в прочности двух структур круга, имеющих различную зернистость, или различное процентное содержание в круге зерна и связки.

К. Круг¹ считает, что твердость круга (сопротивление вырыванию зерен) Y изменяется в зависимости от толщины слоя связки около зерна X . При различном способе расположения зерен в круге Карл Круг выводит для крайних значений такие зависимости:

$$Y^{1/2} = 0,005X^2 + X;$$

$$Y^{1/2} = 0,005X^2 + X.$$

Действительные значения прочности связки лежат между этими крайними значениями (фиг. 69).

Приведенные данные К. Круга мало пригодны для практики, так как невозможно практически определить толщину слоя связки около зерна. Поэтому далее автором даны зависимости прочности связки от других факторов — зернистости, процентного содержания связки и зерна в круге.

Обозначим через:

d — диаметр зерна в мм;

i_1 — количество абразивных зерен в 1 мм³ объема круга;

¹ Maschinenbau, 3 sept. 1925, Н. 18. S. 875: «Beiträge zur Kenntnis des Schleifens».

W_k — часть объема круга, занимаемую зерном;

W_c — часть объема круга, занимаемую связкой.

Подсчитанные по выведенной выше (стр. 14) формуле значения

$$i_1 = \frac{1W_k}{\frac{\pi d^3}{6}} = 1,91 \frac{W_k}{d^3} \quad 1,91 \frac{W_k}{d^3}$$

сведены в табл. 17.

Таблица 17

Структура №	Количество абразивных зерен в 1 мм ³ круга при зернистости							
	16	20	24	36	46	60	80	100
0	1,12	2,31	5,47	18,5	44	147,5	288	430
1	1,08	2,24	5,28	17,8	42,5	143	279	416
2	1,05	2,17	5,11	17,3	41,1	138	270	402
3	1,01	2,09	4,93	16,7	39,7	133	260	389
4	0,97	2,01	4,75	16,1	38,3	128,5	251	375
5	0,94	1,94	4,58	15,5	36,8	123,5	242	361
6	0,90	1,86	4,40	14,9	35,5	119	232	347
7	0,87	1,79	4,23	14,3	34,0	114	223	333
8	0,83	1,72	4,06	13,7	32,6	109,5	214	319
9	0,79	1,64	3,88	13,1	31,2	105	205	305
10	0,76	1,57	3,70	12,5	29,8	100	195	292
11	0,72	1,49	3,52	11,9	28,4	95,3	186	278
12	0,69	1,42	3,35	11,3	27,0	90,5	177	264

На одно зерно приходится связки:

$$\frac{1W_c}{i_1} = \frac{W_c d^3}{W_k \cdot 1,91} = 0,523 d^3 \frac{W_c}{W_k}$$

Каждое зерно внутри круга окружено мостиками связки, количество которых, согласно фиг. 63, равно:

$$6 + 4 + 4 + 2 = 16.$$

На одно зерно, расположенное на периферии круга, приходится $\frac{16}{2} = 8$ мостиков связки (фиг. 63). В элементарном параллелепипеде круга объемом $a^3 b$ заключено абразивных зерен (фиг. 7).

$$6 \cdot \frac{1}{2} + 8 \cdot \frac{1}{8} = 4.$$

$$a^3 b = 4 \cdot \frac{\pi d^3}{6} = \frac{a^3}{\operatorname{tg} 30^\circ}; \quad a = \sqrt[3]{\frac{\operatorname{tg} 30^\circ \cdot 4 \cdot \frac{\pi d^3}{6}}{W_k}} = 1,07 d_1 \sqrt[3]{\frac{1}{W_k}}$$

Длина мостика связки $b = a - d$.

На один мостик приходится связки по объему

$$\frac{W_c}{i_1 \cdot 8}$$

Площадь поперечного сечения мостика связки

$$q = \frac{W_c}{8 \cdot i_1 \cdot b} = 0,125 \cdot \frac{W_c}{i_1 \cdot b}.$$

Полагая, что мостики связки имеют круглое поперечное сечение, имеем, что моменты сопротивления W мостиков различного поперечного сечения пропорциональны кубу диаметров, или

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{D_2^3}{D_1^3},$$

где D — диаметр мостика связки.

Относительная прочность

$$K = \frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{q_2}{q_1}\right)^{3/2}; \quad W_2 = KW_1.$$

Коэффициент K характеризует изменение прочности круга на вырывание зерен в зависимости от количества связки в круге.

Преобразуем выражение для K :

$$K^{2/3} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{W_{c_1} \cdot i_{1_1} \cdot b_1}{W_{c_1} \cdot i_{1_2} \cdot b_2} = \frac{W_{c_1} \cdot W_{k_1}' \cdot d_2^3 (a_1 - d_1)}{W_{c_1} \cdot W_{k_2} \cdot d_1^3 (a_2 - d_2)};$$

$$K^{2/3} = \frac{W_{c_1} \cdot W_{k_1} \cdot d_2^2 \left(1,07 \sqrt[3]{\frac{1}{W_{k_1}}} - 1\right)}{W_{c_1} \cdot W_{k_2} \cdot d_1^2 \left(1,07 \sqrt[3]{\frac{1}{W_{k_2}}} - 1\right)} = \frac{W_{c_1} \cdot d_2^2 (1,07 W_{k_2}^{2/3} - W_{k_1})}{W_{c_1} \cdot d_1^2 (1,07 W_{k_1}^{2/3} - W_{k_2})}.$$

Индексы 1 и 2 обозначают первый и второй сравниваемые шлифовальные круги.

Из этой формулы видно, что

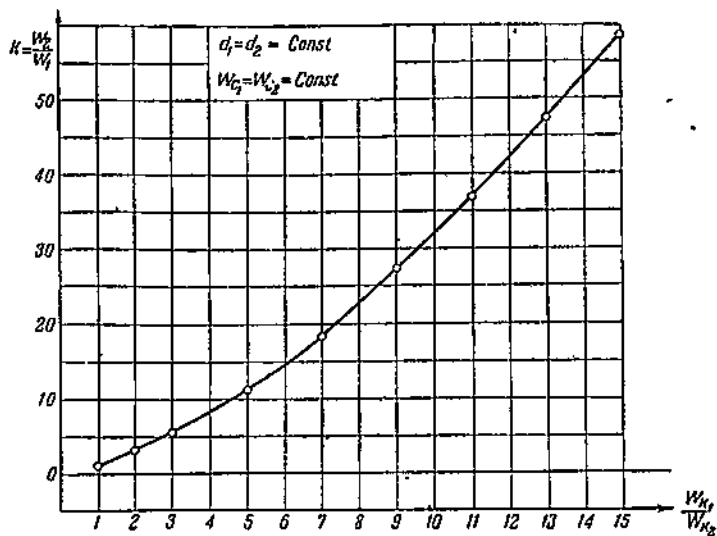
$$K = f(W_c, W_k, d).$$

С увеличением количества (объемного содержания) связки в круге прочность его увеличивается. С увеличением размеров зерна d или с уменьшением номера зернистости прочность связки увеличивается. Крупнозернистый круг в статическом состоянии прочнее, прочность по связке больше, зерно труднее вырвать из связки, нежели мелкозернистого. Сообразно с этим крупнозернистый круг требует более мягкой связки. Это подтверждает Р. Sahm¹.

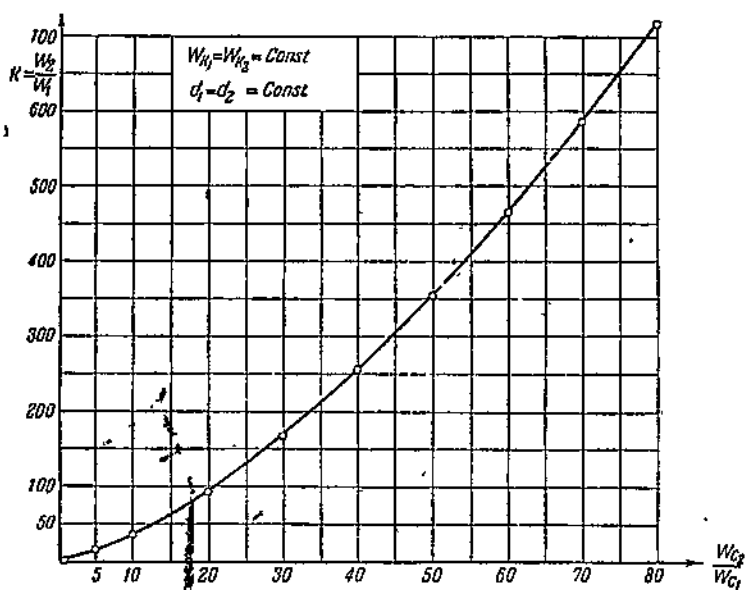
Построим графически зависимости K от W_c , W_k и d ,

Кривая $K = f\left(\frac{W_{k_1}}{W_{k_2}}\right)$ на фиг. 70 показывает, что прочность связки обратно пропорциональна количеству зерна в круге. Сопротивление

¹ Werkstattstechnik, № 10, 1928, S. 314: «Einige Überlegungen über Vorgänge beim Rundschleifen».



Фиг. 70.

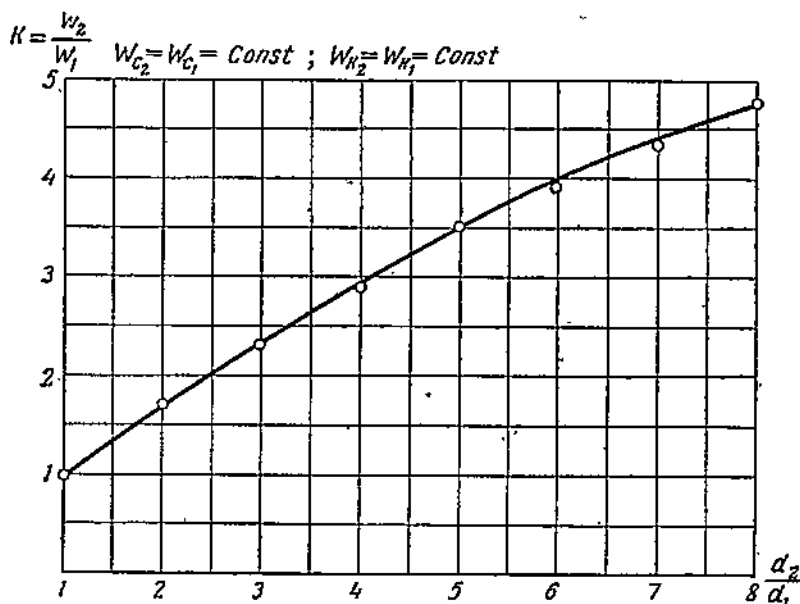


Фиг. 71.

вырыванию зерна быстро растет с уменьшением в круге количества зерна (кривая круто идет вверх).

С увеличением количества связки в круге прочность связки резко возрастает. Кривая $K = f_1\left(\frac{W_{c_2}}{W_{c_1}}\right)$ на фиг. 71 резко идет вверх.

На фиг. 72 дана кривая $K_2 = f\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$. С увеличением диаметра зерна прочность связки возрастает, но это возрастание сравнительно мало, кривая становится более пологой и затем обращается в горизонталь.



Фиг. 72.

На фиг. 73 дана зависимость прочности связки от всех трех величин в одном масштабе. Отложенные по оси абсцисс числа указывают, во сколько раз числитель в приводимых соотношениях больше знаменателя. Кривая $\frac{d_2}{d_1}$ дает увеличение K при увеличении диаметра зерна.

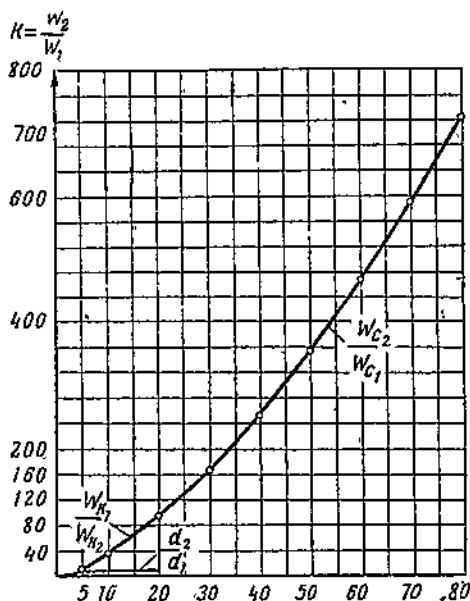
Кривая $\frac{W_{c_2}}{W_{c_1}}$ дает увеличение K при увеличении количества связки.

Кривая $\frac{W_{h_2}}{W_{h_1}}$, совпадающая с кривой $\frac{W_{c_2}}{W_{c_1}}$, но доходящая только до абсциссы 15, дает увеличение K при уменьшении количества зерен в связке. Здесь видно очень незначительное влияние зернистости — кривая $K = f_2\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$ очень близка к оси абсцисс. Кривая $K = f\left(\frac{W_{k_1}}{W_{k_2}}\right)$

на небольшом протяжении почти совпадает с кривой $K = f_1\left(\frac{W_{c_2}}{W_{c_1}}\right)$.

Но в существующих в практике кругах разница в W_k доходит только до 15, в то время как K увеличивается в 60 раз. Разница же в W_c доходит до 80, причем K увеличивается в 700 раз. Поэтому практически решающим фактором для суждения о прочности связки является значение W_c (не касаясь качества самой связки и давления применяемого при прессовании кругов).

На фиг. 74 дана диаграмма работоспособности круга в трех измерениях, связывающая работоспособность U , твердость, зернистость, объемные содержания связки и зерна в круге. Диаграмма основана на зависимости зернистости (по оси ординат) от окружной скорости круга v_k и толщины связки X около зерна (по K . Кругу) отложенных по осям абсцисс и аппликат. Работоспособность находится точно так же, как и на диаграмме в двух измерениях (фиг. 68).



Фиг. 73.

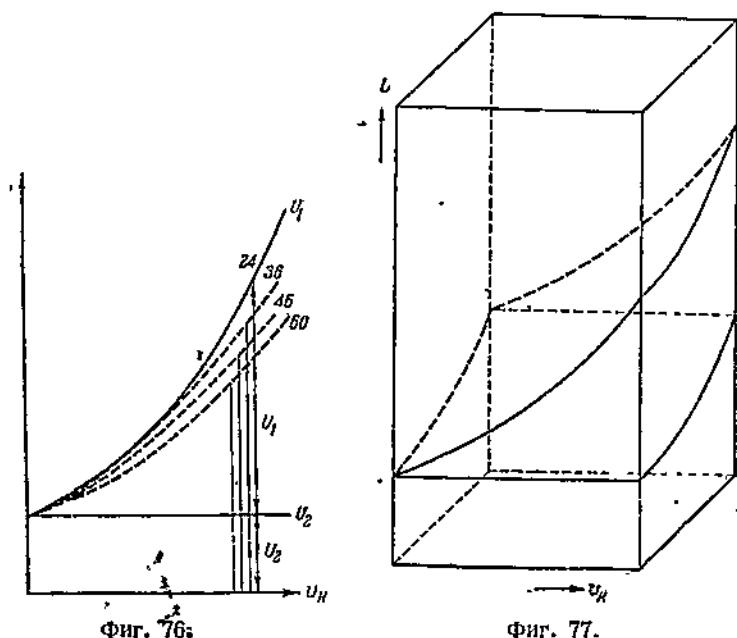
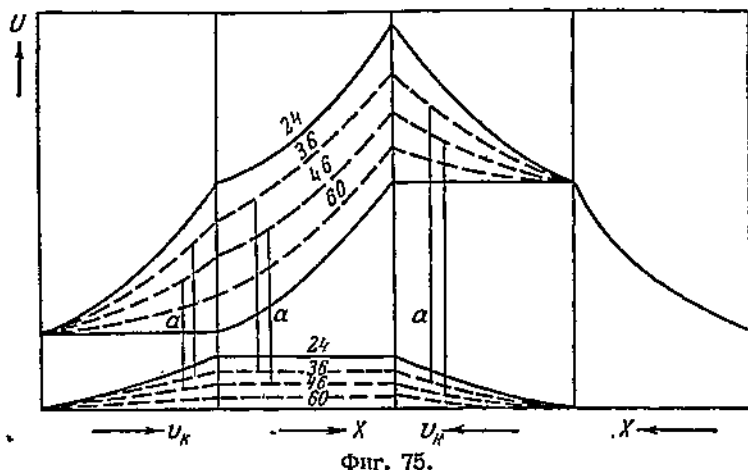
На диаграмме работоспособности в трех измерениях (фиг. 74) по оси ординат OB откладывается работоспособность, по оси абсцисс BM — скорость круга v_k и по оси аппликат MN — твердость круга X . Прямая AD изображает потенциальную энергию связки (отрезок AB), кривая AC — живую силу зерна для круга минимальной твердости (M_0) и зернистости 24 (на данной схеме). Кривая BK есть потенциальная энергия, создаваемая в связке центробежной силой C . Кривые CE и DG представляют собой изменение работоспособности с изменением твердости круга (кривые CE и DG эквидистантны). Диаграмма построена для кругов твердостью от M_0 до C_2 и зернистостью от 24 до 60.

На фиг. 75 дана развертка этой же диаграммы. Отрезки a представляют собой работоспособность зерна (при вращении вхолостую).

На фиг. 61 видно, что в процессе шлифования появляется радиальное усилие P_r , которое направлено в противоположную сторону по отношению к центробежной силе C и нейтрализует действие силы C в месте резания. Поэтому в диаграммах работоспособности круга, относящихся к процессу шлифования, а не к работе вхолостую, не нужно учитывать действия центробежной силы C (фиг. 76 и 77).

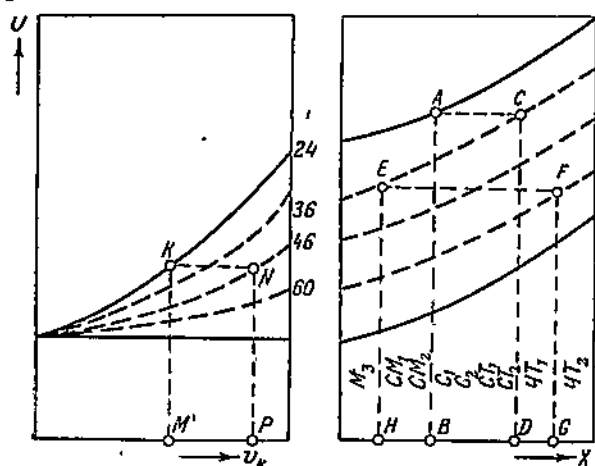
Фиг. 78 схематически показывает зависимость сопротивления зерна вырыванию от зернистости круга. Правая часть диаграммы дана для одной окружной скорости круга v_k . Допустим, что зерно размера 24 по ОСТ имеет при данной v_k работоспособность AB . Зерно 36, имею-

грамме работоспособности круга (фиг. 79) увеличением работоспособности абразивных зерен при увеличении окружной скорости u_k .



На фиг. 79 даны 3 диаграммы. Диаграмма I представляет схематическую картину работоспособности при одной твердости круга (в данном случае при ЧМ). Диаграмма II дает изменение твердости круга в зависимости от X — толщины слоя связки или процентного содержания зерна, связки и пор при одной u_k (например $u_k = 30$ м/сек). Диаграмма III дает картину работоспособности зерна для другой твердости (C_2).

Допустим, что при $v_k = 30$ м/сек зерно имеет работоспособность выражающуюся на диаграмме *II* отрезком $BE = B_1E_1$ (твёрдость C_2). На диаграмме *III* работоспособность зерна изменяется в зависимости от v_k . Понижим v_k до 20 м/сек, тогда работоспособность выразится отрезком CF . Перенесем отрезок CF на диаграмму *II* в положение AK .

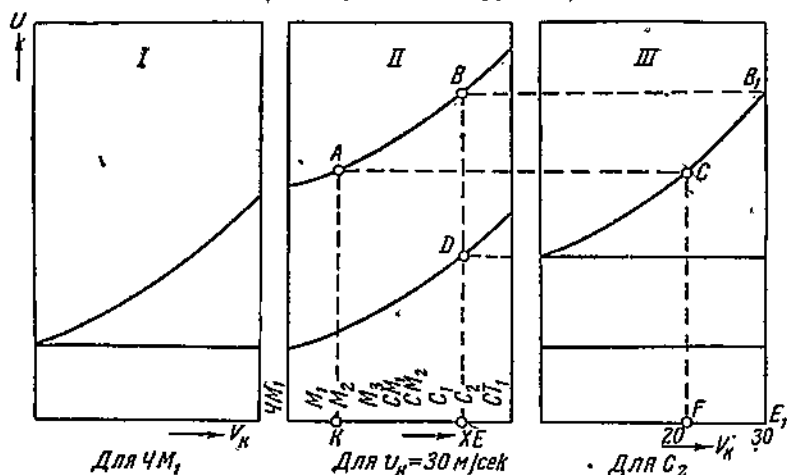


Фиг. 78.

Мы видим, что зерно, имея одну и ту же работоспособность $AK = CF$, имеет уже другую твёрдость — M_2 вместо C_2 . Иными словами, с увеличением v_k запас работы возрастает.

Точно так же по диаграмме работоспособности можно объяснить увеличение работоспособности с увеличением окружной скорости для любого инструмента (при фрезеровании, полировании и т. д.).

Идеально гладкий диск (или другой инструмент), не имеющий на по-



Фиг. 79.

верхности выступов, не может производить резания. Бумажный круг, режущий дерево, железный диск, режущий твёрдую сталь, и подобные инструменты имеют на поверхности выступы, обладающие массой. При вращении массы выступов создают живую силу, которая и производит работу, тем большую, чем выше окружная скорость. Эффект

этой работы особенно заметен на больших скоростях, так как v_k^2 создает большую живую силу.

Термин «твердость» не имеет физического значения. Твердость не является самостоятельным физическим свойством, а является производной от других самостоятельных физических свойств. Термин же «динамическая твердость» еще более туманен и лишен научного смысла. В данном случае мы имеем дело с работоспособностью.

На диаграммах работоспособности (в двух и в трех измерениях) по оси абсцисс можно откладывать как величину X — толщину слоя связки около зерна (по К. Кругу), так и величину K — прочность связки:

$$K = f\left(\frac{W_{c_1}}{W_{c_2}}\right); \quad K = f_1\left(\frac{W_{k_1}}{W_{k_2}}\right); \quad K = f_2\left(\frac{d_2}{d_1}\right).$$

На фиг. 77 дана диаграмма в трех измерениях без учета влияния центробежной силы (для процесса шлифования); по оси аппликат отложена величина K . Правило пользования диаграммой такое же, как и для диаграммы на фиг. 74.

Нужно отметить, что вышеприведенные диаграммы являются лишь схемами, по которым можно проследить качественную сторону изменения работоспособности и свойств круга. Для выяснения количественных взаимоотношений необходимо в приведенные формулы подставить соответствующие цифровые значения, приводимые ниже для различных конкретных случаев.

Рассмотрим влияние некоторых других факторов на работоспособность круга — толщины стружки, скорости деформации, формы режущих кромок зерна.

По Альдену толщина стружки при шлифовании выражается

$$x = \frac{v_u}{k^n} \sqrt{2a\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right)},$$

где v_k — окружная скорость круга;

v_u — окружная скорость изделия;

n — количество режущих зерен на единице длины периферии круга;

a — глубина резания;

R — радиус круга;

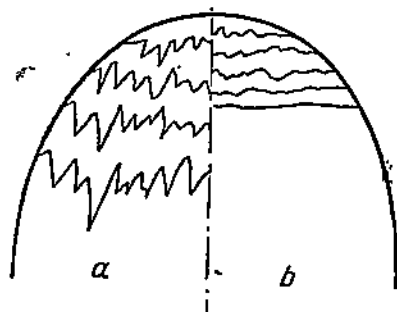
r — радиус изделия.

Из этой формулы видно, что с увеличением v_k уменьшается сечение стружки и возрастает работоспособность круга, так как нагрузка на одно зерно уменьшается, зерно меньше напрягается и способно совершить большую работу.

При увеличении скорости деформации металла для отделения стружки потребуется меньшее количество работы, так как соседний со снимаемой стружкой слой металла не будет успевать полностью деформироваться, на его деформацию будет затрачиваться меньшее количество работы. Существует в каждом конкретном случае предел, дальше которого при увеличении v_k количество снимаемой стружки

будет уменьшаться, так как металл не будет успевать деформироваться.

На фиг. 80 изображено режущее зерно круга. По В. Францу¹ зерно при скалывании во время шлифования раскалывается и дает новые режущие кромки. При этом при высокой окружной скорости круга скалывание будет происходить так, как изображено слева (а), а при малой v_k — как изображено справа (б). При высокой v_k режущие кромки получаются в большем количестве и более острыми. При этом работоспособность зерна повышается.



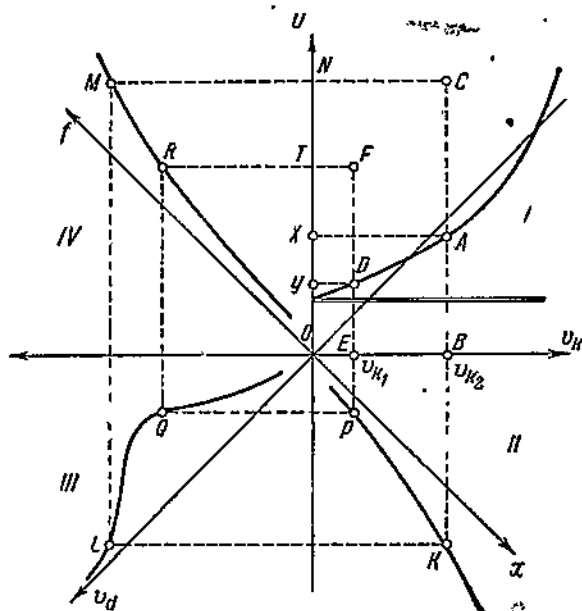
Фиг. 80.

Суммируя перечисленные влияния, строим диаграмму (фиг. 81). Для этой цели строим вспомогательные оси f — x и O — u_d , расположенные под углом 45° к основным осям диаграммы U и v_k . На полученных осях OX , Ov_d и O , строим зависимости U от толщины стружки, от скорости деформации и от формы расщепления зерна. Таким образом мы получаем диаграмму с 4 квадрантами.

В I квадранте дана зависимость работоспособности зерна от окружной скорости v_k точно так же, как на фиг. 76.

В II квадранте на оси, расположенной под 45° к главным осям координат, построена зависимость работоспособности U от толщины стружки q_s .

В III квадранте точно таким же способом дана зависимость U от скорости деформации v_d , в IV квадранте — зависимость от формы расщепления зерна f во время шлифования.



Фиг. 81:

¹ Werkstatt und Betrieb № 13/14, '1937, стр. 180; W. Franz, Исследование процесса шлифования корундовыми кругами на керамической связке.

При окружной скорости v_{k1} работоспособность зерна в I квадранте выражается отрезком DE . Учитывая влияние факторов, графически построенных в других квадрантах, или перенося точку D по пути $D-P-Q-R-T-F$, получим работоспособность зерна EF (работоспособность увеличилась на FD). При другой окружной скорости v_{k2} работоспособность зерна AB подобным же образом увеличивается до CB (приращение работоспособности CA).

Однако, несмотря на большую важность, ни одна из трех зависимостей, приведенных во II, III и IV квадрантах диаграммы, почти совершенно не исследована. Формула толщины стружки выведена Альденом¹ для «идеальной стружки», имеющей при отделении геометрически правильную форму, точно соответствующую кинематике процесса резания. В действительности же² при ударе зерна об изделие происходит пластический излом, и стружка отделяется по каким-то сложным кривым, вычисление характера которых является проблемой теории пластических деформаций. Последняя для металлов находится еще в зачаточном состоянии. Кое-какие указания по этому вопросу, относящиеся, к сожалению, в большей своей части к монокристаллам, а не к поликристаллам, и к хрупким телам, можно найти в работах Губкина, Кузнецова, Рейто, Надаи и акад. Курнакова.

В процессе шлифования работоспособность зерна выражается:

$$U = U_1 + U_2 - U_4,$$

где U_1 — живая сила зерна;

U_2 — потенциальная энергия деформируемых зерна и связки;

U_4 — работа, отнесенная к одному зерну и теряемая изделием ввиду того, что изделие вращается в обратную сторону по отношению к кругу (знак минус взят для случая шлифования против подачи, при шлифовании же по ходу подачи нужно брать знак плюс).

При шлифовании изделие вращается со скоростью v_u . Диаметр изделия за время T уменьшается от D_1 до D_2 . Тогда

$$v_u = \frac{\pi(D_1 + D_2) \cdot n_u}{2 \cdot 1000 \cdot 60} \text{ м/сек.}$$

Объем снятого при шлифовании металла

$$V = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2) \cdot L}{4},$$

где L — длина изделия.

Масса снятого за время T металла равна

$$m = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2) \cdot L \cdot \gamma}{4g},$$

где $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести;

γ — удельный вес шлифуемого металла.

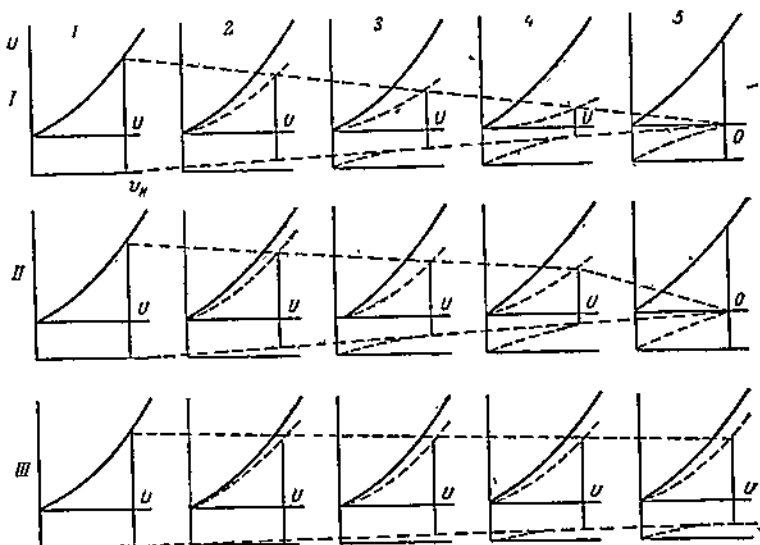
¹ Grits and Grinds, № 4, 1928 г.

² Maschinenbau, 1933, т. 12, № 2, стр. 53, статья К. Круга и Шлехтвега.

Снимаемая стружка, имеющая скорость v_n , несет запас работы U_4 . Эта работа в единицу времени (в секунду) выразится:

$$U_4 = \frac{\pi v_n^3}{2T} = 0,0000000027 \frac{(D_1^3 - D_2^3) (D_1 + D_2)^2 L n_n \gamma}{gT} \text{ кг м/сек.}$$

Здесь D_1 , D_2 и L выражены в метрах, T — в секундах, γ — в кг/м^3 , n_n — в об/мин.



Фиг. 82.

Ввиду того, что V_n при шлифовании не достигает больших значений, величина U_4 невелика.

На фиг. 82 показаны различные виды изнашивания шлифовального круга. Здесь дан последовательный ряд диаграмм работоспособности абразивного зерна по мере его изнашивания (положения 1—5). В каждом горизонтальном ряду (I, II и III) работоспособность абразивного зерна U постепенно уменьшается. Пунктирные линии дают границы отрезков работоспособности при постепенном изнашивании. Верхняя пунктирная линия дает постепенное понижение работоспособности зерна, зависящее от живой силы (уменьшение массы зерна при изнашивании, когда скорость круга v_k остается неизменной). Нижняя пунктирная линия дает уменьшение потенциальной энергии связки при ее постепенном ослаблении и высыпании из круга.

Ряд I диаграммы дает равномерную, но быструю потерю работоспособности зерна при его изнашивании. Ряд II соответствует старой точке зрения на самозатачивание. Вначале зерно и связка медленно изнашиваются, затем (момент 4), когда усилие шлифования превосходит прочность связки, зерно вырывается из связки и теряет работоспособность. В ряду III дано медленное изнашивание зерна и одновре-

менное медленное изнашивание связки. Это соответствует работе зерна по второй точке зрения на самозатачивание.

До сих пор мы рассматривали работоспособность одного режущего зерна. Для того, чтобы перейти к работоспособности всего шлифовального круга, необходимо знать количество режущих зерен, участвующих одновременно в процессе шлифования, т. е. произведение длины окружности шлифовального круга на величину продольной подачи круга (в случае шлифования с применением продольной подачи; при методе шлифования врезанием нужно брать ширину круга). Следовательно, необходимо знать количество режущих зерен на единице поверхности шлифовального круга. Для этого выше приведена разработанная автором табл. 7.

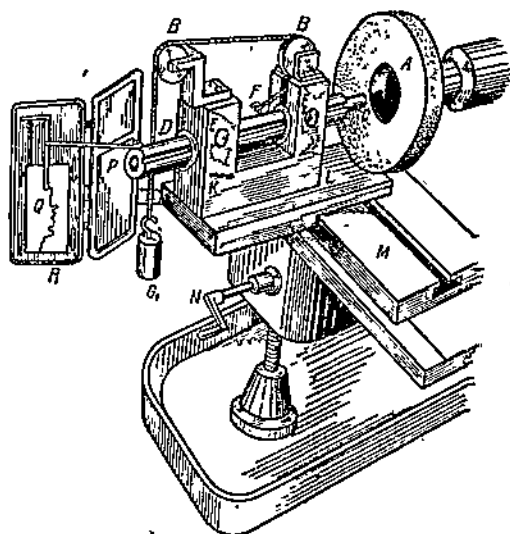
8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРУГА

Для исследования различных факторов, влияющих на процесс шлифования, автором был сконструирован и построен прибор, изображенный на фиг. 9 и 83.

На шпиндель заточного станка фирмы Пфутер навертывается специальная планшайба, на которую наклеивается подлежащий испытанию шлифовальный круг *A* (фиг. 83). Диаметр испытуемых кругов 200 мм. Планшайба имеет круговой буртик, охватывающий шлифовальный круг (для большей прочности). Круг наклеивается на планшайбу при помощи специального клея (смесь окиси меди с фосфорной кислотой). После наклейки круг просушивается в сушильном шкафу и испытывается на прочность клея путем сбрасывания планшайбы с наклеенным кругом с высоты 1,5 м на землю. Планшайба имеет ряд высверленных отверстий для более удобного выбивания кругов по окончании испытаний. Круг стачивается по толщине до 15 мм на токарном станке.

Корпус прибора *K* устанавливается на плите *L*, которая крепится на столе заточного станка *M*. Стол станка имеет ручное передвижение по горизонтали (в двух направлениях) и по вертикали (при помощи рукоятки *N*).

В бронзовых подшипниках корпуса *K* свободно передвигается в горизонтальном направлении пустотелый вал *D*; вал закален, про-



Фиг. 83.

шлифован и имеет снаружи паз, в который входят концы двух винтов *E*. Благодаря этому вал не может проворачиваться вокруг своей оси. Внутри вала *D* зажимается образец испытуемого металла *C* при помощи двух болтов, проходящих через вал *D*. Испытуемый образец *C* прижимается к шлифовальному кругу *A* действием груза *G*, который висит на шнуре, перекинутом через блоки *B* и укрепленном на крючке *F*. Тяга *P* соединена с рычагом самопишущего прибора *R*, на ленте которого *Q* вычерчивается диаграмма.

Чем больше сошлифовывается с образца материала, тем круче поднимается кривая. Самопишущий прибор имеет часовой механизм. Таким образом, получается диаграмма *G* — *T* (зависимость количества снятого металла от времени).

Величина *G* на диаграмме должна представлять собой изменение суммарной величины износа шлифовального круга и снятого металла. Но, как уже раньше указывалось, при самом большом грузе не удавалось при помощи индикатора обнаружить износа круга. Следовательно, *G* принималось в опытах за количество снятого металла.

Шлифовальный круг имеет постоянную скорость (3100 об/мин). Скорость резания v_k при испытании изменялась путем передвижения шлифуемого торца образца по радиусу круга (от центра к периферии). Шлифование производилось без охлаждения.

При испытании изменялись следующие условия:

- 1) скорость круга v_k от 5,5 до 31,5 м/сек;
- 2) нормальное давление (груз *G*) от 0,35 до 14,5 кг/см²;
- 3) величина подачи при правке круга алмазом от 0,009 до 0,775 мм/об;

4) испытуемые материалы: сырая быстрорежущая сталь ЭМ, сырая сталь ЭУ4 и подвергнутая термической обработке сталь 53а1. Химический состав стали 53а1, на которой проведены основные опыты: 0,17% С, 0,25% Мп, 1,53% Cr, 4,4% Ni, 0,99% W. Механические свойства стали: коэффициент крепости 116 кг/мм², относительное удлинение 13%, поперечное сужение 60%, твердость по Бринеллю 3,3 (диаметр отпечатка в мм).

5. Шлифовальные круги твердостей М₃, СМ₁, СМ₂, С и СТ₂ зернистостью 36 и 46 (структурные, литые и прессованные).

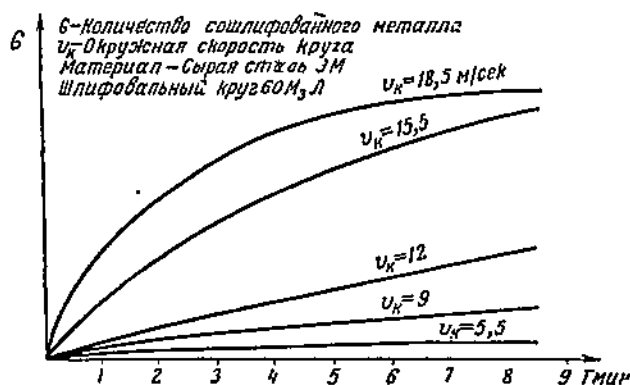
Правка круга алмазом производилась при глубине внедрения алмаза 0,05 мм/мин. Алмаз при правке зажимался на место образца *C* (фиг. 83).

Рассмотрим влияние различных факторов при шлифовании на результирующую способность круга или количество снятого материала по результатам, полученным автором при проведении его экспериментов. Не приводя всех материалов, рассмотрим некоторые характерные зависимости.

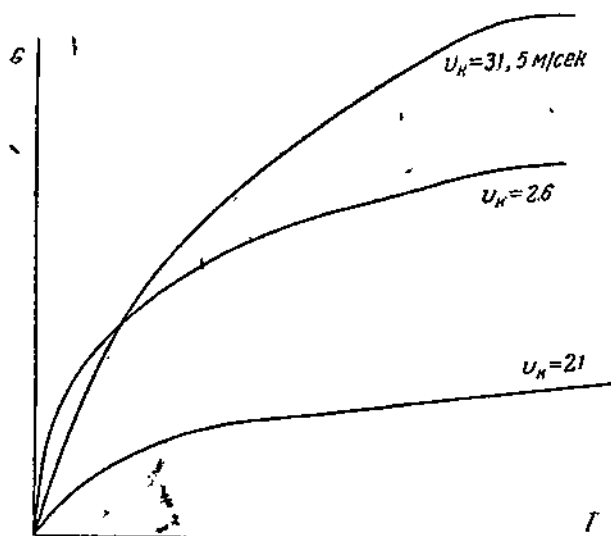
На фиг. 84 и 85 дано влияние скорости круга v_k . По оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат — количество снятого металла в граммах. В обоих случаях шлифование производилось на приборе (фиг. 83) алундовым кругом на керамической связке зернистостью 60 и твердостью М₃. Согласно фиг. 84 шлифовалась сталь ЭМ (сырая) при нормальном давлении 1,2 кг/см²; подача при правке была

0,175 мм/об. На фиг. 85 даны кривые для стали 53a1 (термически обработанной) при нормальном давлении 6 кг/см² и подаче при правке 0,009 мм/об.

В обоих случаях с увеличением скорости круга v_k увеличивается количество снятого материала.



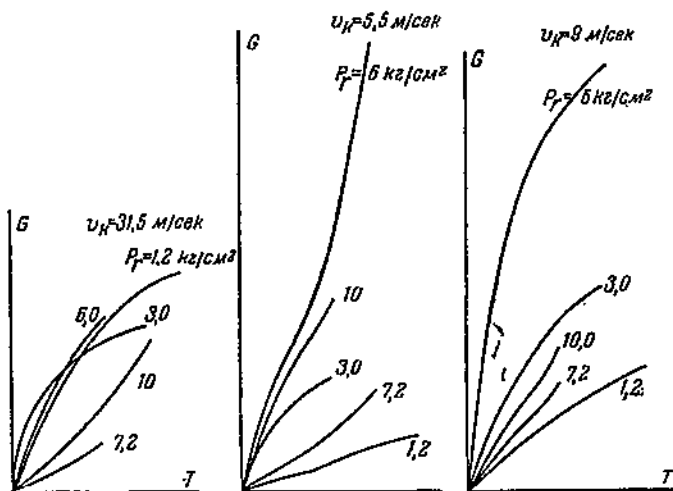
Фиг. 84.



Фиг. 85.

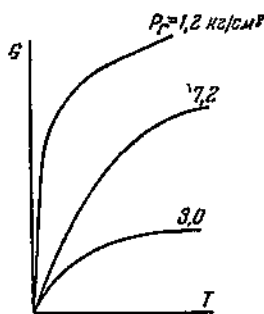
На фиг. 86 дано изменение количества снятого материала G в зависимости от изменения нормального давления P_n . Диаграммы построены для трех скоростей круга ($v_k = 5,5; 9$ и 31 м/сек). На этих кривых также видно, что с увеличением нормального давления (при одинаковой подаче при правке круга алмазом, а именно $S_d = 0,175$ мм/об, и для одной и той же термически обработанной стали 53a1)

количество снятого материала увеличивается (кривые зависимости G от T при увеличении P_r идут круче вверх, или получают тенденцию к более быстрому росту). Применялся алундовый шлифовальный круг твердостью СТ₂, зернистостью 36.



Фиг. 86.

Но это увеличение производительности круга с увеличением нормального давления наблюдается не всегда. Так бывает, когда нормальное давление выполняет свою полезную функцию, способствуя проникновению режущих точек круга в обрабатываемый материал. Когда же нормальное давление настолько велико, что оно сминает, притупляет режущие острия, то эти острия не проникают в материал, тангенциальное давление не срезает металл, а только залоснивает поверхность круга. При этом нужно учитывать и качество шлифуемого материала. Вот почему при известных условиях с увеличением нормального давления количество снятого металла не увеличивается, а наоборот — падает. На фиг. 87 дан пример шлифования на приборе (фиг. 83) термически необработанной стали ЭУ4 алундовым шлифовальным кругом 60 М₃ при подаче алмаза во время правки $S_d = 0,175$ мм/об и скорости круга 21 м/сек. Здесь максимальное количество металла снимается при нормальном давлении $P_r = 1,2$ кг/см², минимальное при 3 кг/см².



Фиг. 87.

Для подтверждения этого вывода (о засаливании круга) автором при исследовании работоспособности круга на приборе (фиг. 83) был проделан такой опыт. При шлифовании термически обработанной

стали 53a1 шлифовальным кругом 46C₁ (структура № 7 по шкале Нортона) вместо груза G был подвешен пустой резервуар для воды, создавший нормальное давление $0,6 \text{ кг/см}^2$. На ленте самописца были получены диаграммы, выражающие зависимость количества сошлифованного металла от времени для пяти различных скоростей круга (от 12 до 30 м/сек). Затем круг был заправлен при том же самом режиме правки, и на тех же скоростях круга снова снимались диаграммы. Но при втором опыте в резервуар наливалась с постоянной скоростью вода. Таким образом, по мере затупления круга нормальное давление равномерно повышалось, достигая в конце испытания при каждой скорости круга величины 5 кг/см^2 .

Оказалось, что при этом испытании с повышением нормального давления металла снималось несколько меньше при всех скоростях. Этот же опыт, повторенный от начала до конца для более мягкого круга (60 M₃) дал обратную картину — с увеличением нормального давления производительность повысилась.

Guest¹ считает нормальное давление при плоском шлифовании (или радиальное давление при круглом шлифовании) наиболее важным усилием для процесса образования стружки. Под влиянием этого усилия изделие прижимается к кругу, чем и определяется толщина стружки и производительность.

На фиг. 88 показано влияние подачи алмаза при правке круга. Шлифовалась термически обработанная сталь 53a1 при одном и том же нормальном давлении $P_r = 6 \text{ кг/см}^2$. Шлифовальный круг алундовый, твердость M₃, зернистость 60. Кривые даны для скоростей круга $v_k = 9; 12; 15,5; 18,5; 21$ и $31,5 \text{ м/сек}$. На всех кривых видно, что с увеличением подачи при правке от 0,009 до 0,35 мм/об количество снятого материала увеличивается.

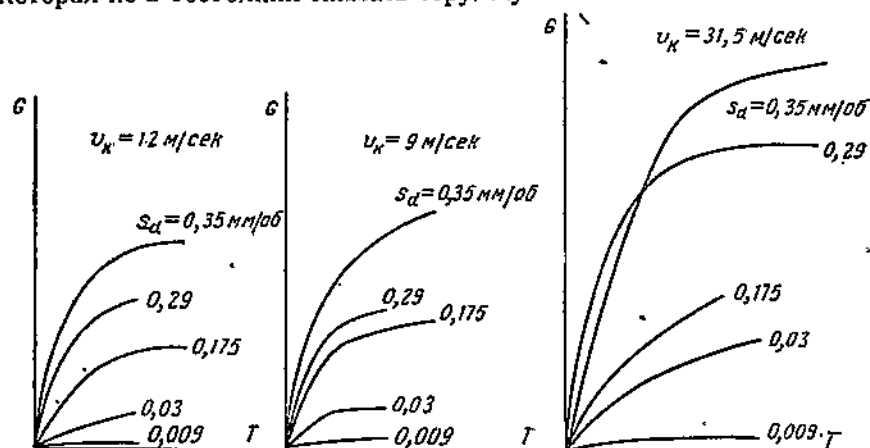
На фиг. 89 дано изменение количества снятого материала при шлифовании разных сталей — ЭМ, ЭУ4 и 53a1 при одинаковых прочих условиях: один и тот же во всех опытах алундовый шлифовальный круг 36СТ₃, нормальное давление 3 кг/см^2 , подача при правке круга 0,175 мм/об. Диаграммы даны для пяти скоростей круга (v_k от 12 до 31,5 м/сек).

Во всех случаях меньше снимается материала при шлифовании стали 53a1 (термически обработанной). Сталь ЭУ4 (сырая) вначале дает большое количество стружки, но потом кривая быстро снижается. Кривая для сырой стали ЭМ неуклонно поднимается. Характер диаграмм выдерживается примерно одинаковым при всех скоростях круга.

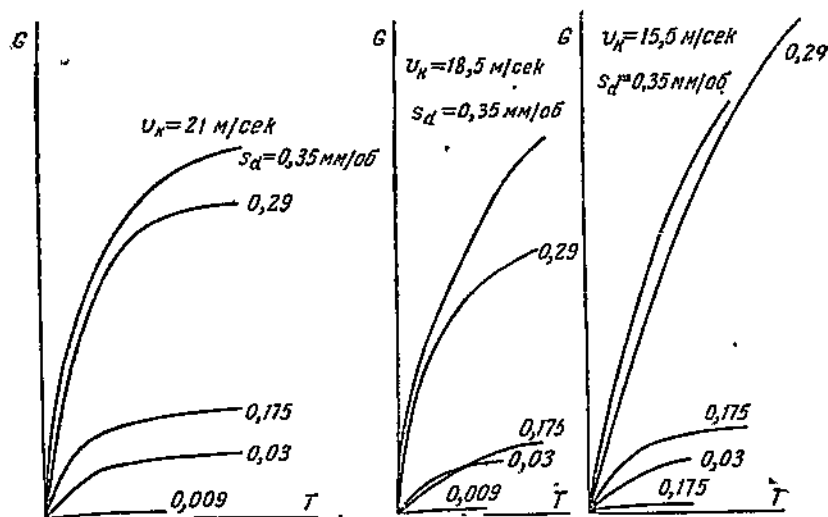
Увеличение режущей способности круга при увеличении подачи алмаза при правке объясняется следующим образом. При правке алмаз проходит по шлифовальному кругу в одну и в другую сторону в направлении продольной подачи и образует на поверхности круга выступающие ромбы, размеры которых зависят от величины подачи и глубины, взятых при правке, и от способностей абразивных зерен в разной степени срезаться или выкрашиваться под действием острья

¹ J. Guest, «Grinding Machinery», 1915.

алмаза. При малой подаче размеры этих выступов столь малы, что при шлифовании они не способны цепляться за шлифуемый металл и вырывать из него частицы. При достаточно малой подаче во время правки круга можно получить почти абсолютно гладкую поверхность круга, которая не в состоянии снимать стружку.



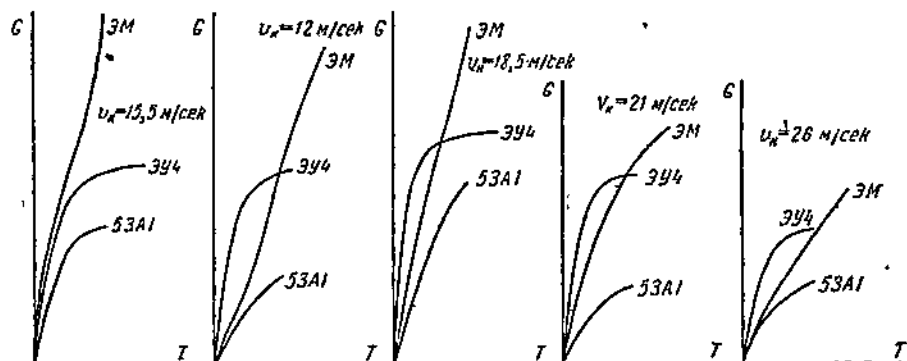
Фиг. 88.



Фиг. 88а.

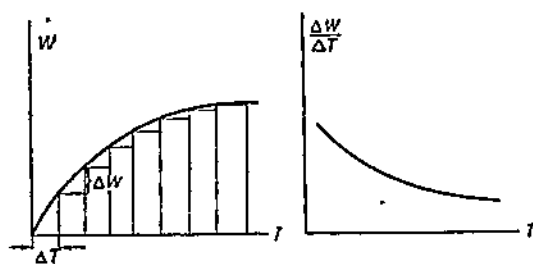
Увеличение количества снимаемого металла при увеличении нормального давления P_r объясняется следующим образом. Нормальное давление обуславливает проникновение режущих зерен в обрабатываемый металл. Чем глубже зерна проникнут в металл, тем более толстая стружка будет снята тангенциальным давлением. Зерна карборунда глубже проникнут в металл, нежели зерна корунда, так как

зерна карборунда при одинаковом режиме правки круга алмазом острее и прочнее зерен корунда.



Фиг. 89.

На фиг. 90 слева схематически показана кривая, полученная непосредственно на самопишущем приборе (фиг. 83) и дающая зависимость количества снятого металла от времени. Справа дана преобразованная (дифференциальная) кривая. По оси ординат, отложены приращения количества снятого металла через промежуток времени ΔT . Наиболее наглядными и удобными ока-

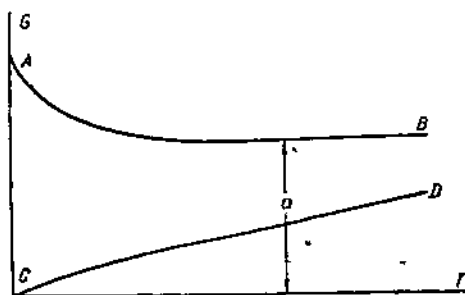


Фиг. 90.

зались диаграммы при выборе масштаба $T = 0,5$ минуты.

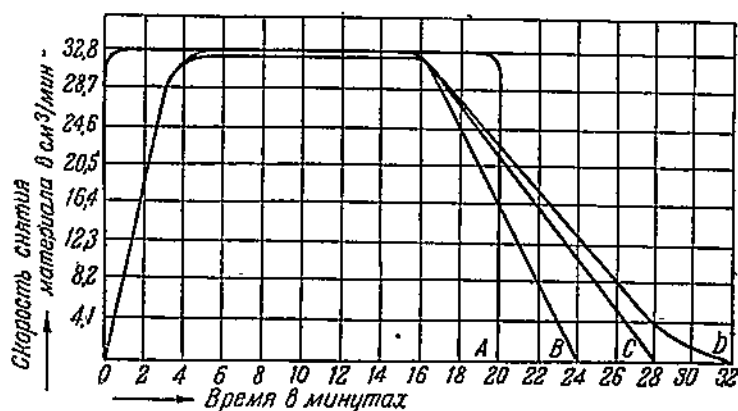
На всех снятых автором диаграммах характер кривых таков, что по мере затупления круга подъем кривых замедляется. Совершенно тупой круг совсем не снимает с изделия металла. На диаграмме тупого круга кривая (фиг. 90, слева) переходит в горизонтальную прямую, на правой же части диаграммы кривая сливается с осью абсцисс.

Чем большее количество времени работает шлифовальный круг, тем более понижается количество снимаемого металла. Это объясняется с одной стороны ухудшением гео-



Фиг. 91.

метрии режущих кромок абразивных зерен, с другой стороны тем, что шлифовальный круг при затуплении теряет свою круглую форму и не все режущие зерна принимают участие в резании.



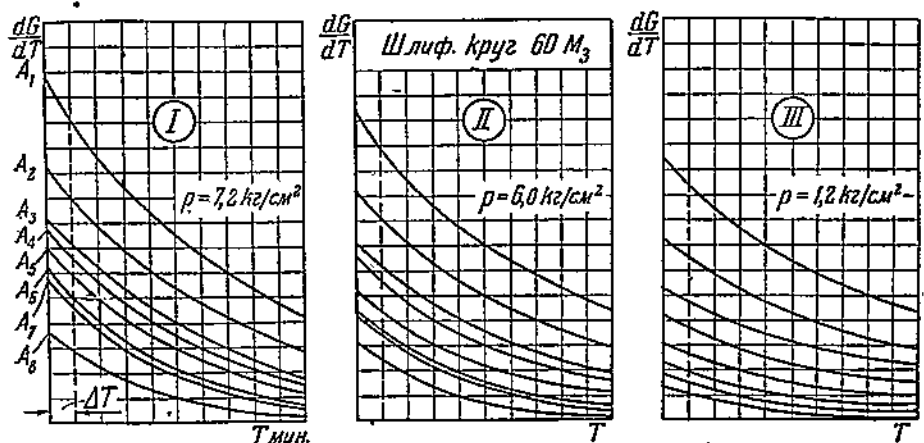
Фиг. 92.

На фиг. 91 представлен случай самозатачивания (в понимании этого термина В. Францем ¹⁾ алундового круга на керамической связке твердостью M_3 , зернистостью 60 при шлифовании на приборе (фиг. 83) термически необработанной быстрорежущей стали ЭМ при $v_k = 12$ м/сек, подаче при правке круга алмазом 0,175 мм/об и при нормальном давлении 1,2 кг/см². Кривая CD, полученная самописцем, вначале имеет изгиб, затем переходит в наклонную прямую. Кривая AB через 0,25 минуты вначале падает, что соответствует изнашиванию режущих кромок, образованных во время правки алмазом; затем кривая переходит в горизонтальную прямую, которая до конца опыта (в течение 30 минут) идет на постоянном расстоянии a от оси абсцисс. Количество снимаемого металла не изменяется. В этом случае характеристика шлифовального круга подобрана так, что на режущей поверхности круга во время процесса шлифования непрерывно образуются новые режущие кромки. Свойства зерен (хрупкость, прочность и т. д.) таковы, что выступающие микроскопические частицы зерен под действием усилия резания обламываются, расщепляются и дают новые острия, которые постепенно снимают металл и затупляются, увеличивая давление резания. Когда давление резания превзойдет прочность этих кромок, они также расщепляются, порождая новые режущие острия. Выкрашивания целых зерен не происходит, так как износ круга после 30-минутного опыта невозможно было обнаружить при помощи индикатора.

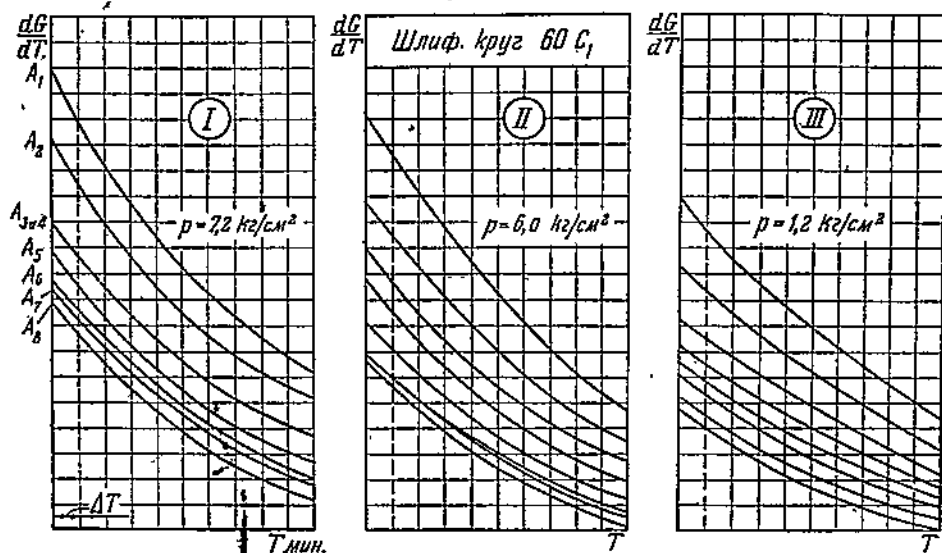
Р. Е. Harrison считает, что количество снятого материала при шлифовании не остается постоянным при всех прочих одинаковых условиях, но изменяется в начале и в конце шлифования. Harrison разбивает процесс шлифования на три фазы (фиг. 92); первоначальную фазу

¹ Werkstatt und Betrieb, № 13/14, 1937, S. 180.

рабочего цикла (около 4 мин.), период максимальной производительности и заключительную фазу рабочего цикла, продолжительность которой зависит от требований, предъявляемых качеству поверхности. При обычном шлифовании (кривая В на фиг. 92) последняя фаза длится 8 мин., при лучшем качестве поверхности (кривая С) 12 мин. и при наилучшей чистоте 16 мин.



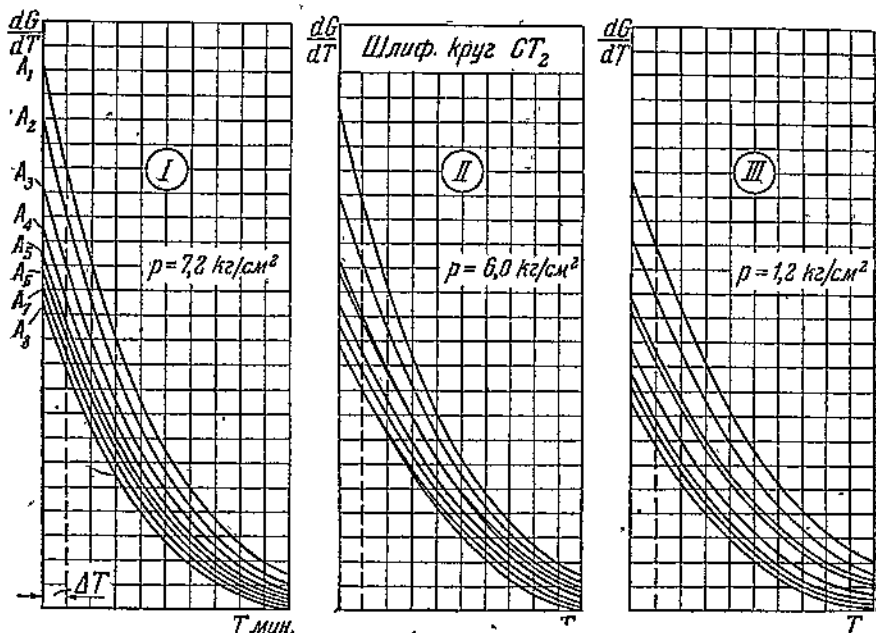
Фиг. 93.



Фиг. 94.

Малая производительность во время первоначальной фазы объясняется тем, что вначале шлифовальный круг обрабатывает эксцентричное изделие (для случая круглого шлифования), иногда конусное,

иногда с окалиной. Вначале изделие обычно пружинит. По достижении ровной поверхности изделия в течение первоначальной фазы наступает фаза максимальной производительности круга при установившихся условиях шлифования и полном использовании мощности станка. При этом производительность сохраняет постоянную величину. Во время заключительной фазы, когда снимается последний слой в 0,05—0,08 мм, степень отделки поверхности и точность обработки требуют замедления процесса шлифования. На фиг. 92 показана кривая А при идеальном процессе шлифования (без первоначальной и заключительной фаз).

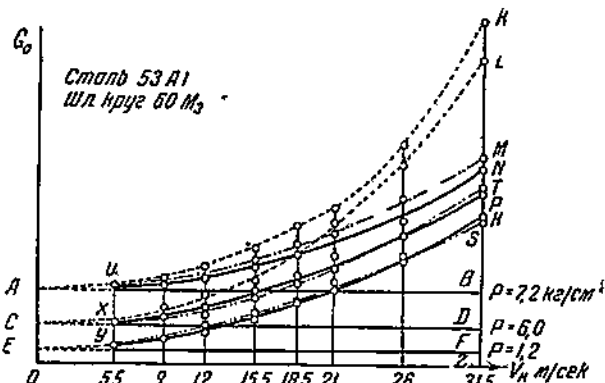


Фиг. 95.

На фиг. 93 в положениях I, II и III даны дифференциальные кривые (ср. фиг. 90) для экспериментов с различным нормальным давлением ($P_r = 1,2; 6$ и $7,2 \text{ кг/см}^2$); при каждом из трех давлений нанесены кривые для 8 различных скоростей круга (от 5,5 до 31,5 м/сек). Чем больше v_k , тем выше расположена кривая. Чем больше нормальное (радиальное) давление, тем глубже зерна проникают в изделие, тем большее количество зерен и связки деформируется, тем большая доля U_2 затрачивается при шлифовании. Но нужно отметить, что с увеличением P_r дифференциальные кривые располагаются более круто, так как при этом круг быстрее тупится, засаливается и снимает меньше материала. При шлифовальных кругах большой твердости дифференциальные кривые располагаются более круто, нежели при мягких кругах. На фиг. 94 и 95 показаны эти же кривые при тех же давлениях P_r для кругов твердостей C_1 и CT_2 .

Продолжая дифференциальные кривые плавно влево до пересечения с осью ординат, получим на оси ординат ряд точек A_1, A_2, A_3 . Величина ординат до этих точек представляет собою режущую способность только что заправленного шлифовального круга. Обозначим эту режущую способность G_0 . В дальнейшем будем рассматривать лишь G_0 (для острого круга), чтобы освободиться от влияния изменения режущей способности в зависимости от затупления круга, которое в свою очередь зависит от большого числа действующих факторов.

Получив таким образом значения G_0 , откладываем их (фиг. 96) по оси ординат для различных скоростей круга v_k (от 5,5 до 31,5 м/сек). Для давления $P_r = 7,2$ кг/см² получим кривую UK , для $P_r = 6$ кг/см² — кривую XL . Но вследствие различных скоростей круга v_k в каждом опыте в единицу времени шлифовальный



Фиг. 96.

круг проходит различный путь. Не учитывая различия в скорости деформации обрабатываемого металла при разных скоростях круга, пересчитываем ординаты кривых UK и XL для одной и той же длины пути шлифования. Мы получим кривую UN для $P_r = 7,2$ кг/см² и кривую XP для $P_r = 6$ кг/см². Таким же способом получена кривая YR для $P_r = 1,2$ кг/см². Эти кривые выражают изменение G_0 , т. е. режущей способности только что заправленного шлифовального круга с изменением v_k при шлифовании стали 53А1 алундовым шлифовальным кругом 60Мз.

На фиг. 97 и 98 показаны подобные кривые изменения режущей способности острого круга в зависимости от изменения v_k для тех же трех давлений (1,2; 6 и 7,2 кг/см²) для более твердых шлифовальных кругов.

Подсчитаем для круга, которым производилось шлифование (зернистость 60), составляющую работоспособности U_1 (фиг. 76) по живой силе режущих зерен.

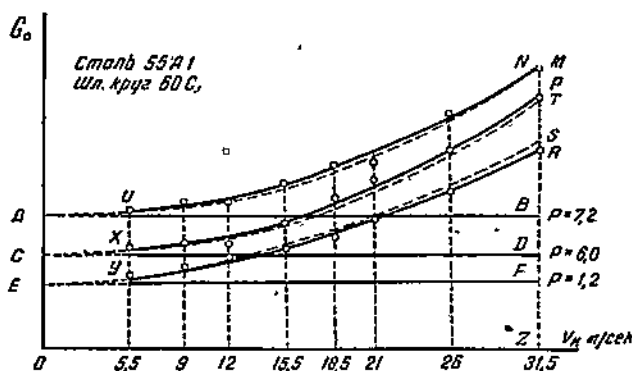
Для зернистости 60 диаметр зерна 0,2 мм. Объем одного зерна, как среднее между кубом и шаром, выражается в 0,0061 мм³.

При удельной весе алунда $\gamma = 0,0039$ г/мм³ живая сила одного зерна

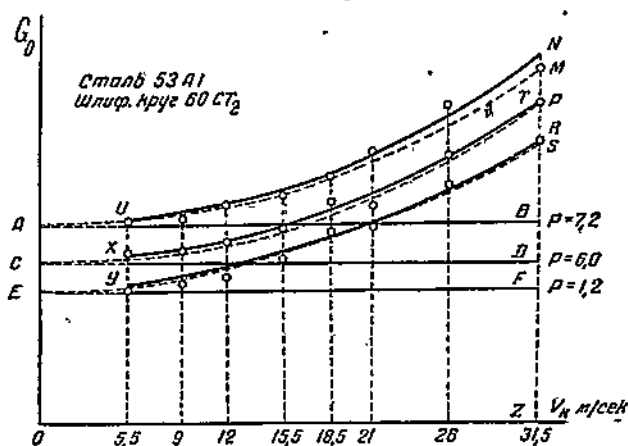
$$\frac{v_k^2}{2} = \frac{0,0039 \cdot 0,0061 \cdot v_k^2}{2 \cdot 9,81} = 122 \cdot 10^{-8} \cdot v_k^2.$$

Ширина образца при шлифовании $S = 8$ мм. Число режущих

зерен на 1 мм^2 (по табл. 7). для среднего номера структуры, к которому можно приравнять круги с нерегулируемой структурой, $l = 9$.



Фиг. 97.



Фиг. 98.

Работоспособность U_1 для всей поверхности круга $\pi D_k S$ выразится

$$U_1 = \frac{M v_k^3}{2} = \frac{\pi v_k^3}{2} \cdot l \cdot \pi \cdot D_k \cdot S = 122 \cdot 10^{-8} \cdot 9,8 \cdot \pi D_k^2 v_k^3 = \\ = 275 \cdot 10^{-8} \cdot D_k \cdot v_k^3,$$

где M — масса режущих зерен на поверхности круга, участвующих в резании, D_k — диаметр круга, выраженный в мм. Скорость круга v_k выражена в м/сек. Шлифовальный круг делает 3100 об/мин или 51,7 об/сек. Живая сила U_1 создает мощность

$$N = U_1 \cdot 51,7 = 0,0142 \cdot D_k \cdot v_k^2 \text{ гм/сек.}$$

Тангенциальное давление, соответствующее N , выразится:

$$P_1 = \frac{0,0142 \cdot D_k \cdot v_k^2}{v_k} = 0,0142 \cdot D_k \cdot v_k.$$

Подставляя соответствующие значения, получим табл. 18.

Таблица 18

D_k мм	35	55	75	115	130"	160	196
v_k м/сек	5,5	9	12	15,5	21	26	31,5
P_1 г	2,72	7,03	12,08	21	39	59	88

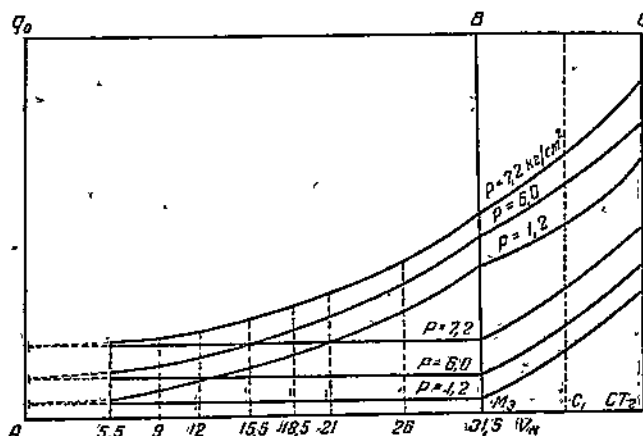
На фиг. 96 продолжаем кривые G_0 (UN , XP и YR) плавно влево до пересечения с осью OG_0 и проводим через точки A , C и E горизонтали AB , CD и EF . Мы получим на фиг. 96 три диаграммы, подобные диаграмме работоспособности (фиг. 76). Чтобы отчетливее показать это, строим кривые UM , XT и YS для трех различных P_r (1,2; 6 и 7,2 кг), откладывая по оси ординат значения P_1 из табл. 18. Мы видим, что кривые G_0 и P , полученные экспериментальным и расчетным путем, имеют одинаковый характер изменения. Таким образом количество снятого металла или режущая способность круга пропорциональна его работоспособности. На фиг. 96 в любом месте ордината NZ пропорциональна полной работоспособности, P_1 или BV пропорциональна живой силе режущих зерен U_1 (по аналогии с фиг. 76) и P_2 или BZ пропорциональна работе U_2 , производимой за счет совместного сопротивления зерен на скалывание и связки на истирание.

Диаграммы фигур 96, 97 и 98 обобщены на фиг. 99, где справа построена зависимость G_0 от K (по фиг. 97 и 98). Таким образом мы получили знакомую нам диаграмму, аналогичную диаграмме работоспособности круга в трех измерениях (фиг. 77).

Составляющая работоспособности U_1 имеет размерность кг·м. При экспериментах мы получили кривые, дающие значения режущей способности, пропорциональные значениям работоспособности (например, на фиг. 96, отрезок PD для $P_r = 6 \text{ кг/см}^2$ и $v_k = 31,5 \text{ м/сек}$). Экспериментальные кривые имеют другую размерность (здесь мы имеем вес снимаемого металла в единицу времени). Следовательно, мы легко можем перейти от масштаба работоспособности к масштабу режущей способности. Мы можем получить в точном количественном выражении и значение U_2 , т. е. работу, совершаемую за счет напряжения зерна и связки. В наших экспериментах тангенциальное давление P_2 , создаваемое за счет напряжения зерна и связки (соответственно работоспособности U_2) выражается табл. 19 и фиг. 100.

Возьмем отношение количества снятого металла G_0 к работоспособности круга U_2 . Мы получим коэффициент работоспособности α , который можно определить для любой степени затупления круга. Так, для абсолютно острого круга

$$\alpha_0 = \frac{U}{G_0} = \frac{U_1}{G_0} + \frac{U_2}{G_0}.$$



Фиг. 99.

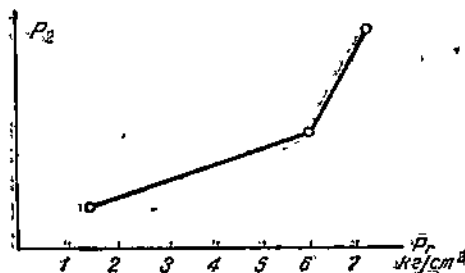
Для круга при какой-то степени затупления (берем G по диаграмме через определенное количество минут работы круга) имеем

Таблица 19

Шлифовальный круг: алунд;
зерно 60

Твер- дость	Тангенциальное усилие зерна P_2 в г при нормаль- ном давлении P_T в кг/см ²		
	1,2	6,0	7,2
M_2	10	27	53
C_1	44	61	86
CT_2	85	102	128

$$\alpha_x = \frac{U}{G_x}.$$

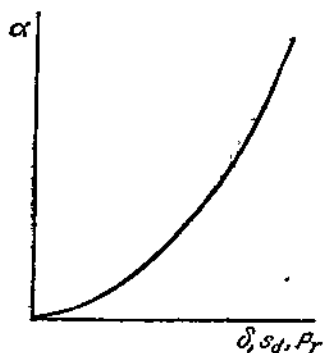


Фиг. 100.

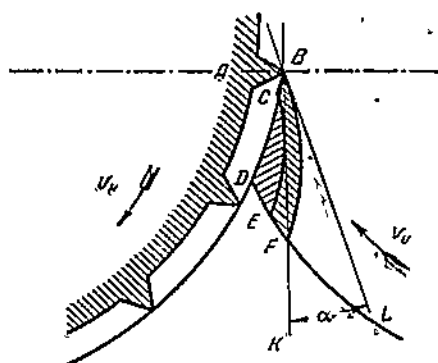
Здесь величины U_1 и U_2 для одного и того же круга и режима не меняются.

Коэффициент работоспособности α связывает все условия, влияющие на процесс шлифования. Величина U_1 в выражении для α зависит от зернистости круга, удельного веса абразивных зерен, геометрических размеров круга, продольной подачи при шлифовании s и ско-

рости круга v_k . Величина U_a зависит от твердости круга, нормального давления, поперечной подачи при шлифовании и свойств зерна и



Фиг. 101.



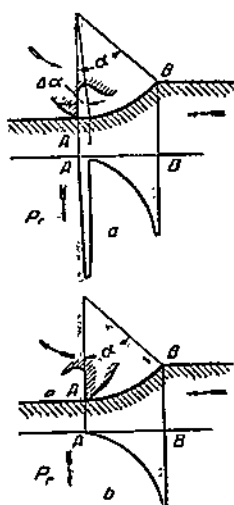
Фиг. 103.

на основании эксперимента судить о работоспособности круга, т. е. о главной характеристике круга, наиболее важной для практической работы. Определение α является наиболее полным испытанием работы шлифовального круга. На фиг. 101 дается зависимость α от твердости круга δ , подачи при правке круга алмазом s_d (при постоянной глубине внедрения алмаза) и нормального (радиального) давления P_T .

9. ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

При шлифовании образуется больше теплоты, нежели при всяком другом способе снятия стружки, так как режущие зерна в большей своей части имеют отрицательный передний угол.

На фиг. 102 показано ¹ распределение радиального давления при фрезеровании. Вверху (а) фрезерование производится методом против направления подачи (направление вращения фрезы и движение изделия противоположны), внизу (б) — фрезерование по направлению подачи. В случае а в момент врезания зуба фрезы в изделие радиаль-

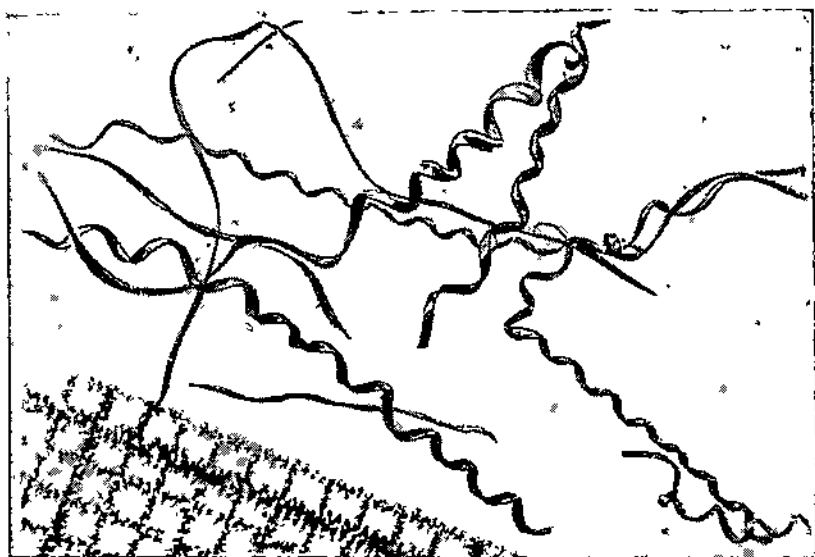


Фиг. 102.

связки. Величина G зависит от механических качеств обрабатываемого материала, режима правки круга алмазом, конструкции станка и общих условий работы. Таким образом, коэффициент работоспособности α охватывает все стороны процесса шлифовании и дает возможность

¹ G. Schmalz, «Technische Oberflächenkunde», 1936.

ное давление резко возрастает и быстро падает, плавно затем поднимаясь по мере увеличения толщины стружки. При фрезеровании по направлению подачи (b) радиальное давление падает по мере уменьшения толщины стружки.



Фиг. 104.

Аналогичная картина имеет место при шлифовании. На фиг. 103 схематически показан метод круглого шлифования против направления подачи. В этом случае очень труден момент врезания режущей грани в изделие. Так как угол α между касательными BK и BL очень мал, то зерно A вначале не режет, а на участке BC , скалываясь, трется об изделие, создавая большое радиальное усилие и силу трения; работа этих сил переходит в теплоту. Дальше точки C , когда напряжения от совместного действия тангенциального и радиального усилий превысят временное сопротивление деформируемого изделия, начнется отделение стружки CDE , но не BDF , причем характер линии CE должен быть определяем по правилу вычисления линий наибольшего напряжения при сдвиге (пластическая деформация).

Следовательно, при способе шлифования (и фрезерования) против направления подачи образуется больше теплоты, нежели при шлифовании по направлению подачи. Об этом свидетельствуют исследования Hutchinson ¹.

Теплота при шлифовании образуется от трения режущего зерна о стружку и от внутреннего трения элементов деформируемой стружки.

Рассматривая форму идеальной стружки (имеющей геометрические размеры, точно соответствующие кинематике движения зерна и из-

¹ SAE, March 1938, p. 89.

делия, без учета пластических деформаций), мы видим, что длина отделяемой при шлифовании стружки обычно не превышает 2—3 мм. Однако в практике шлифования мы имеем очень длинные стружки в несколько десятков миллиметров. На фиг. 104 представлена стружка, полученная при бесцентровом шлифовании (увеличение 6 раз).

Длинная стружка получается потому, что при большом количестве теплоты, выделяющемся при шлифовании, отдельные короткие элементы стружки свариваются или сплавляются друг с другом по мере отделения. Чем тверже и мелкозернистее шлифовальный круг, чем тверже материал изделия, чем больше количество удаляемого материала, тем длиннее сваренная стружка¹. Особенно длинная стружка получается при шлифовании чашкообразным кругом.

Шлифовщики-практики считают режим шлифования и характеристику круга правильными, когда при шлифовании снимается стружка, имеющая на первый взгляд вид маленьких шариков, но эти шарики представляют собой свернутую клубком лентообразную стружку. Такой шарик легко растянуть в спираль.

Теплота, образующаяся при шлифовании, имеет большое практическое значение. Под влиянием этой теплоты изделие может деформироваться (прогибаться), изменяется качество его поверхности и на поверхности получаются трещины. При помощи шлифования можно отпустить закаленную сталь и при известных условиях закалить термически необработанную сталь. Murdock² производил поверхностную закалку на значительную глубину пуансонов, изготавливаемых из стали, закаливающейся в масле, при помощи шлифования пуансонов мягким кругом, поверхность которого смазывалась слоем воска, разведенного в свином сале. Murdock утверждает, что такой способ закалки пуансонов дешевле обычной термообработки.

При шлифовании повышается температура стружки и изделия. Так как объемы металла стружки и изделия (при одном и том же количестве теплоты) резко различны, то температура стружки может подниматься до степени плавления металла (длинная сплавленная стружка) и выше, когда стружка сгорает с образованием искр в процессе шлифования.

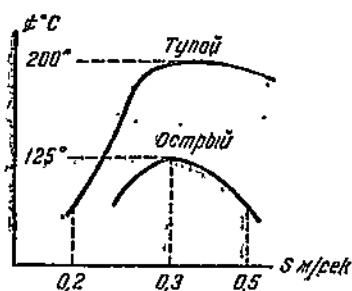
Температура же изделия, имеющего большую массу, не достигает таких высоких значений. Crisan³ определял температуру при разрезании металла узким кругом при скорости круга $v_k = 80 \text{ м/сек}$. В его опытах обрабатываемая деталь представляла собой термопару. Кусок никеля был сварен с куском железа. Шлифование производилось по месту сварки железа и никеля. Железная часть изделия была соединена с милливольтметром железной проволокой, никелевая часть изделия — никелевой проволокой. На фиг. 105 дано изменение температуры изделия в опытах Crisan при нормальных условиях работы в зависимости от величины подачи и степени затупления круга. Максимальная температура, которую получил Crisan, была 350°C .

¹ J. Guest, «Grinding Machinery», 1915.

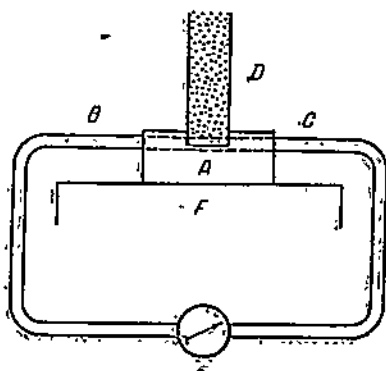
² G. J. Murdock. «Hardening by Grinding»—American Machinist, L. Febr. 13, 1932, № 1, p. 7.

³ Das Werkzeug, 1931, № 12, 133/5.

D. A. Wallace¹ сообщает, что при исследовании шлифования в лаборатории фирмы Chrysler Corporation температура поверхности изделия достигала 600—800° F (315—426° C).



Фиг. 105.



Фиг. 106.

При опытах автора температура определялась при шлифовании на плоско-шлифовальном станке. На магнитный стол станка (фиг. 106) было установлено приспособление A, состоящее из двух плиток, соединенных болтом. В выемке между плитками была зажата изолированная термопара хромель-алюмель (BC). Концы термопары были присоединены к гальванометру E. Шлифовальный круг D в процессе резания перерезал проволоку термопары диаметром 3,5 и 4 мм по месту спая. При этом осуществлялась только продольная подача стола станка и изменялась глубина резания. Шлифование производилось без охлаждения.

Табл. 20 дает относительное изменение температуры при различных режимах шлифования и различных шлифовальных кругах в описываемых опытах.

Подобные же результаты получаются при экспериментах с термопарой другого вида (фиг. 107). Шлифовальный круг A шлифует плитку B, в прорез которой F вставлен спай концов проводников термопары хромель-алюмель. Другие концы проводников термопары присоединены к гальванометру C. Когда шлифовальный круг дойдет до спая, гальванометр покажет максимальную температуру, которая имеет место при шлифовании металла проводников термопары.

J. Guest² дает формулу для вычисления температуры отделяемой при шлифовании стружки

$$T^{\circ}\text{F} = \frac{33000H}{2 \cdot J \cdot k \cdot p \cdot m},$$

предполагая, что половина получаемого при шлифовании тепла идет в стружку.

¹ Machinery, № 1, August 1938, 12, p. 858—Superfinish.

² J. Guest, «Grinding Machinery», 1915.

Таблица 20

Опыт №	Шлифовальный круг				Режим шлифования				Q количество удаленного металла мм ³	T максимальная температура круга °C
	материал	зернистость и твердость	D _к мм	ширина круга мм	t глубина мм	s продольная подача мм	$q = b \cdot t$ мм ²	v_k м/сек		
1	Алюминий связка керамическая	46 CM	90	12	0,025	18 двойных ходов в мин.; длина хода 150 мм	0,3	14,6	180	200
2			90	12	0,050		0,6	14,6	172	300
3			90	12	0,075		0,9	14,6	168	340
4			90	12	0,075		0,9	14,6	216	340
5			90	12	0,025		0,3	14,6	184	200
6			90	12	0,050		0,6	14,6	188	310
7			90	12	0,050		0,6	14,6	45	240
8			172	16	0,025		0,4	27	208	190
9			172	16	0,050		0,8	27	212	315
10			172	16	0,075		1,2	27	212	380
11			172	16	0,025		0,4	27	172	380
12			172	16	0,050		0,8	27	192	420
13			172	16	0,0125		0,2	27	216	480

В этой формуле:

H — мощность на шлифовальном круге;

m — объем удаляемого металла в дюйм/мин.;

J — механический эквивалент тепла в футо-фунтах;

k — удельная теплоемкость материала (в английской системе);

ρ — удельный вес материала в фунт/дюйм³.

В частном примере: $K = 0,113$; $m = 0,18$; $J = 778$ футо-фунтов; $\rho = 0,284$ фунт/дюйм³, $H = 2$ л. с. на 1" ширины круга; при этом

$$T = \frac{33000 \cdot 2}{2 \cdot 778 \cdot 0,113 \cdot 0,284 \cdot 0,18} = 7250^\circ \text{ F.}$$

Данный материал плавится при 3250° F. Следовательно, стружка при 7250° F может расплавиться и сгореть.

Исследуя вопросы теплообразования при шлифовании, Hutchinson на основании теоремы Герца считает, что затупление круга δ пропорционально квадратному корню из нормального усилия P_r или

$$P_r \approx \delta^2.$$

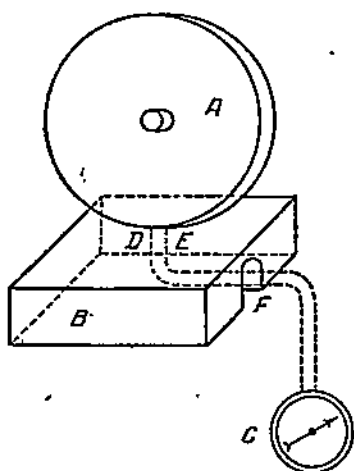
При этом δ пропорционально длине сферической режущей кромки абразивного зерна с радиусом r_s . Изменение расстояния между центрами круга и изделия (величина отжима круга от изделия) пропорционально P_r или δ^2 . Длина пути, по которому скользит зерно, создавая силу трения, при врезании в изделие в начале стружки (при шлифовании против хода подачи), также пропорциональна P_r . Предполагая постоянный коэффициент трения между затупившимся кругом и изделием, найдем, что работа трения в продолжение этого скольжения пропорциональна

$$\frac{P_r \delta^2}{2}.$$

Таким образом, пренебрегая действием охлаждения, получим, что повышение температуры круга и изделия пропорционально приведенному значению.

Вопрос о влиянии теплообразования при шлифовании на изменение структуры металла очень сложен. Изделие при шлифовании подвергается в какой-то степени дополнительной термообработке. Всякая термообработка определяется следующими условиями: 1) продолжительностью нагрева изделия; 2) достигнутой температурой; 3) продолжительностью выдержки при этой температуре; 4) скоростью охлаждения.

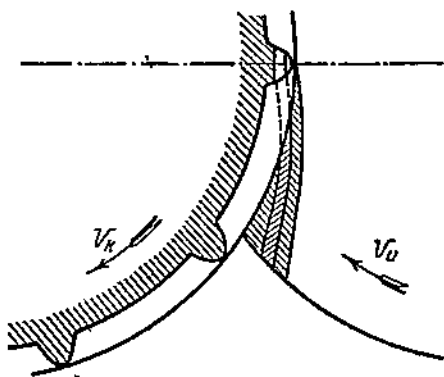
Эти четыре фактора достаточно изучены для условий термической обработки наиболее употребительных в производстве сталей. Но ни одна из этих величин не известна для условий шлифования, при которых все тепловые процессы происходят в очень короткие промежутки времени, ни в какой мере даже не приближающиеся к условиям обычной термообработки. Условия теплообмена при шлифовании (в зависимости от формы и физических качеств проводя-



Фиг. 107.

щих тепло элементов) также совершенно не изучены. Изучение микроструктуры верхнего слоя металла, в котором отразилось влияние шлифования, затрудняется малой толщиной затронутого слоя и трудностью изготовления и обработки микрошлифов для такого слоя. До сих пор не выяснен характер верхнего прижженного при шлифовании слоя, имеющего различные цвета побежалости.

По мере затупления шлифовального круга увеличивается количество выделяемой теплоты и повышается температура стружки и изделия. На фиг. 108 видно, что затупившиеся зерна имеют более широкую верхнюю площадку, на которую действует радиальное усилие и создает силу трения, величина которой пропорциональна опорной площади (предполагая коэффициент трения постоянным).



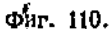
Фиг. 108.

Количество удаляемого материала при затуплении круга уменьшается, так как тупое зерно плохо проникает в изделие. Увеличив-

шееся радиальное давление сильнее отжимает круг из изделия, уменьшившиеся по высоте (хотя и незначительно) зерна захватывают материал изделия на меньшую глубину (фиг. 108).

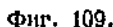
При исследовании работоспособности шлифовального круга на приспособлении (фиг. 83) с постоянным нормальным давлением мы получили на самопишущем приборе кривую OG (фиг. 109) количества снятого металла, в зависимости от времени (по оси OT отложено время в минутах). Обработывая кривую OG вышеописанным образом (фиг. 90), мы получаем кривую O_1U_a , которая дает приращение количества снятого материала через каждые 0,25 мин. Иными словами, кривая O_1U_a дает изменение полезной мощности, затрачиваемой на снятие стружки, в зависимости от времени.

При шлифовании работа расходуется по двум направлениям: на снятие стружки и на образование теплоты, включая сюда внешнее и внутреннее трение зерна, связки и стружки. Площадь диаграммы между кривой O_1U_2 и осью абсцисс OT дает мощность, затрачиваемую на полезную работу (отделение стружки). Величина U_1 представляет собой, как было выведено ранее, работоспособность острого (еще не работавшего после правки) круга. Следовательно, площадь под прямой O_1T_1 выражает полную работоспособность круга при данном режиме правки его алмазом.

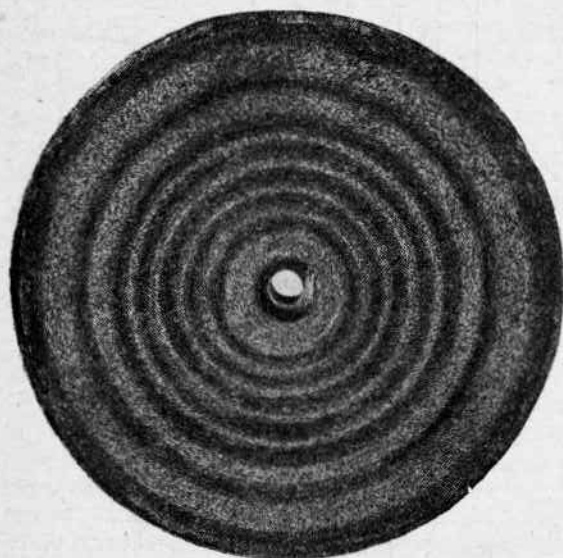


Разница между U и U_0 , т. е. величина U_0 является работой, затрачиваемой на образование теплоты, а площадь между O_1T_1 и кривой O_1U_0 соответствует мощности, ушедшей на образование теплоты. С течением времени, по мере затупления шлифовального круга, значение U_0 увеличивается.

Подобно тому, как мы обрабатывали кривую OG , обработаем кривую O_1U_e , откладывая по оси ординат приращения выделяемой при шлифовании теплоты через 0,5 минуты. Кривая QQ , построенная относительно оси абсцисс O, T_1 , дает приращения тепла.



На фиг. 110 две кривые теплообразования построены в перевернутом виде по отношению к тем же кривым на фиг. 109. На фиг. 110 кривая *OQ* выражает зависимость количества выделяемой теплоты от времени, кривая *EB* дает приращение количества выделяемой теплоты за каждые 0,5 минуты. Продолжим плавно кривую *EB* до точки *D*. Так как изделие вступает в процесс шлифования холодным, то приращение количества выделяемой теплоты по времени изобразится кривой *OADEB*.



Фиг. 111.

Диаграмма на фиг. 110 является типичной для шлифования с постоянным нормальным (радиальным) давлением. Из этой диаграммы видно, что в течение первых 0,5 минуты кривая *AOB* резко идет вверх, достигает максимума в точке *A* и затем снижается по мере затупления круга. Однако эта кривая не будет соответствовать изменению температуры во время опыта. В течение первых 0,5 мин. имеется большое приращение теплоты. Но так как изделие в это время было холодным, то при-

ращение температуры отстает от приращения количества тепла, и кривая приращения температур *OMK* отклоняется вправо от кривой *OAB*.

Характер кривой *OMK* подтверждается наблюдениями при испытании кругов на приборе (фиг. 83), при таких режимах шлифования, когда испытуемый образец металла разогревается, приобретая различные цвета.

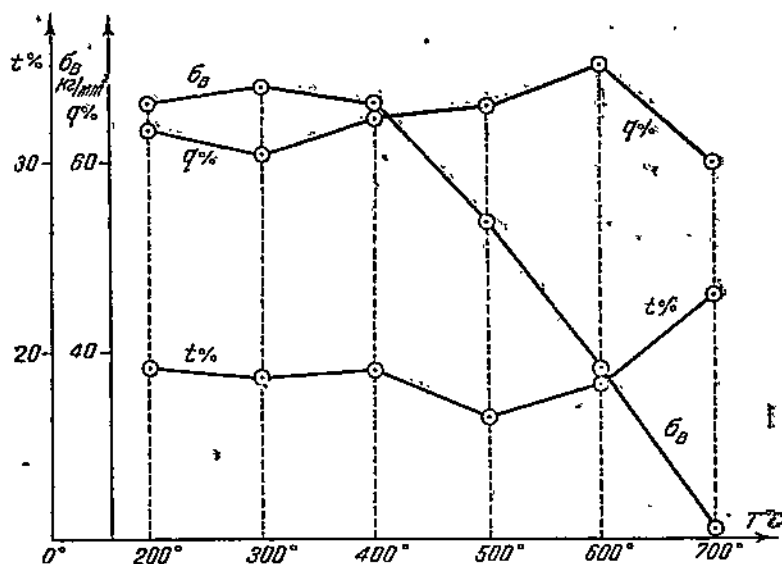
Образец постепенно приобретает красный цвет, в точке *M* — ярко-красный цвет (были случаи, когда в этом месте образец расплавлялся и очень быстро сошлифовывался), дальше яркость цвета падает, следуя кривой *OMK*, и образец темнеет. Очевидно, в это время достигается равновесие между количеством получаемой теплоты и теплоотдачей.

По величине работы U_0 (фиг. 109), затраченной на образование теплоты (размер ординаты в любом месте), можно определить количество выделившейся теплоты в любой промежуток времени по мере затупления круга:

$$Q = \frac{U_0}{427} \text{ кал,}$$

где 427 кгм — механический эквивалент тепла.

Кривая изменения температуры подтверждается также наблюдением за состоянием поверхности шлифовального круга в процессе шлифования с постоянным нормальным давлением на приборе (фиг. 83). При шлифовании на различных скоростях круга поверхность круга покрывается кольцевыми полосами (фиг. 111), ширина которых соответствует диаметру испытуемого образца в месте соприкосновения его с кругом. Чем больше материала снимается при шлифовании, тем выше температура образца и тем темнее получаются засаленные полосы. При малом количестве снимаемого материала эти полосы серые, при большом количестве снятой стружки они имеют черный цвет. Черная окраска сообщается кругу сторовшими и набившимися в поры круга частицами углерода металла. При рассмотрении под микроскопом оказывается, что частицы металла и углерода забивают не только поры между отдельными абразивными зернами, но также и углубления между режущими выступами на одном и том же зерне.



Фиг. 112.

Ввиду того, что при шлифовании на приборе (фиг. 83) выделяется много тепла, испытуемый образец очень скоро приобретает цвета побежалости, которые не сходят с него (изменяется лишь расстояние границ различных цветов от шлифовального круга). Структура металла образца претерпевает изменения, термически обработанный образец снижает свою твердость. При повышенной температуре металл легче поддается обработке резанием. Поэтому при испытаниях большой продолжительности мы должны получить несколько иные результаты, обрабатывая более мягкий металл, нежели вначале. Но для построения диаграмм работоспособности мы использовали участки кривой, даваемой самописцем, только в самом их начале (на протяжении

0,75—1,0 минут), где потеря твердости материалом отражена еще очень слабо.

Пользуясь вышеприведенными формулами J. Guest и Hutchinson, можно приближенно построить кривую изменения температуры при шлифовании.

Образование тепла при шлифовании отражается как на прочности шлифовального круга, так и на прочности шлифуемого металла. При нагревании прочность связи круга понижается, связка с меньшей силой удерживает в круге режущие зерна.

Для выяснения влияния нагревания на механические свойства обрабатываемого изделия автор произвел испытание механических качеств стали 53a1 (сырой) при различных температурах. На фиг. 112 даны кривые: δ_B — коэффициента крепости, t — относительного удлинения в %, q — поперечного сужения в %. Если значения t и q не особенно заметно изменяются с изменением температуры, то коэффициент крепости δ_B , начиная от 400° С, резко уменьшается, прочность материала уменьшается, он легче поддается механической обработке.

10. РЕЖУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КРУГА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Исследование процесса шлифования при постоянном нормальном (радиальном) давлении, изложенное выше, можно приложить к тем случаям, когда шлифовальный круг работает при постоянном давлении.

В этих случаях мощность, затраченная на вращение круга

$$N_{kp} = P_{ш} \cdot v_k,$$

где $P_{ш}$ — усилие резания при шлифовании, но так как

$$P_{ш} = \sqrt{P_r^2 + P_t^2},$$

$$P_r = \text{const},$$

то

$$P_{ш} = \sqrt{c + P_t^2},$$

$$N_{kp} = v_k \cdot \sqrt{c + P_t^2}.$$

При постоянной скорости круга v_k мощность круга пропорциональна тангенциальному давлению P_t . При обычном же способе шлифования (с принудительной подачей) P_r изменяется в процессе шлифования.

Перейдем от метода шлифования с постоянным радиальным давлением к методу с переменным P_r .

В главе «Износ шлифовального круга» изложен глубинный способ шлифования.

На фиг. 27 показано изменение удельного износа круга с изменением скорости круга. С увеличением скорости круга удельный износ

уменьшается. Сущность этого явления объяснена на схеме (фиг. 113). С увеличением скорости круга v_k тангенциальное усилие P_t падает, согласно формуле ¹:

$$P_t = \frac{v_a}{v_k \cdot 60} \cdot t \cdot s \cdot p,$$

где v_a — скорость изделия;
 t — глубина резания;
 s — продольная подача;
 p — удельное давление.

Работа, затрачиваемая на процесс шлифования, складывается из двух частей: работы за счет живой силы режущих зерен и работы за счет напряжения связки и зерна круга.

На диаграмме нанесена кривая $P_1 = f(v_k)$, где P_1 есть доля тангенциального давления, которая создается живой силой режущих зерен $\frac{mv_k^2}{2}$ и изменяется с изменением v_k по закону параболы. Чем больше величина P_1 , тем меньше напрягается зерно и связка при резании, P_t тем меньше износ круга.

Часть тангенциального давления P_2 , представляющая собой разницу между P_t и P_1 , определяет величину износа. С увеличением v_k величина P_2 , создаваемая напряжением режущих зерен и связки, уменьшается; поэтому уменьшается и износ круга.

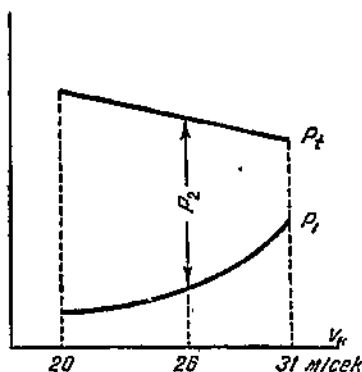
Подсчитаем значения P_1 (доля тангенциального давления, создаваемая живой силой режущих зерен) для шлифовального круга СМ-46 и для скоростей круга 20, 26 и 31 м/сек.

Полагая, что форма режущего зерна круга занимает среднее место между шаром и кубом, при размере зерна в поперечнике 0,35 мм поим объем одного зерна 0,0328 мм³. Масса одного зерна при удельном весе $\gamma = 0,0039$ г/мм³:

$$\frac{mv_k^2}{2} = \frac{0,0328 \cdot 0,0039 v_k^2}{2 \cdot 9,81} = 65 \cdot 10^{-6} v_k^2.$$

Живая сила всей режущей поверхности круга

$$\begin{aligned} \frac{Mv_k^2}{2} &= \frac{mv_k^2}{2} \pi D_k \cdot b \cdot i = 65 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 467 \cdot b \cdot 3,6 \cdot v_k^2 = \\ &= 0,0348 b \cdot v_k^2, \end{aligned}$$



Фиг. 113.

¹ Проф. В. А. Кривбужов, Резание металлов, 1938, стр. 338.

где $\hat{D}_k$ — диаметр круга (467 мм);
 $\hat{b}$ — ширина активно режущей части круга;
 $|i| = 3,6$ — число зерен на 1 мм^2 режущей поверхности круга.
 Обозначим через:

n_k — число оборотов круга в секунду;

L — мощность, т. е. работу в секунду, создаваемую живой силой режущих зерен,

Мы имеем:

$$L = \frac{M v_k^3}{2} \cdot n_k$$

$$P_1 = \frac{L}{v_k}$$

Подставив в приведенные формулы соответствующие числовые значения, получим табл. 21.

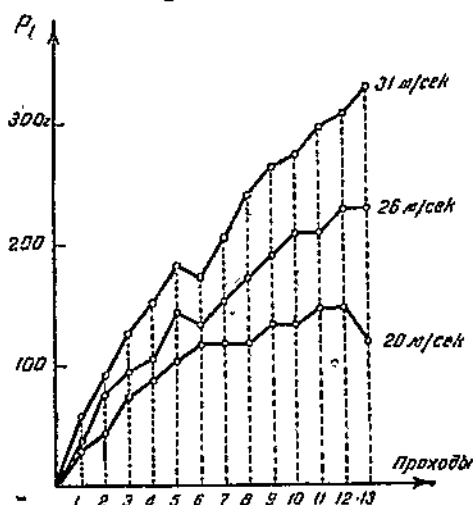
Таблица 21

Скорость круга v_k м/сек	20	26	31
$\frac{M v_k^3}{2} \text{ гм}$	13,8 б	23 б	13,1 б
n_k об/сек	13,8	17,5	21,3
L гм/сек	190 б	403 б	705 б
P_1 г	9,5 б	15,5 б	23 б

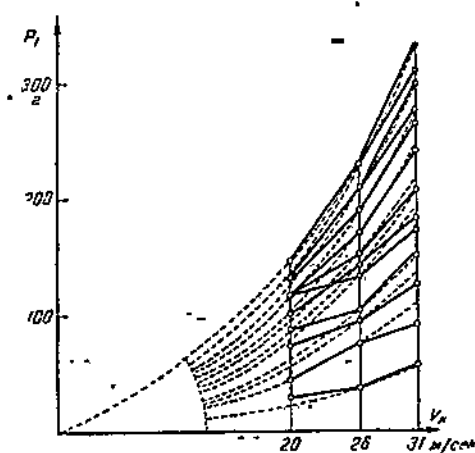
Таблица 22

Проход №	$v_k = 20$		$v_k = 26$		$v_k = 31$	
	b	P_1	b	P_1	b	P_1
1	2	19	2	31	1,5	35
2	3	28,5	4	62	3	69
3	5	47,5	5	77,5	4	92
4	6	57	5,5	85	5	115
5	7	66,5	7,5	116	6	138
6	8	76	7	109	7	161
7	8	76	8	124	8	184
8	8	76	9	140	8,5	195
9	9	85,5	10	155	9,5	219
10	9	85,5	11	170	10,5	241
11	10	95	11	170	11	253
12	10	95	12	186	11,5	265
13	8	76	12	186	12,5	287

Величина b или активная режущая часть ширины круга измерялась при экспериментах за каждый проход. Подставив эти измеренные значения b в формулу для P_1 , получим табл. 22 значений P_1 для 13 проходов (длиной 100 мм).



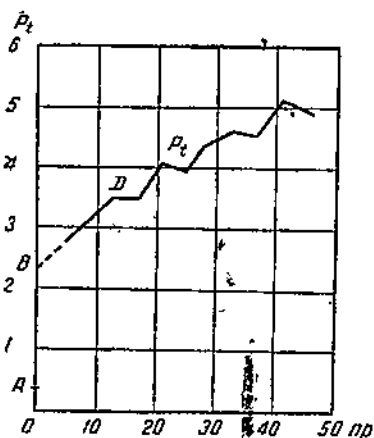
Фиг. 114.



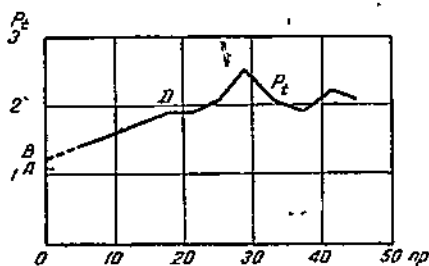
Фиг. 115.

На фиг. 114 значения P_1 для $v_k = 20, 26$ и 31 м/сек изображены графически. По оси ординат отложены P_1 , по оси абсцисс — номера проходов. На фиг. 115 те же значения P_1 отложены в зависимости от v_k и прочерчены сплошными ломаными линиями. Здесь же пунктиром через точки на ординате $v_k = 26$ м/сек проведены кривые, соответствующие живой силе одного режущего зерна. Мы видим, что пунктирные кривые близки к сплошным ломанным.

Таким образом часть тангенциального давления P_1 , создаваемая



Фиг. 116.



Фиг. 117.

живой силой режущих зерен круга, пропорциональна живой силе режущего зерна.

Возьмем две диаграммы изменения тангенциальных давлений из работы Куррейна¹. Обе диаграммы (фиг. 116 и 117) построены для поперечной подачи 0,01 мм за проход; шлифовальные круги в обоих случаях алундовые зернистостью 36, но твердость кругов различна — I и O. При опытах $v_k = 30$ м/сек, продольная подача $S = 7,5$ мм, $v_n = 15$ м/мин, $D_k = 355$ мм.

Подсчитаем для данного случая работоспособность круга U_1 по живой силе режущих зерен.

Вычисляя по предыдущему объем одного режущего зерна, получим 0,095 мм³. Живая сила одного зерна

$$\frac{mv_k^3}{2} = \frac{0,095 \cdot 0,0039 \cdot 30^3}{9,81 \cdot 2} = 0,017 \text{ гм} = 0,000017 \text{ кгм.}$$

Режущая поверхность круга

$$F = \pi D_k \cdot s = \pi \cdot 355 \cdot 7,5 = 8370 \text{ мм}^2.$$

Живая сила режущей поверхности круга

$$\frac{Mv_k^3}{2} = \frac{mv_k^3}{2} \cdot F \cdot t = 0,000017 \cdot 8370 \cdot 2 = 0,285 \text{ кгм.}$$

Шлифовальный круг делает 27 об/сек. Работа, произведенная кругом в 1 секунду за счет живой силы, выразится

$$L = 0,285 \cdot 27 = 7,7 \text{ кгм/сек.}$$

Доля тангенциального давления, вызываемая живой силой режущих зерен

$$P_1 = \frac{L}{v_k} = \frac{7,7}{30} = 0,257 \text{ кг.}$$

На диаграмме Куррейна (фиг. 116 и 117) запись тангенциального давления начинается через 5 проходов круга по изделию, т. е. когда круг уже до некоторой степени затупился. Продолжим на диаграмме кривую тангенциального давления CD плавно влево до пересечения с осью ординат в точке B (пунктир BC). Отрезок BO дает ориентировочно тангенциальное давление острого круга.

Отложим от начала координат отрезок AO , равный найденному P_1 , создаваемому живой силой.

$$AO = 0,257 \text{ кг.}$$

Отрезок AB дает долю тангенциального давления, создаваемую потенциальной энергией режущей поверхности круга U_2 .

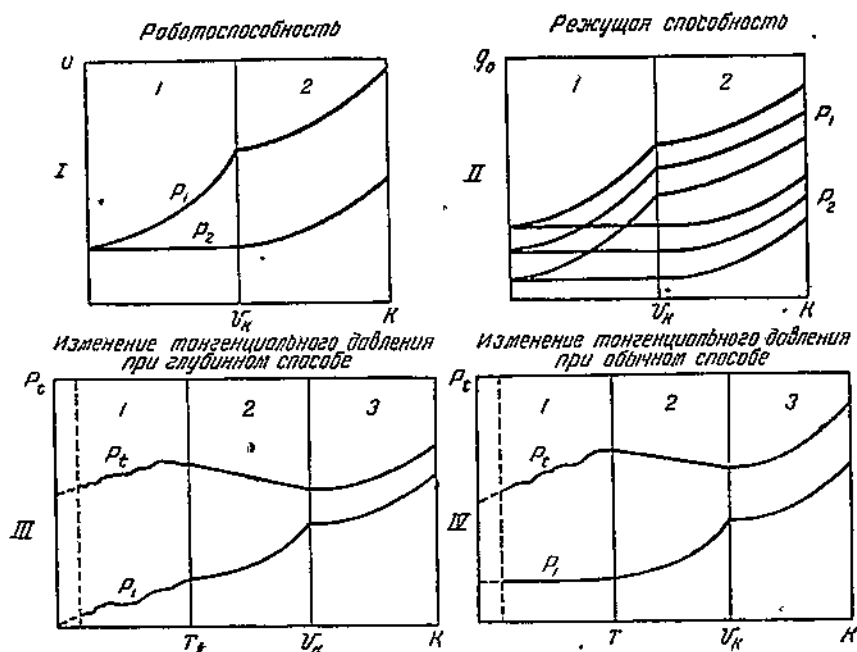
Мы получим диаграмму, аналогичную диаграмме работоспособности круга (фиг. 76), где $U = U_1 + U_2$ соответствует отрезку BO на диаграмме (фиг. 116), U_1 есть отрезок AO ; U_2 — отрезок AB . По мере затупления AO остается постоянным, а AB все время растет.

¹ Werkstattstechnik, 15 Mai 1928, Heft 10, S. 293.

В данном случае количество снимаемого металла G по времени постоянно. Деля P_2 на G , мы получим коэффициент работоспособности α в любой промежуток времени

$$\alpha = \frac{(P_1 + P_2) V_k}{75 G}$$

На фиг. 118 подведен общий итог работы, выраженный в четырех диаграммах. На диаграмме I дана зависимость работоспособности U от скорости круга v_k и твердости K . На диаграмме II даны кривые, выражающие зависимость режущей способности острого шлифовального круга q_0 от тех же параметров (v_k и K). Кривые получены путем обработки экспериментальных данных для трех различных нормальных давлений и трех твердостей круга (M_3 , C_1 и CT_2). Кривые диаграммы I и II аналогичны, т. е. режущая способность круга соответствует его работоспособности.



Фиг. 118.

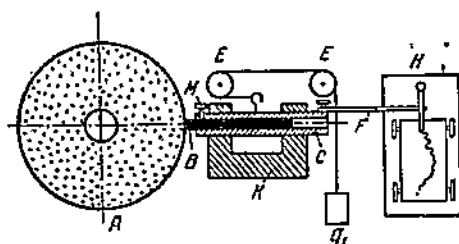
На диаграмме III дано изменение тангенциального давления при глубинном способе шлифования. Здесь общее тангенциальное давление P_t и его доля P_1 , создаваемая живой силой режущих зерен, изменяется в зависимости от времени T , скорости круга v_k и твердости K . На диаграмме IV показано изменение P_t и P_1 при обычном способе шлифования (с продольной подачей и малой глубиной резания).

Таким образом определением характеристики круга в рабочих условиях на производительность исследованием режущей способности

круга можно охватить все виды шлифования. Такое испытание дает более верную и практически более необходимую характеристику шлифовального круга, нежели испытание твердости.

Практически, в производственных условиях, испытания можно производить на приборе, сконструированном автором и изготовленном на заводе им. Фрунзе. Этот прибор изображен на фиг. 119.

Для производства испытаний необходимы проверенные нормализованные шлифуемые материалы и шлифовальные круги.



Фиг. 119.

Переносный прибор укрепляется на столе станка перед испытуемым кругом А. Шлифуемый образец В зажимается винтом М в пустотелой трубке С, которая вместе с образцом прижимается грузом G к шлифовальному кругу. Груз G висит на шнуре, перекинутом через блоки.

Трубка соединена тягой F с рычагом самопишущего прибора, имеющего часовой механизм. На ленте самописца вычерчивается кривая зависимости количества снятого металла от времени.

При испытании устанавливается постоянный режим; скорость круга, размеры образца, вес груза G и режим правки круга алмазом перед испытанием. Скорость круга для безопасности испытания можно брать ниже рабочей.

Прибор необходимо снабдить комплектом проверенных при испытании диаграмм, полученных самописцем, которые подвергались дальнейшей обработке вышеописанным способом и по которым была выявлена характеристика круга или шлифуемого металла. Диаграммы, снимаемые при новых испытаниях, сравниваются с нормализованными диаграммами путем наложения и тем самым устанавливается нужная характеристика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов—Физика твердого тела, изд. 1937 г.
2. Бюллетени и отчеты ЦНИЛАН.
3. Григорьев и Муравлев—Стекло, 1928 г.
4. Прокофьев и Прямостанов—Шлифовка деталей авиамотора.
5. R. Woxen—Wheel wear in cylindrical grinding.
6. J. J. Guest—Grinding machinery, 1915.
7. R. V. Hutchinson—Do we understand the grinding process? S. A. E., March 1938, p. 89.
8. G. Schlesinger—Versuche über die Leistung von Schmirgel und Karborundumscheiben bei Wasserzuführung. Heft 43, Berlin, 1907.
9. G. Schlesinger—Die Werkzeugmaschinen, Berlin, 1936.
10. M. Kurrein—Die Messung der Schleifkraft.—Werkstattstechnik 1927, Heft 20, S. 585.
11. M. Kurrein—Untersuchung der Schleifscheibenhärte. Werkstattstechnik 1928, Heft 10, S. 293.
12. C. Krug—Определение хрупкости абразивных материалов — V. D. I. 1929, т. 78, № 48, S. 1707.
13. Wallich and Goedecke—Über die Splittenfähigkeit von Schleifscheibenkorntoffen.—T. Z. für praktische Metallbearbeitung 1935, N. 23/24, S. 587.
14. C. Krug—Beiträge zur Kenntnis des Schleifens.—Maschinenbau 1925, Heft 18, S. 875.
15. Сэкигута и Хасягава—Исследование абразивного действия шлифовального круга.—Journ. of the Society of Mechanical Engineers, Japan, vol. XXXVI, N. 198, Oct. 1933, p. 700.
16. I. Crisan—Опыты по определению температуры поверхностного слоя при шлифовании стали.—Werkzeug 1931, N. 12, S. 133.
17. W. Franz—Исследование процесса шлифования корундовыми кругами на керамической связке. Werkstatt und Betrieb, N. 13/14, 1937, S. 180.
18. Sahm — Einige Überlegungen über Vorgänge beim Rundschleifen.—Werkstattstechnik 1928, N. 10, S. 314.
19. Superfinish—A basically new method for finishing surfaces—Machinery, N. 1, August 1938, N. 12, p. 858.
20. G. Schmalz—Technische Oberflächenkunde, 1936.
21. G. J. Murdock—Hardening by grinding—American Machinist, L. Febr. 13, 1932, N. 1, p. 7.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Шлифовальный круг	5
2. Количество режущих зерен шлифовального круга	14
3. К процессу шлифования	18
✓ 4. Износ шлифовального круга	20
5. Твердость шлифовального круга	32
6. Способы определения твердости шлифовального круга	35
7. Работоспособность шлифовального круга	54
✓ 8. Экспериментальное исследование режущей способности круга	73
9. Теплообразование при шлифовании	87
✓ 10. Режущая способность круга в условиях производственного шлифования	96

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
23	4 снизу	(фиг. 12)	(фиг. 11)	ред.
23	19 "	фиг. 11	фиг. 12	ред.
40	6 сверху	заменялся	замерялся	корр.
55	2 снизу	отгиба	отжима	корр.
61	4 сверху	$i_1 = \frac{1 W_k}{\pi d^3} = 1,91 \frac{W_k}{d^3}$	$i_1 = \frac{1 W_k}{\pi d^3} = 1,91 \frac{W_k}{d^3}$	ред.
82	6 снизу	P_n	P_r	ред.

Зап. № 838. Длещенко, Шлифовальный круг и его режущая способность.