

А Г.М.ИППОЛИТОВ
**АБРАЗИВНЫЕ
ИНСТРУМЕНТЫ
И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ**

М А Ш Г И З

Г. М. ИПОЛИТОВ

АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1959

ГОС. ПУБЛИКАЦИИ
УДК 62-50
1957

В книге освещены технология и свойства абразивных материалов и шлифовальных кругов, приведены правила выбора оптимальных характеристик абразивных инструментов для шлифования различных материалов и сплавов, даны рекомендации по скоростному шлифованию и по таким отделочным процессам, как: хонингование, суперфиниш, полирование, жидкостное хонингование, ленточное шлифование и доводка.

В книге отражены также вопросы теплообразования, возникновения прижогов и трещин и методов их ликвидации, описаны применяемые смазывающе-охлаждающие жидкости для разных материалов и видов шлифования, способы ликвидации дисбаланса в процессе работы, способы и виды правки.

Приведены данные по организации и ведению абразивного хозяйства на заводах, указаны методы повышения твердости шлифовальных кругов и даны таблицы их выбора. Значительное место отведено вопросам обеспечения необходимой чистоты поверхности и качества поверхностного слоя шлифуемой детали.

Книга предназначена для инженерно-технических работников заводов, а также может быть полезна для студентов вузов и техникумов, интересующихся вопросами производства и эксплуатации абразивных инструментов.

Рецензент: проф. д-р техн. наук А. Я. Малкин
Редактор: канд. техн. наук инж. С. М. Федров

Редакция литературы по металлообработке и станкостроению

Зав. редакцией инж. Р. Д. БЕЙЗЕЛЬМАН

ВВЕДЕНИЕ

Операции шлифования, заточки, доводки и полирования, осуществляемые при помощи абразивных инструментов, за последние годы находят все большее применение в металлообработке. При этом шлифование, в некоторых случаях, вытесняет строгание, фрезерование, нарезание резьбы, шабрение и обтачивание различных металлических и неметаллических заготовок деталей. Таким образом, шлифование является не только финишной, но и черновой операцией, позволяющей снимать за один проход значительные слои металла. Наряду с этим повышающиеся требования к качеству и чистоте поверхности обрабатываемых деталей вызывают широкое применение таких операций, как доводка наружных и внутренних поверхностей на специальных станках с достижением чистоты поверхности 12—13-го класса, а также таких отделочных процессов, как обработка свободным абразивным зерном, полирование гибкими и шлифовальными лентами и др.

Вероятно, в ближайшем будущем процессы шлифования в значительной степени вытеснят такие виды обработки металлов, как: точение, строгание, фрезерование, в связи с тем, что заготовки, полученные методами точной штамповки, прокатки, литья под давлением и т. п., будут иметь настолько небольшие припуски, что никаких других операций для обеспечения требуемой точности и чистоты поверхности обработанных деталей, кроме операций шлифования и доводки, не потребуется. Уже и в настоящее время это явление все в более широких масштабах наблюдается во всех отраслях машиностроения.

Создаются и совершенствуются конструкции станков для последовательного шлифования детали несколькими одновременно работающими кругами разных характеристик и постепенным снижением толщины снимаемого слоя.

Распространение процессов шлифования ведет к повышению потребности в абразивных материалах и абразивных инструментах и выдвигает новые требования к их ассортименту и качеству.

О расширении области применения процессов шлифования свидетельствует рост выпуска абразивных инструментов. Так, в 1958 г. абразивов было выпущено в 6,2 раза больше, чем в 1940 г. В настоящее время парк шлифовальных и полировальных станков составляет около 9%, а включая заточные, доводочные станки и точила — около 20% от всего станочного парка. На подшипнико-

вых заводах шлифовальные операции, включая заточные, полировальные и доводочные, составляют 65—70%, а парк станков, работающих с абразивным инструментом, в производстве автомобилей доходит до 25%. Большой парк шлифовальных станков имеют также тракторные, станкостроительные, инструментальные и другие заводы.

Многие типы шлифовальных станков механизированы; такие станки требуют меньших затрат вспомогательного времени по сравнению с другими металлорежущими станками. Во многих последних конструкциях станков для наружного и внутреннего шлифования бесцентровых шлифовальных станков и др. автоматизированы все элементы цикла, включая правку и компенсацию износа круга. Коэффициент использования станков по машинному времени на многих типах шлифовальных станков значительно выше, чем на других металлорежущих станках.

Так, например, круглошлифовальный станок мод. 3153Б снабжен автоматически действующим захватом деталей, подлежащих шлифованию, из специального магазина, а также устройством, подводящим деталь к центрам и осуществляющим зажим ее в центрах. На этом станке все детали шлифуются с автоматической подачей до заданного размера, причем подвод и отвод шлифовального круга, включение и выключение механизмов вращения детали и подачи охлаждающей жидкости, измерение детали в процессе шлифования и разжим центров — автоматизированы.

Такая автоматизация позволяет одному рабочему одновременно обслуживать 4—6 станков, причем производительность каждого станка за счет сокращения вспомогательного времени увеличивается на 15—20%.

Вместе с тем многие конструкции других типов шлифовальных станков требуют серьезной модернизации и в частности увеличения числа ступеней скорости шлифовального круга, повышения мощности привода круга, автоматизации управления, установки устройств для очистки охлаждающей жидкости и пр.

Недостаточная механизация на этих станках операций установки и съема деталей, измерения размеров шлифуемой детали, правки круга и др. приводит к тому, что доля вспомогательного времени составляет 50% и больше от общего времени.

Необходимо отметить, что процессы абразивной обработки являются весьма сложными и вместе с тем еще недостаточно изученными.

Абразивный инструмент, несмотря на кажущуюся его внешнюю простоту, является весьма сложным многолезвийным инструментом, свойства которого зависят от многих факторов, причем некоторые из них еще полностью не изучены.

За последние годы научно-исследовательские институты: ВНИИАШ, ЭНИМС, ЭНИИП, ВНИИ, НИИТАвтопром, ЦНИИТМАШ и другие отраслевые исследовательские технологические институты, а также ряд учебных институтов и лаборато-

рий машиностроительных заводов провели большую работу по исследованию процессов шлифования, по разработке методов скоростного шлифования, по изучению поведения абразивного инструмента в работе и дали ряд полезных для практики выводов. Однако и в настоящее время механизм процесса шлифования в достаточной степени не изучен, и ряд весьма важных для создания теории шлифования вопросов еще не решен.

Учитывая, что процессы абразивной обработки в ближайшем будущем должны будут играть большую роль среди всех других видов механической обработки, необходимо более широко изучать эти процессы. Должны быть усилены работы по изучению и созданию условий получения более однородного качества абразивного инструмента, так как его неоднородность влечет за собой дополнительные трудности, как в процессе эксплуатации, так и при исследовании работы абразивного инструмента.

ГЛАВА I

АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Абразивным материалом может быть назван всякий минерал естественного или искусственного происхождения, зерна которого обладают достаточной твердостью и способностью резания (скобления, царапания). Изготовленные из этого материала инструменты должны обеспечить возможность обрабатывать ими детали с заданной точностью размеров и формы, чистотой поверхности, а также получать острые режущие кромки при заточке инструментов.

Из естественных (природных) материалов в металлообрабатывающей промышленности некоторое применение имеют: кварц, наждак, корунд и алмаз.

Кварц является самым распространенным минералом, представляющим собой безводную кристаллическую кремнекислоту SiO_2 . Твердость кварца приближается к твердости наждака. Удельный вес кварца $2,4 - 2,7 \text{ г/см}^3$. В зависимости от содержащихся в нем примесей кварц имеет различную окраску и названия.

Для производства абразивного инструмента кварц почти не применяется вследствие недостаточной твердости, а также в связи с тем, что шлифовальные круги, изготовленные из кварца, быстро теряют свою форму и размеры. Чаще всего кварц применяется в виде песка для операций шлифования и полирования стекла, однако и на этих операциях он все больше вытесняется другими абразивными материалами. Кроме того, кварц применяется для изготовления шлифовальной шкурки на полотне и на бумаге.

Наждак, представляющий собой разновидность корундовых руд, является минералом, содержащим в лучших сортах до 60% окиси алюминия (глинозема), и имеет кристаллическое строение. Твердость наждака ниже твердости корунда, так как содержащиеся в нем примеси обладают более низкой твердостью, чем собственно корунд.

Наждак, который до производства искусственных абразивных материалов являлся основным материалом для изготовления шлифовальных кругов, в настоящее время применяется в незначительных количествах лишь для производства кругов на магнетальной связке. Более широко наждак применяется для шлифо-

вания свободным зерном и при изготовлении полировальных кругов.

Природный корунд — минерал — представляет собой кристаллический глинозем и в зависимости от содержащихся в нем примесей имеет различный цвет, свойства и названия. Применяемый для промышленных целей природный корунд содержит в своем составе до 95% окиси алюминия. Удельный вес корунда 3,9—4,1 г/см³. Он более вязок и менее хрупок, чем наждак и обладает значительно большей твердостью. В силу этого корунд широко применяется в виде порошков и микропорошков для целей свободного шлифования и особенно для доводочных работ. Также широко используется корунд для шлифования и полирования оптического и других сортов стекла. Небольшие запасы корунда в месторождениях почти не позволяют применять его для производства шлифовальных кругов.

В настоящее время из природного корунда изготавливаются только частично специальные круги для шлифования шариков подшипников и круги с графитовым наполнителем.

Алмаз — самый твердый минерал из всех встречающихся в природе, представляет собой по химическому составу чистый углерод в кристаллическом виде. Наиболее распространенными кристаллическими формами его являются формы, относящиеся к гексатетраэдрической системе: восьмигранник, куб, двенадцатигранник и т. п.

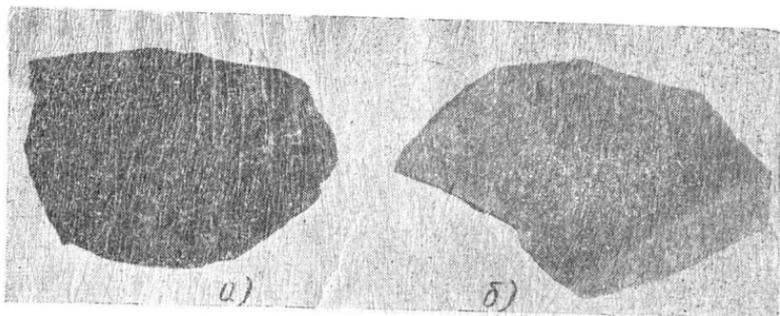
Алмазы обычно бесцветны, хотя встречается много алмазов, имеющих желтовато-дымчатый и даже черный цвет. Удельный вес алмаза 3,48—3,56 г/см³. В химическом отношении алмазы очень стойки, кислоты и щелочи на них действия не оказывают. Обладая чрезвычайно высокой твердостью, алмазы вместе с тем весьма хрупки. Имея хорошую теплопроводность, они одновременно обладают низким коэффициентом теплового расширения.

В металлообрабатывающей промышленности алмазы применяются главным образом для изготовления доводочных кругов и для правки шлифовальных кругов. Наиболее распространенными сортами технических алмазов, до открытия Якутских месторождений, являлись: балласы, бортсы и карбонаты, добываемые в Африканских и Бразильских месторождениях. Из них большей вязкостью и более высоким сопротивлением удару обладают карбонаты, которые поэтому и считаются лучшими.

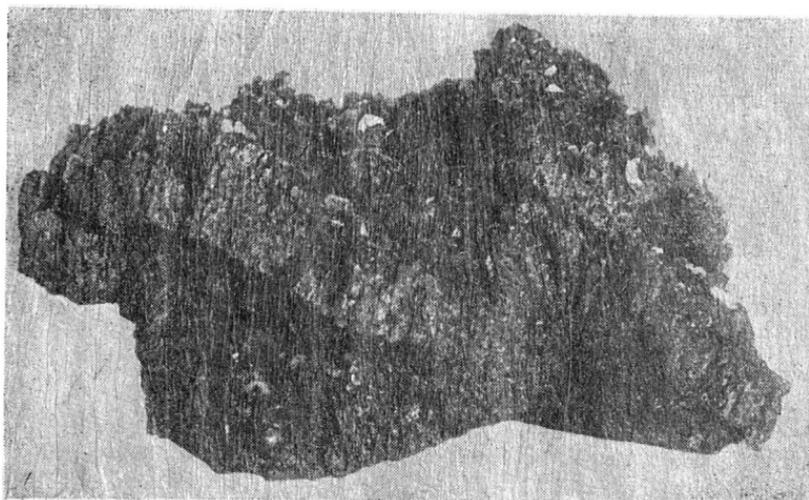
Из других природных абразивных материалов некоторое, очень малое, применение имеют пемза, являющаяся продуктом остывания поверхностных слоев лавы и гранат — минерал из группы алюмосиликатов.

К производящимся в промышленных масштабах искусственным абразивным материалам относятся: электрокорунд, карбид кремния (карборунд) и карбид бора.

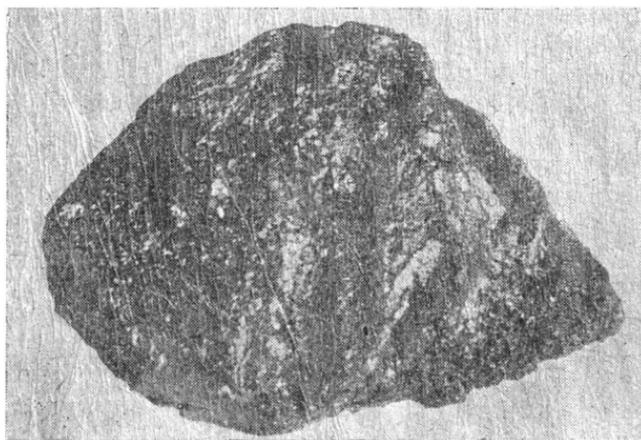
Электрокорунд (фиг. 1) представляет собой продукт плавки, основной составляющей частью которого является кристаллическая окись алюминия.



Фиг. 1. Электрокорунд в куске: нормальный (а), белый (б).



Фиг. 2. Карбид кремния в куске.



Фиг. 3. Карбид бора в куске.

Карбид кремния (фиг. 2) является продуктом химического взаимодействия углерода с кремниевой кислотой. Технический карбид кремния почти целиком (до 90%) состоит из химического соединения кремния с углеродом SiC .

Карбид бора (фиг. 3) является продуктом плавки и представляет собой тугоплавкое соединение бора с углеродом B_4C .

Все эти материалы по твердости уступают только алмазу.

Наиболее широкое применение в промышленности получил электрокорунд, хотя способ его производства был открыт на десять лет позднее, чем производство карбида кремния.

В общем балансе потребления искусственных абразивных материалов электрокорунд составляет 80—85%, карбид кремния 15—20% и карбид бора — сотые доли процента.

Основное различие между свойствами электрокорунда и карбида кремния заключается в большей вязкости электрокорунда, меньшей его хрупкости и несколько меньшей твердости.

Большая вязкость электрокорунда при высокой твердости и относительной дешевизне по сравнению с карбидом кремния и является причиной его более широкого применения в промышленности.

Абразивные инструменты из электрокорунда применяются главным образом для обработки металлов, обладающих высоким сопротивлением разрыву, а так как процессам шлифования подвергаются в подавляющем большинстве случаев детали именно из таких металлов (различных сталей и сплавов), то и удельный вес применения инструментов из электрокорунда превалирует над применением абразивных инструментов из других абразивных материалов.

Абразивные инструменты из карбида кремния применяются главным образом для обработки металлов с низким сопротивлением разрыву (алюминий, чугун, твердые сплавы, медь и др.) и для большинства неметаллических материалов (мрамор, кость, уголь, керамические изделия и т. п.).

Карбид бора пока применяется только в виде зерна и порошков для шлифования и доводки изделий из различных твердых материалов и сплавов.

Перейдем к краткому рассмотрению технологии производства этих видов абразивных материалов и их свойств.

ЭЛЕКТРОКОРУНД

Искусственный корунд, иначе называемый электрокорундом, получил применение как абразивный материал с 1901 г.

Химически чистый корунд представляет собой кристаллическую окись алюминия Al_2O_3 , получаемую в результате плавки химически чистой окиси алюминия (глинозема) при температуре около 2050°.

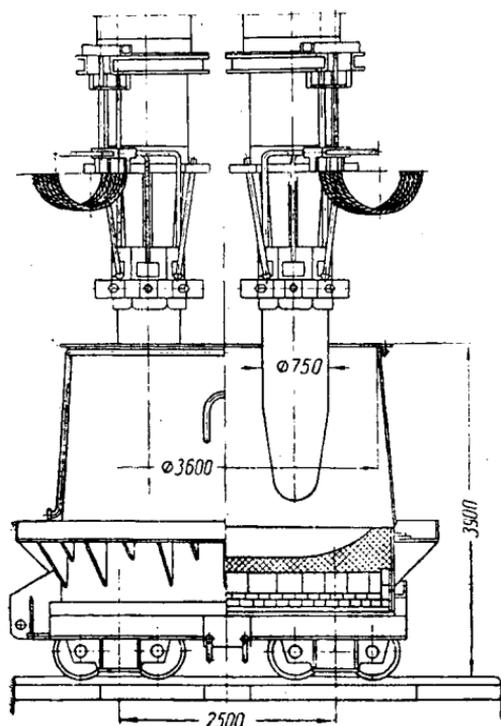
При переходе из расплавленного в твердое состояние окись алюминия кристаллизуется в α -корунд, чрезвычайно твердое

вещество белого цвета, уступающее по твердости только алмазу, карбиду бора и карбиду кремния.

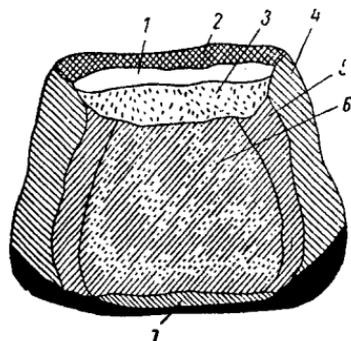
При существующих промышленных способах производства электрокорунд выпускается обычно с содержанием Al_2O_3 от 91 до 99%. Удельный вес электрокорунда равен 3,93—4,01 г/см³.

В зависимости от содержания Al_2O_3 и примесей электрокорунд имеет различный цвет, структуру и свойства.

Промышленностью выпускаются три разновидности электрокорунда: 1) электрокорунд нормальный, который в дальнейшем будем называть электрокорундом, содержащий в зерне 91—96% Al_2O_3 и имеющий цвет от розового до темнокоричневого; 2) белый электрокорунд, содержащий 97—99%



Фиг. 4. Подвижная электродуговая печь мощностью 2250 ква для плавки электрокорунда.



Фиг. 5. Блок электрокорунда:

1 — усалочная раковина; 2 — шапка; 3 — подшапка; 4 — край; 5 — бок; 6 — центр; 7 — низ.

Al_2O_3 , и 3) монокорунд, содержащий 97—98% Al_2O_3 .

Плавка электрокорунда ведется в открытых дуговых электрических печах подвижного (фиг. 4) или реже неподвижного типа и ничем не отличается от прочих металлургических процессов, хотя продуктом плавки является не металл, а электрокорунд, образующийся же в процессе плавки ферросплав является побочным продуктом.

Процесс плавки указанных выше разновидностей электрокорунда ведется на блок или на слив. В первом случае продукт плавки — электрокорунд остается в печи до конца плавки и затем после некоторого остывания извлекается отсюда в виде блока, имеющего форму усеченного конуса (фиг. 5). Плавка на слив ведется не-

прерывно. В этом случае продукт плавки сливается из печи, по мере наплавления, в изложницы, где и кристаллизуется.

Производство электрокорунда является весьма энергоемким процессом. Так, на плавку 1 т электрокорунда затрачивается 2500—3000 квт-ч и более, в зависимости от качества боксита, мощности печи, требуемого качества электрокорунда и режима плавки.

Основным сырьем для плавки электрокорунда и монокорунда является боксит, представляющий собой продукт выветривания глинозесодержащих минералов, для плавки белого электрокорунда — глинозем.

Глинозем должен содержать максимум Al_2O_3 и минимальное количество других примесей, в особенности Na_2O во избежание ухудшения качества белого электрокорунда, при плавке которого глинозем является единственным компонентом шихты.

Чем больше в глиноземе примесей Na_2O (допускается 0,3%), тем больше в процессе плавки образуется высокоглиноземистого алюмината натрия (β -глинозема), обладающего в два раза меньшей абразивной способностью.

В целях уменьшения улета глинозема в процессе плавки желательнее, чтобы его гранулометрический состав был как можно крупнее.

Исключительно важное значение для качества электрокорунда имеет качество боксита. Поэтому требования к «абразивному» бокситу специально регламентированы ГОСТом.

«Абразивный» боксит должен содержать не менее 50% Al_2O_3 , его кремневый модуль (отношение Al_2O_3 к SiO_2) должен быть не менее 9, он не должен содержать таких вредных примесей как CaO , его кальциевый модуль (отношение Al_2O_3 к CaO) должен быть не менее 125, т. е. при содержании в боксите 50% Al_2O_3 в нем допустимо содержание CaO не более 0,4%.

Указанный в ГОСТе 972-50 на бокситы допустимый предел содержания CaO — 0,8%, как показывает практика плавки, является завышенным, вызывающим ухудшение качества электрокорунда. В боксите не должно содержаться также таких примесей как MgO и S .

Шихта для плавки электрокорунда должна быть газопроводной, поэтому в боксите лимитируется содержание мелких его частиц (допускается до 15%) и влажность 14—16%.

Плавка пылевидных бокситов в связи с уменьшением газопроводности шихты сопровождается весьма опасными выбросами расплавленной массы. Поэтому рекомендуется боксит предварительно спекать, удаляя из него гидратную влагу.

Для восстановления примесей, содержащихся в боксите, и для рафинирования расплава в шихту для плавки электрокорунда добавляются определяемые расчетом количества углеродистых материалов и железной или чугуновой стружки.

Углеродистые материалы должны иметь ограниченную зольность не более 7—8% и обладать хорошей активностью восстановления.

При плавке монокорунда в шихту добавляется, кроме того, пирит — сернистое железо.

Сначала в процессе плавки происходит обезвоживание боксита, потом его расплавление, температура плавления боксита в зависимости от его качества находится в пределах 1500—1750°. Затем происходит восстановление примесей, образующих ферросплав комплексного состава, и выделение глинозема. Чем полнее происходит в расплаве реакции восстановления, тем меньше в электрокорунде остается примесей.

Только примеси СаО и MgO почти целиком переходят в расплав электрокорунда, давая такие минеральные образования, наличие которых приводит к ухудшению качества электрокорунда и вызывает брак при изготовлении из этого электрокорунда абразивных инструментов.

Кальций, обладающий значительно более высоким сродством к кислороду, чем алюминий, не восстанавливается в процессе плавки, вследствие чего окись кальция переходит почти целиком в электрокорунд. При этом СаО связывает некоторую часть глинозема в минералы, обладающие резко пониженной абразивной способностью (гексаалюминат кальция и анортит).

Следует учесть, что в связи с тем, что для выплавки 1 т электрокорунда требуется почти 2 т боксита, содержание примесей СаО в электрокорунде также почти удваивается¹.

От времени плавки и остывания, от содержания в электрокорунде Al_2O_3 и примесей зависит его кристаллизация и количество корунда. Особенно отрицательно влияют на кристаллизацию электрокорунда примеси СаО.

Из работ, проведенных во ВНИИАШе д-ром техн. наук Н. Е. Филоненко и другими исследователями, следует, что уменьшение содержания Al_2O_3 в электрокорунде с 95 до 93% влечет за собой уменьшение размеров кристаллов с 1,2 до 0,7 мм, т. е. по 0,25 мм на каждый процент, а дальнейшее снижение содержания Al_2O_3 до 91% вызывает уменьшение размеров кристаллов до 0,4 мм. На кристаллизацию зерен оказывают также большое влияние время остывания и объем массы расплава.

При плавке электрокорунда добиваются образования более крупных кристаллов для того, чтобы при дроблении получить зерна, представляющие собой главным образом отдельные кристаллы и их частицы.

Спайность у кристаллов электрокорунда отсутствует.

Получаемый в печи блок электрокорунда содержит в различных его местах электрокорунд разного химического и минерального состава. В центральной части блока находится электрокорунд с наиболее высоким содержанием Al_2O_3 . По мере приближения к наружной поверхности содержание Al_2O_3 и корунда снижается,

¹ Более подробно с этими вопросами можно познакомиться в книгах: канд. техн. наук Каменцева М. В. «Искусственные абразивные материалы» и Марковского Л. Я., Оршанского Д. Л., Прянишникова В. П. «Химическая электротермия» Госхимиздат, 1953.

а количество примесей повышается, поэтому блок после разбивки сортируют, и наиболее бедные корундом куски возвращают в плавку в качестве обогащающих шихту материалов.

Плавка белого электрокорунда производится также в дуговых электрических печах на блок или на слив. В последнем случае печь имеет конструкцию, позволяющую наклонять ее под определенным углом и, таким образом, производить слив белого электрокорунда в специальные изложницы.

Белый электрокорунд по своему химическому и физическому составу получается гораздо более однородным.

Плавка монокорунда, технология которой разработана канд. техн. наук М. В. Каменцевым, также ведется в открытых дуговых электрических печах. В результате плавки получается блок, состоящий из окисульфидного шлака, представляющего собой зерна корунда, сцементированные сульфидами алюминия, кальция и частично титана.

При последующей обработке кусков блока теплой водой зерна монокорунда освобождаются из сульфидов алюминия и кальция без дробления, шлак разлагается под действием воды, и затем зерна проходят обогащение и классификацию на определенные номера зернистости.

Зерна монокорунда с номера 46—60 и мельче, в подавляющей части, представляют собой отдельные кристаллы, откуда этот вид корунда и получил название монокорунда. Более крупные зерна в значительной части являются агрегатами и сростками нескольких кристаллов и потому их перед классификацией и передачей в производство абразивных инструментов подвергают дроблению и рассеву.

Абразивная способность электрокорунда в большой мере зависит от содержания в нем α Al_2O_3 , часто неправильно называемого в производстве «физическим корундом» и представляющего собой кристаллическую форму глинозема.

Минеральный состав электрокорунда неравнозначен его химическому составу. Чем больше в электрокорунде примесей, тем ниже в нем содержание α Al_2O_3 . Особенно большое влияние на снижение содержания α Al_2O_3 оказывает CaO, почти целиком переходящая в процессе плавки из боксита в электрокорунд. Ниже приведены подсчеты соотношений Al_2O_3 и α Al_2O_3 , получающихся при плавке боксита, содержащего удвоенное (против указанных ниже), количество CaO, в процентах:

CaO в корунде	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
Al_2O_3	97,7	95,9	94,3	92,8	90,3	88,7
α Al_2O_3	97,3	95,0	93,0	91,0	87,6	84,6

В минеральный состав электрокорунда помимо корунда входит ряд других минералов (гексалуминат кальция $CaO \cdot 6Al_2O_3$, анартит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$, окислы и карбиды титана Ti_2O_3 и TiC , стекло и др.), снижающих абразивную способность электрокорунда.

В белом электрокорунде и монокорунде, вследствие наличия в них меньшего количества примесей, содержание α Al_2O_3 меньше отличается от содержания Al_2O_3 , особенно в крупных зернах.

Образующийся в процессе плавки ферросплав, благодаря своему большому удельному весу 6,5—7,0, оседает в значительной части на дно печной ванны, а часть его застревает в разных местах блока. Этот ферросплав почти целиком удаляется из электрокорунда при его дроблении при помощи магнитной сепарации продуктов дробления.

Количество ферросплава, образующегося при плавке, зависит главным образом от кремневого модуля боксита. Чем ниже кремневый модуль боксита, тем больше ферросплава образуется в электрокорунде. Поэтому применение для плавки бокситов с низким кремневым модулем является нецелесообразным.

Химический и минеральный состав выпускаемого промышленностью электрокорунда определяется специальными техническими условиями.

Иностранные фирмы выпускают электрокорунд под другими названиями: алунд, электрит, корракс и др., которые фактически от электрокорунда ничем не отличаются.

КАРБИД КРЕМНИЯ

Открытие карбида кремния относится к 1891 г. С этого же времени было начато и его промышленное производство.

Карбид кремния является продуктом химического соединения кремния с углеродом, взаимодействующих в специальных печах при высоких температурах.

Карбид кремния кристаллизуется главным образом в виде тонких шестиугольных пластинок (гексагональная система).

Удельный вес карбида кремния равен 3,16—3,99 г/см³.

Производство его является еще более энергоемким, трудоемким и материалоемким по сравнению с производством электрокорунда.

На 1 т карбида кремния расходуется от 8000 до 10 000 квт-ч электроэнергии.

По масштабам производства и применения карбид кремния занимает второе место после электрокорунда. По твердости, так же как и по ряду других свойств, о чем будет сказано ниже, карбид кремния превосходит электрокорунд.

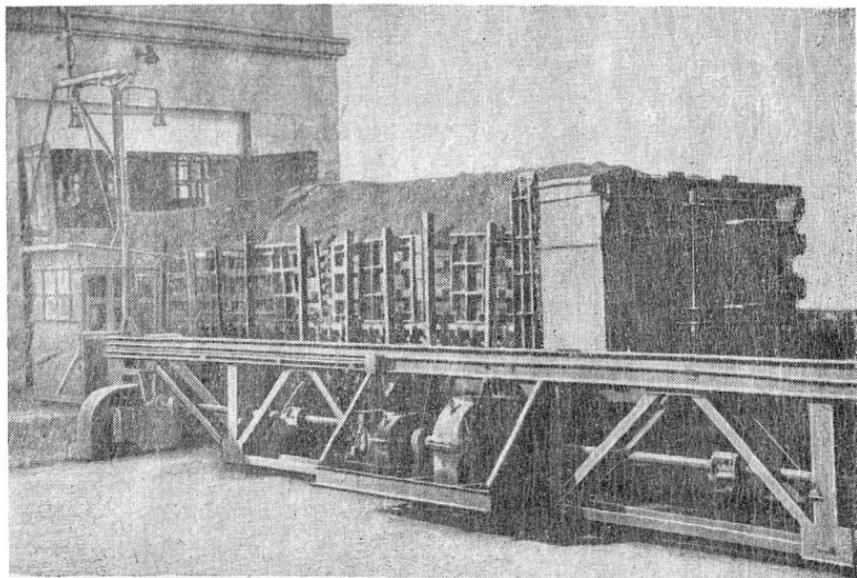
Карбид кремния выпускается двух разновидностей: зеленый и черный. Его получают в печах сопротивления. В карбидокремниевой печи (фиг. 6) сердечник печи — kern, изготовленный из углеродистых материалов, нагревается под действием электрического тока, поступающего через токоподводящие угольные электроды, заделанные в торцовые стенки печи, до температуры 2600—2650° и отдает свое тепло расположенной вокруг него шихте, состоящей из размолотых до определенной крупности кварцитов, углеродистых материалов — антрацита, нефтяного или пекового кокса и

древесных опилок. Кварциты должны содержать не менее 98,5% SiO_2 , а антрациты не более 3% золы, так как в процессе производства карбида кремния не происходит рафинирования примесей.

Эта шихта называется реакционной, в отличие от заполняющей нижнюю и верхнюю часть печи наполнительной шихты.

При производстве зеленого карбида кремния в шихту вводят 6—7% (по весу) поваренной соли.

Наполнительная шихта, назначение которой заключается в удержании тепла в печи, во избежание спекания всегда содержит



Фиг. 6. Печь для плавки карбида кремния.

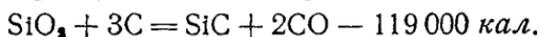
некоторый избыток углерода. В состав шихты входят, помимо свежих материалов, возвратные материалы (аморфный карбид кремния и старая шихта).

«Аморфный» (заводской термин) карбид кремния, содержащий до 85% SiC , является неполноценным продуктом производства карбида кремния (получается в зоне печи, имеющей температуру 1600—1700°, недостаточную для образования полноценного карбида кремния) и по этой причине повторно возвращается в шихту.

После загрузки печь подключают к питающему ее трансформатору, и производится включение тока. По мере нагревания ядра теплоты от него передается шихте, и из нее начинают удаляться в виде паров влага и в виде газов окись углерода и летучие, содержащиеся в углеродистых материалах и опилках.

В целях предотвращения распространения в цехе газов CO , их поджигают, поэтому печь во время работы покрыта язычками пламени. При достижении в шихте температуры 1450—1500° начи-

нается процесс восстановления и силицирования (насыщения парами карбида кремния) частиц углерода, т. е. образование карбида кремния происходит в результате реакции между твердым углеродом и парообразным силицирующим



Чем скорее углерод поглощает кремневую кислоту и чем медленнее она испаряется, тем скорее идет процесс образования карбида кремния.

Этому процессу способствуют выделяющиеся газы СО, которые, разрыхляя частицы углерода, помогают адсорбции паров кремневой кислоты. При температуре в шихте 1700—1750° этот процесс почти завершается, однако процесс роста кристаллов и их уплотнение продолжается с ростом температуры. При температуре около 1850° кубическая модификация карбида кремния переходит в гексагональную, при которой он получает большую плотность.

Содержащиеся в сырье примеси, взаимодействующие с кремнеземом (СаО, MgO и др.), отрицательно влияют на образование карбида кремния, ухудшая силицирование частиц углеродистого материала и снижая выход карбида кремния из печи.

Зеленый карбид кремния не может стабильно получаться, если в шихте содержится повышенное, против допустимого, количество окиси кальция и алюминия.

Сумма содержания примесей (окислов железа, кальция и алюминия) не должна быть больше 0,6%. Содержание золы в антраците не должно быть больше 2,5% и серы больше 0,5%. Применение антрацита с большим содержанием золы и серы ухудшает качество карбида кремния. Поваренная соль, снижая выход карбида кремния из печи и повышая расход электроэнергии на его образование, вместе с тем способствует созданию более равномерного теплового режима печи и образованию более чистого продукта — зеленого карбида кремния и удалению таких примесей, как Fe₂O₃ и Al₂O₃.

Плавку карбида кремния для создания максимальной устойчивости процесса ведут так, чтобы мощность печи в течение всей кампании поддерживалась на одном уровне. По мере прохождения тока через kern и слой образующегося карбида кремния электрическое сопротивление печи падает, причем тем больше, чем выше температура и чем больше слой карбида кремния. Поэтому для поддержания постоянной мощности печи по мере повышения силы тока, напряжение в печи снижают при помощи потенциал-регулятора или автотрансформатора.

По окончании процесса ток выключают и печь переходит на остывание, после которого производят разборку и сортировку полученных продуктов.

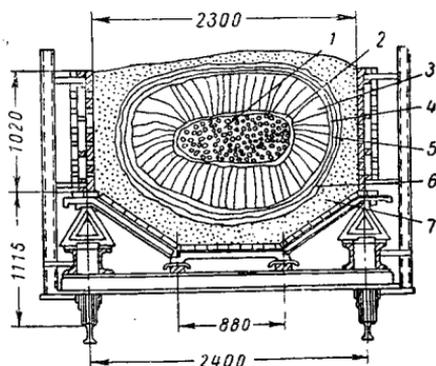
На фиг. 7 показаны поперечный и на фиг. 8 — продольный разрезы печи в состоянии по окончании плавки, из которых видно, что карбид кремния образуется только вокруг kernа.

Выпускаемый промышленностью карбид кремния содержит обычно 98—99% SiC.

Производство зеленого карбида кремния требует большего удельного расхода электроэнергии, по сравнению с производством черного карбида кремния (примерно на 20%), чем главным образом и объясняется его более высокая, по сравнению с электрокорундом, стоимость. По сравнению с плавкой электрокорунда производство карбида кремния требует расхода электроэнергии в 3—4 раза больше.

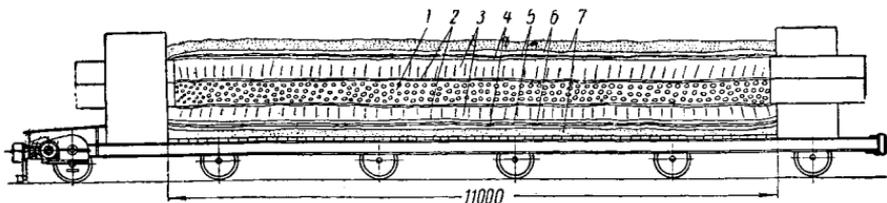
Зеленый карбид кремния несколько более хрупок, чем черный, и имеет отличный от последнего структурный состав; от этого и зависит его повышенная твердость и абразивная способность (примерно на 10—15% выше).

Зерна карбида кремния по своему химическому составу однороднее, чем зерна электрокорунда, что объясняется более высоким содержанием в карбиде кремния основной его составляющей.



Фиг. 7. Поперечный разрез печи для плавки карбида кремния:

1 — kern; 2 — графит; 3 — карборунд; 4 — аморф; 5 — сростки аморфа с силиксиконном; 6 — силиксикон; 7 — непрореагировавшая шихта.



Фиг. 8. Продольный разрез печи после плавки карбида кремния:

1 — kern; 2 — графит; 3 — карбид кремния; 4 — аморф; 5 — сростки; 6 — силиксикон; 7 — непрореагировавшая шихта.

Минеральный состав карбида кремния почти не отличается от химического.

Карбид кремния часто называют карборундом. Это название дала ему американская фирма Carborundum Co.

КАРБИД БОРА

Промышленный выпуск карбида бора (B_4C) начался с 1935 г. Плавка карбида бора производится в низкошахтных дуговых электрических печах по способу, разработанному ВНИИАШем.

По твердости карбид бора превосходит все другие абразивные материалы и уступает лишь алмазу. Однако в отличие от других абразивов он чрезвычайно хрупок, что и определяет его применение в промышленности как материала, предназначенного для шли-

фования, доводки и образования отверстий в различных изделиях из твердых сплавов, цветных камней — рубина, агата, топаза и пр., используемых в качестве подшипников в часовой и приборной промышленности и для других подобных целей.

Выпускаемый промышленностью карбид бора содержит до 94% B_4C и до 78% элементарного бора. Удельный вес карбида бора 2,48—2,52 г/см³. Термостойкость карбида бора 500—600°. При длительном нахождении на воздухе, особенно при повышенной температуре, карбид бора окисляется.

Исходным сырьем для производства карбида бора являются борная кислота и нефтяной кокс.

Шихта для плавки составляется по расчету из новой и возвратной шихты. Процесс плавки карбида бора заключается в обезвоживании борной кислоты и в создании в печи таких температурных и других условий, при которых образуются твердые растворы бора с углеродом. Реакция образования карбида бора протекает в интервале 1800—2500° по уравнению $2B_2O_3 + 7C = B_4C + 6CO$. Расход электроэнергии при плавке карбида бора в 2—2,5 раза больше расхода энергии при производстве карбида кремния.

Плавка ведется при закрытом колошнике на мощности 600—700 квт при напряжении около 100 в, с равномерной подачей шихты в процессе плавки, которая длится в течение 5—6 час.

Низкая температура плавления борной кислоты (550—580°) в сочетании с высокотемпературной реакционной способностью углерода и большой летучестью продуктов борной кислоты вызывают специфические требования к процессу плавки карбида бора.

Выплавленный продукт разбивается, сортируется, дробится, обогащается от графита и классифицируется на требуемые номера зернистости.

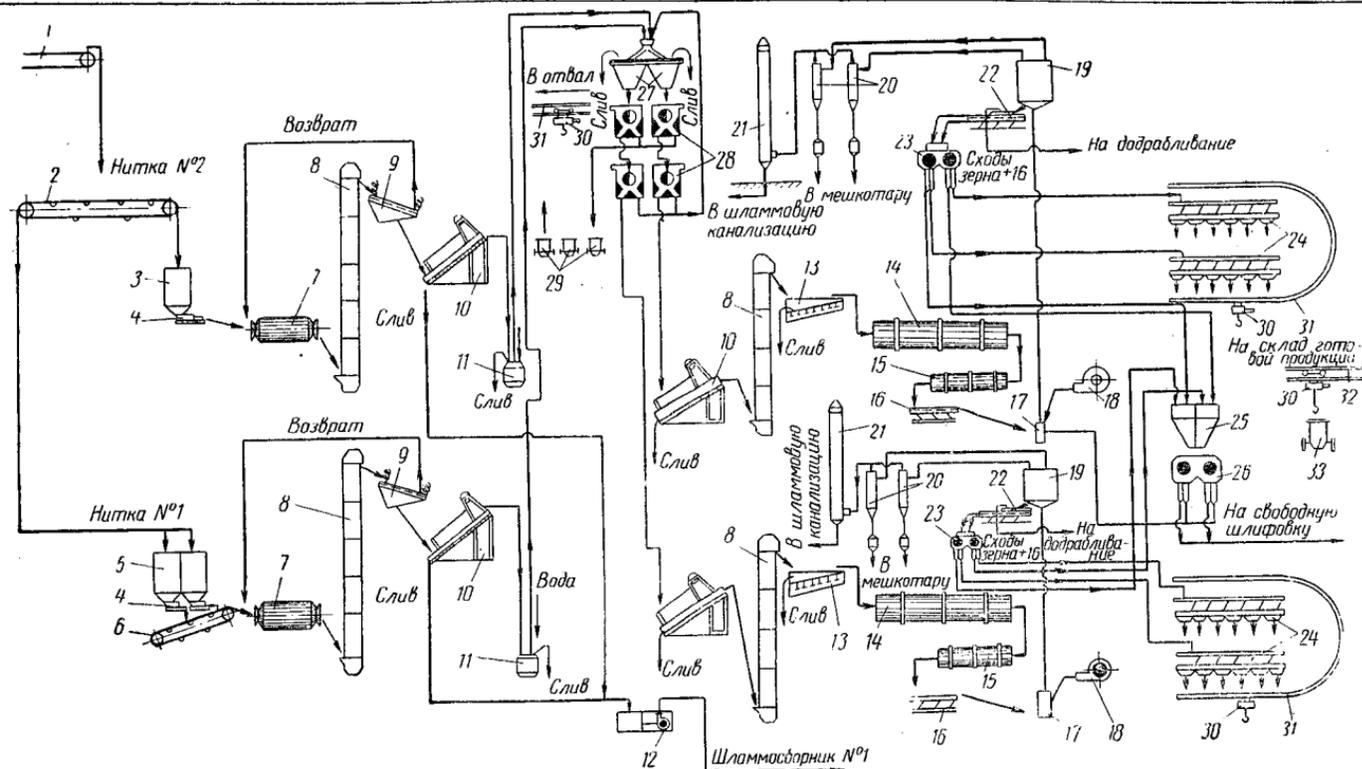
Промышленностью выпускается карбид бора зернистостью от № 80 до М-28. В зависимости от степени зернистости карбид бора имеет то или другое содержание B_4C и общего В. Чем крупнее зернистость карбида бора, тем выше его абразивная способность, тем больше в нем B_4C и В.

Наиболее вредными примесями являются свободный углерод и графит, в целях удаления которых и производится химическое обогащение карбида бора.

Существует также способ получения карбида бора в бескислородных печах сопротивления. Однако этот способ, как более дорогой, не получил в абразивной промышленности распространения, тем более, что в последнее время канд. техн. наук Кондаковым (ВНИИАШ) найден способ получения карбида бора в дуговых печах с таким же небольшим содержанием графита, который получается при плавке в печах сопротивления.

ДРОБЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полученные в результате описанных выше электротермических процессов абразивные материалы подвергаются дроблению, обогащению и классификации на зерно, порошки и микропорошки



Фиг. 10. Схема мокрого дробления электрокорунда:

1 — транспортер ленточный; 2 — транспортер реверсивный; 3 — бункера; 4 — питатель лотковый; 5 — бункера; 6 — транспортер ленточный; 7 — мельница стержневая; 8 — элеватор ленточный; 9 — грохот инерционный; 10 — классификатор реечный; 11 — гидротранспорт; 12 — песковый насос; 13 — обезвоживающий аппарат; 14 — калильный барабан; 15 — холодильный барабан; 16 — лоток транспортера; 17 — пневмотранспорт; 18 — вентилятор высокого давления; 19 — разгрузочный бункер; 20 — циклон; 21 — скруббер центробежный; 22 — грохот распределительный; 23 — магнитный сепаратор; 24 — рассевные грохота; 25 — бункера; 26 — магнитный сепаратор; 27 — конусные приемники; 28 — магнитный сепаратор; 29 — кубели для ферросплава; 30 — тельфер; 31 и 32 — монорельсы; 33 — бункера для зерна.

различной степени зернистости, гранулометрический состав которых регламентирован специальными стандартами. Дробление и обогащение осуществляются сухим или мокрым способом при помощи дробильно-обогащительных установок, связанных между собой транспортирующими устройствами и расположенных в определенной последовательности.

Классификация зерна и порошков производится путем отсева на специальных грохотах, а классификация микропорошков осуществляется, как правило, методом гидравлической классификации.

На фиг. 9 показана схема дробления мокрым способом карбида кремния, а на фиг. 10 — схема мокрого дробления электрокорунда. Как видно из схемы, электрокорунд после дробления подвергается прокалке, а не только сушке, как карбид кремния. Операция прокалки производится для ликвидации аномального расширения электрокорундового зерна, которое после его нагрева при температуре 1000° уничтожается.

Эта операция необходима для увеличения прочности шлифовальных кругов. Кроме того, предполагают, что при прокалке уменьшается число дефектных зерен, особенно имеющих трещины. Вместе с тем при прокалке мелкие зерна частично спекаются в агрегаты.

Карбид кремния, в отличие от электрокорунда, после дробления в стержневой мельнице подвергается операции химического обогащения для повышения содержания SiC и снижения примесей. Частицы ферросплава, а также зерна электрокорунда и карбида кремния, пораженные ферросплавом, отмагничиваются по мере дробления до пределов, допустимых техническими условиями.

ГЛАВА II

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ТВЕРДОСТЬ

Главной отличительной особенностью абразивных материалов, как природных, так и искусственных, является их высокая, по сравнению с другими материалами, твердость.

После алмаза абразивные материалы являются самыми твердыми. На использовании разницы в твердости обрабатываемого материала и материала режущего инструмента и построены все процессы шлифования.

Твердость абразивных материалов обычно измеряется методом царапания, заключающимся в том, что острием одного тела с определенным усилием проводят по поверхности другого и более твердое тело при этом оставляет на поверхности более мягкого царапину определенной глубины, в зависимости от свойств испытуемого тела. Таким образом, этот метод определяет значения поверхности натяжений твердых тел. Чем больше натяжение поверхностного слоя, тем выше считается его твердость.

В составленной на основе этого принципа Моосом шкале твердости корунд занимает девятое место.

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Тальк. | 6. Полевой шпат. |
| 2. Гипс. | 7. Кварц. |
| 3. Известковый шпат. | 8. Топаз. |
| 4. Плавиковый шпат. | 9. Корунд. |
| 5. Апатит. | 10. Алмаз. |

На этом основании говорят, что твердость абразивных материалов равна 9. На самом деле твердость различных абразивных материалов отличается друг от друга и лежит в пределах между 9 и 10 (ближе к девяти).

Шкала Мооса дает весьма слабое представление о величине твердости абразивных материалов, поэтому Риджвей, Баллард и Биллей расширили ее и предложили следующую шкалу:

1. Тальк.
2. Гипс, алюминий.
3. Известковый шпат, медь, латунь.
4. Плавиковый шпат, никель.
5. Апатит, мягкая сталь.

6. Полевой шпат, легированная сталь.
7. Стекло.
8. Кварц, кремьнь, стеллит.
9. Топаз, высокоуглеродистая, закаленная сталь.
10. Гранат.
11. Цирконий, твердый сплав карбида тантала.
12. Электрокорунд, твердый сплав карбида вольфрама.
13. Карбид кремния.
14. Карбид бора.
15. Алмаз.

Однако и эта шкала не дает нужного представления о величине твердости абразивных и других материалов, а также показывает только, какой материал мягче или тверже и какое порядковое место он занимает в данной шкале.

Так, например, по некоторым данным твердость алмаза в 140 раз выше твердости корунда, в то время как по этой шкале корунд занимает двенадцатое, а алмаз пятнадцатое место. На самом деле твердость алмаза выше твердости абразивных материалов и в частности электрокорунда в значительно меньшее число раз. Достоинством этой шкалы является то, что она дает возможность хотя и грубого относительного сравнения твердости не только абразивных материалов между собой, но и с некоторыми металлами и сплавами.

Определенная методом царапания твердость электрокорунда несколько выше твердости лучших сортов корунда; твердость карбида кремния на 10—15% выше твердости электрокорунда, так же как твердость карбида бора выше твердости карбида кремния на 15—20%.

Исследования микротвердости абразивных материалов, проведенные в ВНИИАШ на приборе ПМТ-3, работающем по принципу вдавливания алмазной пирамиды в поверхность испытуемого материала (фиг. 11), дали другие значения твердости. Согласно этим исследованиям, твердость абразивных материалов, определенная при одинаковой нагрузке в 200 г, находится в пределах: электрокорунд 1800—2400, чаще 2200—2300 $кг/мм^2$; монокорунд 1900—2600 $кг/мм^2$; белый электрокорунд 2200—2600, чаще 2400—2600 $кг/мм^2$; карбид кремния (черный и зеленый) 2840—3310, чаще 3100—3300 $кг/мм^2$; карбид бора 3335—4300 $кг/мм^2$; алмаз 10060 $кг/мм^2$.

Таким образом, по этим данным алмаз тверже корунда всего в 5 раз, а карбид кремния тверже электрокорунда в 1,6 раза.

Итак, каждый метод дает свои значения твердости. По нашему мнению, разница в твердости алмаза и указанных выше абразивных материалов значительно больше. С уверенностью можно сказать, что значительная разница в твердости указанных абразивных материалов, несомненно, существует и объясняется различием их состава и строения их атомной или ионной решетки.

Природный корунд, как и электрокорунд, принадлежит к числу трехвалентных соединений.

Однако корунд по своему составу содержит больше примесей, чем электрокорунд, причем эти примеси, растворенные в корунде (особенно TiO_2), снижают его микротвердость.

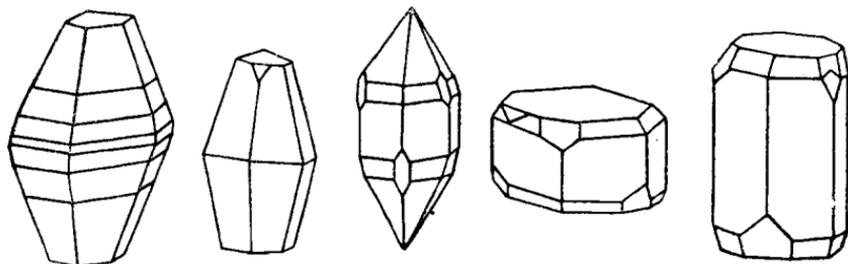
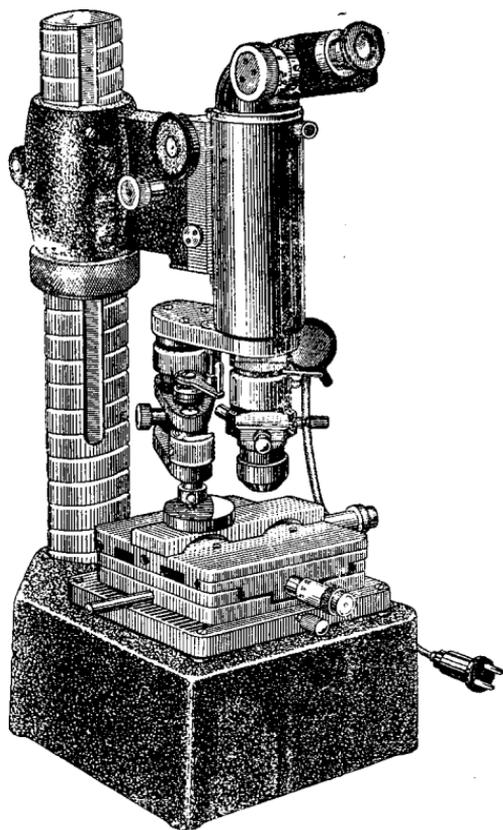
Строение корунда в зависимости от условий его образования различное. Кристаллы корунда имеют различную форму (фиг. 12): пирамидальную, призматическую, ромбоэдрическую и др. Каждый кристалл представляет собой тело той или другой внешней формы, но его внутренняя структура остается неизменной.

Твердость электрокорунда и карбида кремния зависит от содержания составляющих их основных компонентов и примесей. Установлено, что повышение в электрокорунде содержания Al_2O_3 вызывает увеличение его твердости, а также, что увеличение в электрокорунде содержания некоторых окислов изменяет его твердость и вязкость, а повышение CaO и MgO уменьшает твердость и увеличивает хрупкость.

Поэтому белый электрокорунд и монокорунд, содержащие 96—99% Al_2O_3 , обладает более высокой твердостью.

Фиг. 11. Прибор для определения микротвердости ПМТ-3.

содержащие 96—99% Al_2O_3 , обладает более высокой твердостью.



Фиг. 12. Формы кристаллов корунда.

Эти положения подтверждены исследованиями микротвердости нормального и белого электрокорунда.

Примеси Al_2O_3 в карбиде кремния, наоборот, снижают его твердость.

Опытом установлено также, что увеличение содержания Al_2O_3 повышает режущую способность электрокорунда, так же как повышение содержания SiC в карбиде кремния увеличивает его шлифующую способность.

Не следует смешивать понятия твердости абразивных материалов с твердостью абразивных инструментов (шлифовальных кругов, брусков, сегментов). Из абразивного материала самой высокой твердости можно изготовить очень мягкий абразивный инструмент и наоборот.

Твердость абразивных материалов, как мы увидим ниже, тесно связана с их работоспособностью. Поэтому, наряду с изложенным выше определением твердости, существует и другое понятие твердости, которое определяет твердость как работу, затрачиваемую на единицу объема сошлифованного металла. Такое определение твердости, по нашему мнению, нельзя считать правильным, так как шлифование разных металлов требует различного объема работы. Таким образом, получается, что один и тот же абразивный материал при обработке разных металлов и материалов будет иметь разную твердость.

Для сравнения твердости абразивных и обрабатываемых ими материалов приведем значения микротвердости некоторых наиболее широко применяемых в машиностроении металлов (табл. 1).

Значения микротвердости в $кг/мм^2$

Таблица 1

Марка металла	Нормальное состояние	Закаленное состояние	Марка металла	Нормальное состояние	Закаленное состояние
У12	380	1033	Ст. 4	234	560
У10	292	909	Ст. 3	163	520
У8	351	810			

Микротвердость карбидов элементов, легирующих стали, приближается, а у ряда элементов даже превосходит микротвердость абразивных материалов. Так, например, микротвердость карбидов:

$$WC - 1730 \pm 51 \text{ кг/мм}^2;$$

$$VC - 2094 \pm 56 \quad ,$$

$$TiC - 2850 \pm 40 \quad ,$$

Этим и объясняется более трудная обрабатываемость легированных сталей и сплавов.

АБРАЗИВНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Вторым отличительным свойством абразивных материалов является их абразивная способность.

Под термином абразивная способность понимается различная способность разных материалов обрабатывать тот или иной материал. Абразивная способность определяется обычно на приборе Миндта. Способ определения заключается в том, что некоторое количество абразивных зерен одного и того же гранулометрического состава, зажатых между двумя вращающимися в разных направлениях дисками, сошлифовывает с последних за определенное время некоторое количество материала, которое и принимается за критерий абразивной способности данного абразивного материала. Если принять абразивную способность алмаза за единицу, то по данным ВНИИАШа абразивная способность других абразивных материалов зернистости № 80—100 (210—125 *мк*) при шлифовании стекла выражается следующими величинами:

Алмаз	1,0
Карбид бора	0,5—0,6
Карбид кремния	0,25—0,45
Монокорунд	0,15—0,25
Электрокорунд	0,14—0,16
Наждак	0,03—0,08
Кварц	0,02—0,03

При установлении эффективности сошлифовывания стекла различными абразивными материалами зернистостью № 280—400 (50—28 *мк*) член-корр. Академии наук Н. Н. Качалов получил следующие результаты:

Кварцевый песок	1,0
Электрокорунд	1,7
Корунд	2,1
Карбид кремния	2,7

Таким образом, при шлифовании стекла зернами карбида кремния, имеющими размерность 210—125 *мк*, абразивная способность в 2—3 раза превосходит абразивную способность электрокорунда и в 1,5 раза при шлифовании зернами карбида кремния 50—28 *мк*, хотя по твердости эти абразивные материалы отличаются всего на 10—15%. Вместе с тем алмаз, якобы имеющий твердость в 140 раз выше, чем электрокорунд, превышает абразивную способность последнего только в 7 раз.

Интересно отметить, что если принять микротвердость алмаза за единицу, то значения микротвердости довольно близко сойдутся с указанными выше величинами абразивной способности (табл. 2).

**Сравнение показателей микротвердости
и абразивной способности**

Материал	Микро- твердость	Абразивная способность
Алмаз	1	1
Карбид бора	0,49	0,5—0,6
Карбид кремния	0,33	0,25—0,45
Электрокорунд	0.18—0,22	0,14—0,16

Такая разница в абразивной способности абразивных материалов объясняется не только различной их твердостью, но и различием их строения и прочности и отсюда разной способностью дробимости, что, в свою очередь, определяет различную форму и углы зерен, а также их режущую способность.

Главным образом абразивная способность зависит от содержания в абразивных материалах их основной составляющей. Так, белый электрокорунд и монокорунд, имеющие высокое содержание Al_2O_3 и меньше примесей, чем обычный электрокорунд, обладают более высокой абразивной способностью.

Режущая способность абразивных материалов и их способность сопротивляться усилиям, возникающим при шлифовании, также в значительной степени зависят от их дробимости и хрупкости. Опыты по определению дробимости абразивных зерен путем выдувания их из сопла пескоструйного аппарата под давлением в 3,5 атм на стальную плиту показали, что из трех испытанных абразивных материалов наиболее хрупким является карбид кремния, затем электрокорунд и, наконец, белый электрокорунд. Таким образом, дробимость зерен карбида кремния под действием удара выше, чем электрокорунда, причем форма зерен карбида кремния получается более угловатой с более острыми углами и гранями. Этим, помимо более высокой твердости карбида кремния, и объясняется его высокая абразивная способность, проявляющаяся при обработке хрупких и особенно вязких материалов.

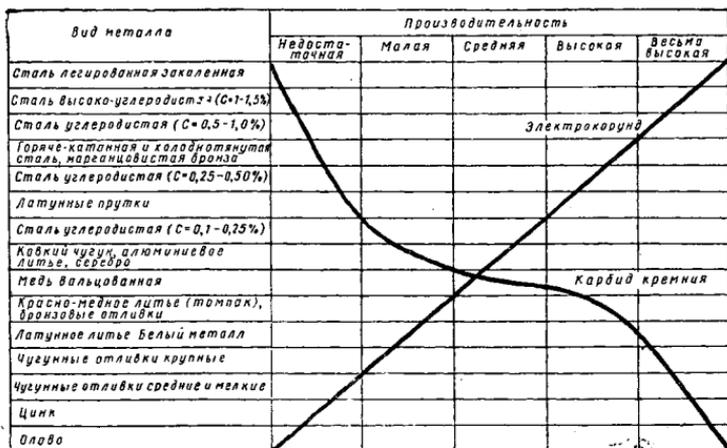
Вместе с тем повышенная, по сравнению с электрокорундом, способность дробимости говорит о большей хрупкости карбида кремния. Поэтому абразивная способность зерен карбида кремния и превышает в 1,5—3 раза абразивную способность зерен электрокорунда, шлифовальные же круги, изготовленные из этих материалов, не дают столь резкой разницы в производительности при сравнении их в работе.

Карбид бора более хрупкий материал, чем карбид кремния, и обладает еще более высокой дробимостью, особенно в крупных номерах зернистости.

Абразивная способность разных абразивных материалов неодинакова при обработке различных материалов.

Таким образом, абразивную способность, определенную при обработке стекла, распространять на различные металлы нельзя.

Вместе с тем испытание абразивной способности способом Миндта на металлических дисках не дает сколь-либо повторяющихся результатов в связи с тем, что испытуемое абразивное зерно шаржируется в металл. Поэтому от испытания этим методом абразивной способности абразивных материалов на различных ме-



Фиг. 13. График абразивной способности.

таллах пришлось отказаться, и в качестве испытываемого материала используют стекло, как дающее наиболее повторяемые сравнительные результаты.

Нельзя считать вполне правильным и встречающееся в литературе утверждение о том, что чем больше разница в твердости между абразивным и обрабатываемым материалом, тем выше режущая способность абразива. Например, разница в твердости между сталью любой марки и электрокорундом меньше, чем с карбидом кремния, однако для шлифования стали, как правило, применяется электрокорунд.

Карбид бора, хотя по твердости и является самым твердым после алмаза материалом, однако не применяется для шлифования металлов вследствие большой своей хрупкости.

Таким образом, режущая способность зависит не только от разницы в твердости, но и от строения и прочности абразивных и обрабатываемых материалов.

Показанный на фиг. 13 график в некоторой степени характеризует абразивную способность материалов и позволяет вывести общее правило: карбид кремния следует применять при обработке

металлов, обладающих низким сопротивлением разрыву, а электрокорунд — для обработки металлов с высоким удельным сопротивлением разрыву. Из этого графика видно также влияние содержания в стали углерода на обрабатываемость шлифованием.

Свойства абразивных материалов позволяют изготовлять из них абразивные инструменты для обработки любых металлов и материалов, и вместе с тем дают возможность осуществлять шлифование свободным зерном.

Абразивные материалы обладают и рядом других свойств, вследствие чего они, особенно карбид кремния, широко используются в промышленности и для других целей. В частности, абразивные материалы с успехом применяются в качестве изоляционных, кислотоупорных и огнеупорных материалов.

Абразивная способность в значительной степени зависит от содержания в абразивных материалах примесей.

Так, примеси CaO , содержащиеся в электрокорунде, образуют с основной его составляющей Al_2O_3 такие минеральные соединения, которые сильно снижают абразивную способность.

Также понижают абразивную способность примеси MgO и SiO_2 .

Вместе с тем небольшие количества примесей TiO_2 и Cr_2O_3 несколько увеличивают абразивную способность.

Таким образом, абразивная способность электрокорунда находится в большой зависимости от содержания в нем «физического» корунда, в связи с чем белый электрокорунд и особенно монокорунд обладают в 1,2—1,5 раза более высокой абразивной способностью, чем электрокорунд.

Абразивная способность белого электрокорунда зависит от содержания в глиноземе примесей Na_2O , как известно, вызывающих образование β -глинозема, который имеет пониженную твердость и абразивную способность.

В карбиде кремния примесей содержится значительно меньше, однако, так же как и в электрокорунде, они изменяют кристаллическую структуру и свойства этого материала.

Наиболее вредными примесями, снижающими абразивную способность карбида кремния, являются Al_2O_3 и CaO .

Зеленый карбид кремния имеет меньше примесей, чем черный, и потому его абразивная способность несколько выше.

Абразивная способность зависит также от размеров, формы зерен и их строения. Наличие дефектных зерен снижает абразивную способность, особенно это относится к пластинчатым зернам.

ДРУГИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Успешность процесса шлифования в значительной степени зависит от таких механических свойств зерен абразивного инструмента, как сопротивление изгибу и сжатию.

Д-р техн. наук Н. И. Волский, испытывая в институте математики и механики Ленинградского Университета механические свойства корунда, электрокорунда и карбида кремния, пришел к выводу, что монокристалл корунда обладает более высоким временным сопротивлением изгибу и сжатию, чем карбид кремния, и что у поликристалла электрокорунда сопротивление изгибу и сжатию ниже, чем у монокристалла корунда и у карбида кремния. По полученным им данным сопротивление сжатию у монокристалла корунда равно 224—304 кг/мм², причем оно выше при сжатии в направлении, перпендикулярном оси кристалла.

Сопротивление изгибу монокристалла корунда, перпендикулярное оптической оси, равно 37 кг/мм².

Сопротивление сжатию поликристалла электрокорунда равно 76 кг/мм², а сопротивление изгибу всего 8,7 кг/мм².

Сопротивление сжатию монокристалла карбида кремния перпендикулярно оптической оси равно 229 кг/мм², а сопротивление изгибу 15,5 кг/мм².

Фактически зерна карбида кремния ведут себя, в зависимости от способа приложения нагрузки, по-разному. При статической нагрузке зерна карбида кремния дробятся меньше, чем зерна электрокорунда, в то время как при динамической нагрузке зерна карбида кремния дробятся больше, чем зерна электрокорунда.

Из приведенных цифр видно, что сопротивление электрокорунда и карбида кремния сжатию и особенно изгибу значительно ниже, чем у обрабатываемых ими металлов и сплавов.

Это обстоятельство свидетельствует о том, что для эффективной работы абразивными материалами их не следует подвергать слишком большой нагрузке, так как работа, сопряженная с большими усилиями, может вызвать разрушение зерен еще до момента их затупления.

Таким образом, абразивные материалы, имея исключительно высокую твердость, в то же время обладают сравнительно низкой прочностью на сжатие и особенно на изгиб.

Исследования прочности зерен на сжатие, проведенные в Институте прикладной минералогии канд. техн. наук М. И. Койфманом, также показали, что электрокорунд обладает меньшей сопротивляемостью сжатию, чем карбид кремния. По его данным, прочность электрокорунда равна 100 кг/см², а карбида кремния 186 кг/см². Корунд (поликристалл), содержащий больше примесей, чем электрокорунд, имеет прочность на сжатие 60 кг/см².

Прочность зерен зависит не только от их химического и минерального состава, но и от величины. Чем меньше зерна, тем больше их удельная прочность на сжатие. Особенно ярко это сказывается при работе карбидом бора. Зерна карбида бора мелких номеров зернистости, например размерностью 42—20 мк, в несколько раз прочнее на сжатие, чем крупные зерна, например 420—250 мк. Зерна монокорунда № 46—80, как правило, имеют более высокую (на 20—25%) прочность, чем зерна электрокорунда.

Зерна монокорунда, представляющие агрегаты и сростки крупнее № 36, имеют значительно меньшую механическую прочность,

чем монокристаллические зерна. Под действием охлаждающей жидкости, при воздействии сил, возникающих в процессе шлифования, такие зерна теряют прочность и частично разрушаются, обнажая новые режущие грани, увеличивая этим самым расход абразивного инструмента, но и улучшая его самозатачиваемость.

Зерна зеленого карбида кремния имеют несколько большую прочность (на 10—15%), чем зерна черного карбида кремния, что позволяет работать ими с большей нагрузкой. Прочность зерен зависит не только от их физико-механических свойств, но и от способа и места приложения к ним нагрузки, а также от их формы и расположения при испытании.

Прочность зерен электрокорунда может быть повышена на 10—15% за счет прокаливания их при температуре 1000—1100°. В процессе этой операции дефектные зерна раскалываются по местам трещин, это увеличивает общую прочность зерен.

ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Карбид кремния и электрокорунд применяются промышленностью и для целей, ничего общего с процессом шлифования не имеющих. Так, карбид кремния применяется для изготовления силитовых сопротивлений (разрядников), для производства различных огнеупорных изделий, для изготовления нагревательных стержней к электрическим печам и т. п.

Электрокорунд применяется для изготовления огнеупорных изделий (трубок, муфелей и т. п.), в качестве изолирующего материала при высокотемпературных процессах и т. п.

Такое разностороннее применение абразивных материалов объясняется их особыми тепловыми и электрическими свойствами. Так, карбид кремния обладает весьма высокой теплопроводностью, примерно одинаковой с графитом и равной 0,015—0,02 г/кал·сек при температуре 1000°. Вместе с тем он термостоек к внезапным и резким изменениям температуры и при этом не трескается и не ломается.

Теплопроводность электрокорунда значительно ниже, чем карбида кремния, при температуре 1200° она равна 0,008—0,0055 г/кал·сек.

Теплоемкость карбида кремния при 0° равна 0,14 и при 900° она доходит до 0,285 ккал/кг·град.

Теплоемкость электрокорунда при 100° равна 0,1877—0,2 ккал/кг·град и повышается до 0,279 при температуре плавления. Температура плавления обычного электрокорунда 1850—1900° и очень чистого белого электрокорунда 2050°.

Карбид кремния не имеет точки плавления, так как при достижении температуры выше 2250—2500° он возгоняется или разлагается на составляющие его части.

Коэффициент линейного расширения карбида кремния резко уменьшается с повышением температуры и находится в пределах $6,58 \cdot 10^{-6}$ при 100° и $2,98 \cdot 10^{-6}$ при 900°.

Коэффициент линейного расширения электрокорунда при высоких температурах значительно выше, чем у карбида кремния, при 900° он равен приблизительно $7,5 \cdot 10^{-6}$.

Показатель преломления карбида кремния очень высокий, около 2,74; у электрокорунда он несколько ниже — 1,76.

Карбид кремния является хорошим проводником электричества, причем его электропроводность (близкая к углероду) быстро возрастает по мере повышения температуры. Так, при 25° его сопротивление равно 50 мгом на 1 см^3 , а при температуре 1400° всего 0,65 мгом на 1 см^3 . Благодаря этому свойству карбид кремния находит широкое применение в промышленности. В частности, на его высокой проводимости основано его применение для производства электронагревательных стержней для температур до 1400° .

Образующаяся иногда (при нагревании на воздухе) на поверхности карбида кремния пленка SiO_2 понижает его электропроводности.

Электропроводность электрокорунда хуже, чем карбида кремния, хотя и быстро увеличивается с повышением температуры.

Коэффициент линейного расширения карбида бора в интервале от 25 до 800° равен $45 \cdot 10^{-7}$. Электропроводность карбида бора меняется с изменением температуры, так, если при температуре 20° она равна $0,445 \text{ ом/см}^3$, то при 500° она составляет $0,023 \text{ ом/см}^3$.

Эти тепловые свойства абразивных материалов положительно сказываются в процессе шлифования, когда абразивные зерна работают в условиях резко изменяющихся нагрузок и температур.

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Химический состав электрокорунда зависит от состава шихты и методов его производства.

Наиболее широкое применение в промышленности имеет электрокорунд нормальный, содержащий 92—95% Al_2O_3 . Присутствие в электрокорунде в виде примесей окислов: кремния, титана, железа и других металлов, окрашивают его в различные цвета.

Так, примеси Cr дают электрокорунду красноватый цвет, примеси TiO_2 темно-синий и черный цвет, примеси CaO темно-коричневый цвет. Химически чистый электрокорунд имеет белый, непрозрачный, молочный цвет.

Электрокорунд с трудом растворяется в расплавленных щелочах, в частности в гидро- и пиросульфатах калия.

В большинстве кислот электрокорунд нерастворим. Очень медленно растворяется под действием кипящей серной кислоты.

Расплавы связок, применяемых в производстве абразивного инструмента, в частности расплавы стекол, как это показано в работе д-ра техн. наук Филоненко Н. Е., частично растворяют электрокорунд с поверхности, вследствие чего содержание Al_2O_3 в связке увеличивается и повышается прочность ее сцепления с абразивным зерном. Действует на электрокорунд также газ

фтора; газы хлора и водорода никакого действия на него не оказывают.

Электрокорунд устойчив против основных плавней, почему его и применяют для футеровки печей, работающих с основным шлаком.

Химический состав карбида кремния зависит главным образом от чистоты исходных материалов.

В промышленности применяется кристаллический карбид кремния от черного до зеленого цвета.

Карбид кремния, как черный, так и зеленый, обычно содержит 98—99% SiC и 1—2% примесей в виде окислов: железа, алюминия, кальция и др.

Химически чистый карбид кремния бесцветен и состоит из 70,045% кремнезема и 29,955% углерода. В химическом отношении карбид кремния отличается чрезвычайной инертностью и является весьма кислотоупорным материалом. Хлор начинает разрушать его лишь при длительном нагревании при температуре 600° и то только с поверхности. Только при 1200° хлор разрушает карбид кремния.

Из кислот на карбид кремния действует очень медленно, растворяя его с поверхности, только смесь азотной и плавиковой. Остальные кислоты не действуют на карбид кремния даже при высокой температуре.

Кислород при температуре до 1000° окисляет карбид кремния лишь с поверхности, и только при более высоких температурах его действие становится заметнее.

Энергичнее и быстрее на карбид кремния действуют едкие щелочи и расплавы, содержащие бор, глинозем и кальций.

В окислительной атмосфере при температуре свыше 2200° карбид кремния начинает заметно распадаться.

В присутствии плавней, особенно натриевого полевого шпата, уже при температуре около 1000° карбид кремния начинает разлагаться, что вредно сказывается на абразивном инструменте при его термической обработке.

ГЛАВА III

АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Абразивными инструментами называются инструменты, изготовленные из зерен абразивного материала, скрепленных между собой в одно целое тело связующим веществом и разделенных друг от друга порами.

Различают два типа абразивных инструментов: жесткие и гибкие. Из всех жестких видов абразивных инструментов наиболее широкое применение имеют шлифовальные круги различных форм и размеров.

Шлифовальные круги как по свойствам, так и по формам и строению не похожи ни на один другой вид режущих инструментов. Шлифовальный круг режет своими зернами, представляющими отдельные резцы и в этом отношении может быть сравнен с фрезой, в которой беспорядочно, с неравным шагом и не в одной плоскости расположены разные по форме и размерам зубцы. По многолезвийности, по роду своего рабочего движения (вращения круга), по свободным пространствам — порам (между зубцами у фрезы и между зернами в круге), в которых должна помещаться снимаемая стружка, по методу и периодичности работы зерен и зубцов шлифовальный круг и фреза похожи друг на друга. По прерывистости режущей кромки, по беспорядочности расположения зерен и пор, их геометрии, форме и размерам, по числу одновременно работающих зерен и расположению их в разных плоскостях шлифовальный круг отличается от фрезы и, несмотря на кажущуюся простоту, является весьма сложным режущим инструментом. Обработка абразивным инструментом в зависимости от ее характера и цели носит различные названия: шлифование, заточка, доводка, хонингование, суперфиниш, полирование и пр.

Разнообразие работ, выполняемых при помощи абразивных инструментов, создало такое же многообразие их видов, отличающихся друг от друга не только по геометрической форме и размерам, но и по материалу абразивного зерна, типу связки, величине зерен, степени твердости и структуры, расположению зерен, связки и пр. Эти параметры абразивного инструмента: форма, размеры, абразивный материал, связка, зернистость, твердость, структура определяют его свойства и назначение и называются его характеристикой.

В отличие от других режущих инструментов абразивные инструменты в процессе работы обладают способностью:

а) в известной мере самозатачиваться;
б) обрабатывать материалы любой степени твердости;
в) обеспечивать такую степень точности и качества поверхности, которую нельзя получить никаким другим видом инструмента;

г) затачивать любые другие виды режущих инструментов;

д) работать со скоростью резания, превосходящей применяемую при всех других процессах резания;

е) снимать с обрабатываемого изделия слой металла тончайшей и весьма значительной величины (доли микрона и миллиметры). Большое число режущих зерен, расположенных на рабочей поверхности абразивного инструмента, позволяет ему, в результате большой скорости, производить работу резания даже при очень тонкой стружке в достаточной мере производительно и рентабельно. Подсчет показывает, что на рабочей поверхности по периферии круга диаметром 400 мм, толщиной 40 мм, зернистости 60 расположено около 500 000 зерен, которые снимают в одну секунду десятки миллионов стружек.

Вместе с тем строение абразивных инструментов и несовершенство технологии их производства вызывают ряд недостатков, в частности:

а) разнообразие формы и размеров зерен, случайность их расположения в теле и на поверхности абразивного инструмента создают неоднородность в его строении и в работе;

б) разнородность свойств материалов, из которых создан абразивный инструмент (абразивных и связующих) и несовершенство технологии его производства создают неоднородность в его **твердости и строении;**

в) бесконечно большое число снимаемых в процессе шлифования стружек определяет большой расход энергии, затрачиваемой на единицу снятого материала, по сравнению со всеми другими видами обработки;

г) недостаточная по сравнению с металлическим инструментом прочность на разрыв, сжатие и изгиб не позволяет изготавливать абразивные инструменты с любыми соотношениями их размеров;

д) зерна абразивных инструментов, расположенные на рабочей поверхности, связаны между собой более прочно, чем зерна, расположенные на углах, вследствие чего в процессе работы кромки абразивных инструментов изнашиваются значительно быстрее.

Абразивный инструмент одной определенной характеристики не является широко универсальным инструментом. Успех его работы зависит от правильности выбранной характеристики, рациональности установленных режимов работы, состояния станка, на котором производится работа данным абразивным инструментом, и в значительной степени от квалификации работающего.

Старейшая фирма США Нортон К° в своих рекомендациях по эксплуатации абразивных инструментов пишет: « . . . Часто потребители кругов удивляются, почему на данном заводе не получается таких же хороших результатов, какие получают на соседнем заводе, применяя те же круги и выполняя одинаковую работу на одинаковых станках» и отвечает «ответ один — меньше работающего». И это несомненно так. Чрезвычайное обилие факторов, от которых зависит успешная работа абразивного инструмента, их крайнее разнообразие и сложность, парадоксальные на первый взгляд рекомендации (например, чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче надо брать круг) при кажущейся простоте абразивного инструмента, часто вызывают неправильные представления и требования к его работе. Поэтому вопросам изготовления, изучения свойств и выбора характеристики абразивных инструментов, а также создания требуемых условий эксплуатации должно уделяться гораздо больше внимания, чем это имеет место в практике наших абразивных и машиностроительных заводов.

Успешность процессов абразивной обработки зависит также от степени подготовки абразивного инструмента — уравниваемости, своевременности и качества правки и т. п. — и шлифовального станка к работе.

Режим работы абразивного инструмента должен устанавливаться оптимальный для данных условий работы, чтобы обеспечивать максимально возможную производительность, необходимую точность и качество детали и минимальный расход абразивного инструмента. Сочетание этих требований очень важно для успеха работы и определяет правильность постановки дела эксплуатации абразивных инструментов и шлифовальных станков.

Создание абразивного инструмента, обладающего высокой степенью прочности на разрыв, особенно необходимой кругам для скоростного шлифования, позволяет во многих случаях применять скоростные режимы абразивной обработки и этим самым повышать производительность труда и чистоту поверхности шлифуемых деталей. Надо надеяться, что в ближайшее время эти передовые режимы получат еще более широкое распространение.

В последнее время для целей шлифования и полирования все шире начинают применяться такие виды абразивных инструментов, как гибкие круги, шлифовальная шкурка в виде лент, а также специальные гибкие ленты на вулканитовой связке.

ПРОИЗВОДСТВО АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Технология производства и контроля абразивных инструментов в значительной степени определяет их рабочие свойства: однородность, уравниваемость, стойкость, а также размеры. Поэтому каждый работник, занимающийся вопросами эксплуатации абразивного инструмента, для правильного выбора и применения их должен знать хотя бы вкратце способы их производства.

Наибольшее применение при шлифовании имеют абразивные инструменты, изготовленные на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках. Кроме того, в небольших количествах выпу-

скаются и применяются шлифовальные круги на магниевой и силикатовой связках, а алмазные круги изготавливаются на специальной бакелитовой (кремнеорганической) и на металлокерамических связках.

Назначение связок заключается в скреплении зерен абразивного инструмента и в удерживании их от преждевременного выкрашивания в процессе шлифования, которое, как известно, характеризуется высокими температурами и значительными усилиями резания.

Абразивный инструмент, изготовленный на указанных выше связках, удовлетворяет требованиям абразивной обработки и поэтому широко употреблявшиеся ранее круги на олеонитовой и шеллаковой связках в настоящее время почти не применяются, так как обладают значительно большими недостатками, чем круги на применяемых в настоящее время связках.

Процесс изготовления абразивного инструмента, независимо от рода связки, состоит: в приготовлении связки, смешении абразивной массы, формовании, термической обработке, механической отделке и испытании.

Формование керамических кругов производится двумя способами: прессованием или литьем.

В отечественной промышленности применяют способ прессования, так как метод литья требует в несколько раз большего времени на изготовление и производственных площадей, менее производительен и создает большое количество отходов. В дальнейшем мы будем говорить только об абразивном инструменте, изготовляемом способом прессования.

АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

Производство абразивных инструментов на керамических связках начинается с изготовления связок. В настоящее время все заводы, изготавливающие этот вид инструмента, готовят связки, главным образом, из местных материалов, сырьем для производства которых являются: глина, плавни (калиевый полевошпат, тальк, растворимое стекло и др.) и кварцы. Глины применяются главным образом огнеупорные (с температурой плавления 1750° и выше), в качестве плавня применяется главным образом калиевый полевошпат, имеющий температуру плавления 1200—1250°. Из этих материалов путем их тонкого измельчения и затем смешивания в определенных пропорциях, зависящих от их состава, готовятся связки, которые в процессе термической обработки полностью или частично расплавляются и скрепляют абразивные зерна. Связки, почти полностью расплавляющиеся, называются плавящимися или стекловидными и применяются для производства абразивных инструментов из электрокорундового зерна. Связки, частично расплавляющиеся, обладающие более высокой температурой плавления, чем стекловидные, называются спекающимися и применяются для изготовления абразивных инструментов из карбида кремния.

В процессе термической обработки абразивных инструментов из электрокорунда плавящиеся связи вступают в реакцию с зернами и прочно скрепляют их между собой.

Взаимодействие связи с зернами карбида кремния не приводит к более прочному сцеплению зерен между собой.

Контроль приготовления связок, помимо проверки соответствия качества сырья, из которого они изготавливаются, техническим условиям поставки предусматривает проверку однородности состава и температуры плавления готовой связки.

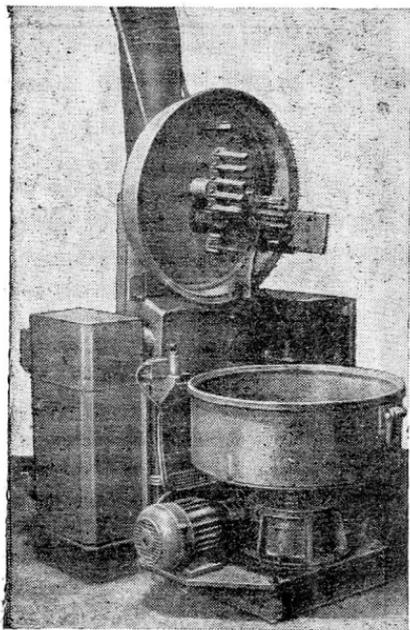
Однородность состава связок зависит не только от стабильности качества каждого из применяемых материалов, но и от тщательности их смешения. Поэтому эта операция обязательно контролируется.

При изготовлении связок, кроме того, регламентируется степень тонкости помола, так как от нее также зависит однородность связки и прочность сцепления абразивных зерен. Чем тоньше помол, тем это лучше и для однородности абразивной массы.

Следующей операцией технологического процесса является приготовление абразивной массы. Эта операция заключается в смешивании связки и абразивного зерна в заданных рецептом пропорциях в смесительных машинах (фиг. 14) и в механической, или ручной протирке смешанной массы через сито определенного номера (обычно на один-два номера крупнее номера зернистости абразивного материала). При смешивании в массу добавляется

для придания ей свойства формуемости и для повышения прочности заформованным изделиям необходимое количество клеящего вещества. В качестве клеящего вещества применяют раствор декстрина или жидкого стекла. Вместе с тем, добавка клеящего вещества способствует уменьшению трения зерен о стенки пресс-формы при прессовании. В процессе обжига изделий декстрин выгорает, а добавка жидкого стекла способствует растеканию связки при ее расплавлении. Вместе с тем применение жидкого стекла отрицательно отражается на прочности обожженных абразивных инструментов, несколько снижая ее.

Операция смешения массы является чрезвычайно важной для однородности абразивного инструмента. Зерна абразивных материалов и связка должны при смешивании распределяться макси-



Фиг. 14. Смесительная машина.

мально равномерно, поэтому время смешивания должно быть строго регламентировано. В процессе смешивания зерна должны обволакиваться связкой так, чтобы вся смесь представляла собой конгломерат отдельных тел с ядром из зерен и оболочек из связки. После смешивания масса должна иметь однородный состав, а в результате протирки через сито она должна получить рыхлость. Приготовление мелкозернистых масс должно производиться, для лучшей их однородности, в шаровых мельницах.

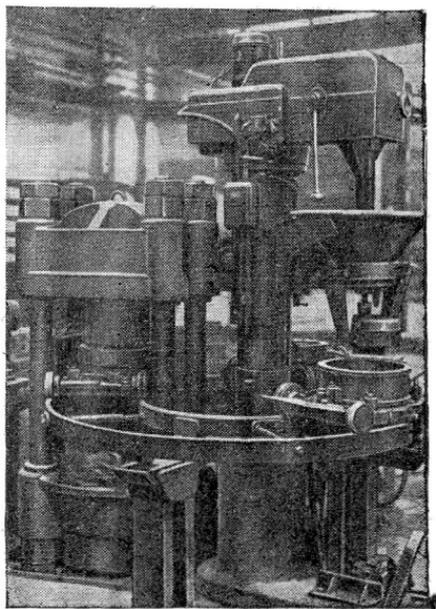
Подготовленная таким способом масса идет на формование, которое производится на специальных гидравлических прессах, где формуемой массе придаются заданная форма и размеры с припусками или без них, которые должны иметь готовые абразивные инструменты.

В зависимости от диаметра, толщины и зернистости, структуры и твердости подлежащих формованию абразивных инструментов, применяют прессы мощностью от 50 до 2000 т.

Формование заключается в следующем: отвешенная с возможной точностью масса поступает через разравнивающее устройство в пресс-форму, в которой она по мере ее наполнения разравнивается до состояния, обеспечивающего одинаково равномерное ее распределение по всему объему пресс-формы. Чем равномернее степень распределения массы в пресс-форме, тем однороднее по твердости и уравновешенности будет шлифовальный круг. Поэтому операции разравнивания и конструкции разравнивающего устройства должно уделяться максимальное внимание.

Затем пресс-форма с уложенной верхней плитой (фиг. 15) поступает под плунжер пресса. Прессование ведется при удельном давлении от 50 до 250 $кг/см^2$ в зависимости от характеристики формуемого абразивного инструмента. Чем больше суммарная поверхность тел, подвергаемых прессованию, т. е. чем медче зернистость формуемых абразивных инструментов, тем больше должно быть удельное давление для получения абразивного инструмента одной и той же степени плотности его строения.

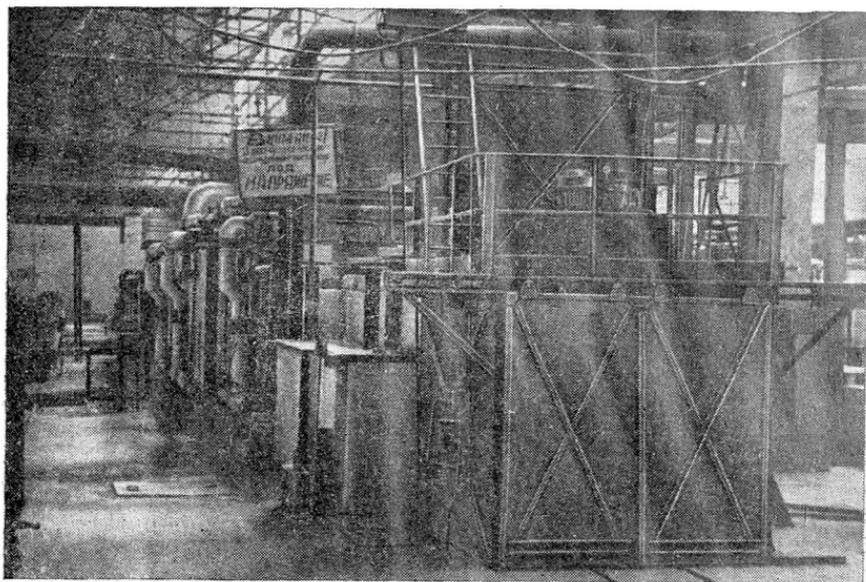
Для обеспечения максимально однородной степени плотности по всей высоте формуемой массы, прессование производится с подпрессовкой, т. е. давление прикладывается к верхней и нижней



Фиг. 15. Гидравлический пресс с конвейерным столом, разравнивающим устройством и тележками с пресс-формами.

стороне пресс-формы, причем подпрессовка осуществляется при помощи специальных устройств. После снятия давления пресс-форма поступает на выталкиватель, где заформованное изделие, лежащее на нижней плите, освобождается из пресс-формы.

Для достижения большей однородности при массовом производстве формование обычно производится методом прессования до заданной высоты, т. е. до получения изделия точно заданного объема. Заканчивается операция прессования переворачиванием изделия на сушильную плиту, на которой оно и поступает в сушилку-



Фиг. 16. Туннельная печь для обжига кругов.

Помимо гидравлических прессов для формования применяются фрикционные прессы. На этих прессах формируются главным образом круги, бруски и сегменты небольших размеров. Головки формируются обычно на прессах-автоматах.

Прочность на изгиб заформованных кругов находится в пределах $0,1—1 \text{ кг/см}^2$, т. е. очень небольшая. В целях ее повышения и удаления содержащейся в них влаги, круги подвергаются сушке, после которой их прочность резко возрастает (до 30—40 раз), а влажность уменьшается до $0,1—0,5\%$. Сушка производится при температуре, не превышающей 100° , по определенному температурному режиму в зависимости от размеров и характеристики абразивных инструментов. Чем толще круг и чем мельче его зернистость, тем длительнее время сушки.

Затем круги поступают на термическую обработку — обжиг, которая проводится в печах непрерывного или периодического действия (фиг. 16). И в том, и в другом случае абразивные из-

делия загружаются и ставятся в печь на специальном огнеупорном припасе, причем устанавливаются так, чтобы печные газы равномерно обогревали их со всех сторон. Так как в процессе термической обработки заформованные изделия должны получить заданную рецептом прочность и твердость, необходимо, чтобы установленный технологическим процессом температурный режим обжига и остывания был точно выдержан. Температура в печи в течение всего процесса контролируется при помощи термопар, оптических пирометров и пироскопов. Контроль газовой среды и давления осуществляется при помощи газоанализаторов и тягомеров.

Высокая температура термической обработки (1250—1300°) и длительное охлаждение делают этот процесс весьма ответственным, требующим самого пристального внимания, и вместе с тем очень продолжительным — до 10 дней.

Чем точнее и строже осуществлен заданный режим и чем стабильнее температура, тем лучше достигается заданная твердость, тем меньше брак.

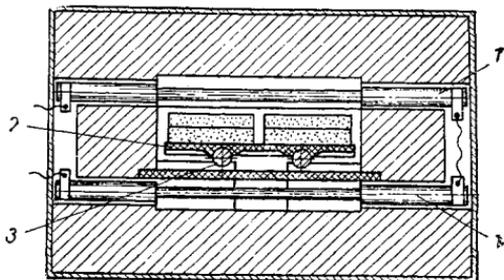
В целях создания более равномерной температуры в печном пространстве, достижения меньших ее перепадов и лучшей дифференциации режима термической

обработки, в последнее время обжиг ряда абразивных изделий — брусков и тонких мелкозернистых кругов — осуществляется в туннельных щелевых печах (фиг. 17). В этих же целях периодические печи все более заменяются туннельными печами непрерывного действия.

Температурный режим термической обработки — обжига и остывания — зависит от ряда факторов и в частности: от теплопроводности абразивных инструментов, от метода постановки обжигаемых изделий в печь, от характеристики абразивных изделий, от вида связки, от типа печи и т. п. Чем выше теплопроводность, чем крупнее зернистость, чем меньше плотность постановки изделий в печи, тем короче продолжительность обжига.

Так, абразивные инструменты из карбида кремния, имеющие более высокую теплопроводность, чем электрокорундовые, требуют меньшей температуры термической обработки. Обжиг и остывание в туннельных печах и особенно в щелевых печах происходит быстрее, чем в периодических печах.

Термическая обработка, как в части обжига, так и остывания, имеет первенствующее значение в технологии производства абразивных изделий. От правильности назначения температурного режима (скорости подъема температуры, длительности выдержки



Фиг. 17. Схема щелевой электрической туннельной печи (разрез):

1 — нагреватели; 2 — вагонетка с кругами, подлежащими обжигу; 3 — направляющие движения вагонетки.

при конечной температуре и ее величины, среды и давления) и от успешности его проведения в значительной степени зависит прочность, равномерность и степень попадания в заданную рецептом твердость.

Процесс термической обработки абразивных изделий вызывает в них значительные температурные напряжения, которые при неправильном ведении процесса приводят к трещинам и другим изменениям формы.

Эти напряжения, разные по знаку, образуются в результате разности температур между наружными и внутренними частями абразивных изделий. Наружные части нагреваются быстрее, чем внутренние, и, наоборот, остывают медленнее. Величина этих напряжений зависит от теплопроводности абразивного изделия. Теплопроводность мелкозернистых абразивных изделий значительно меньше, чем среднезернистых и крупнозернистых. Поэтому и режимы термической обработки мелкозернистых абразивных изделий более длительны.

Чем тоньше абразивные изделия и чем больше их диаметр, тем опаснее для сохранения их формы и прочности возникающие в них деформации.

Если эти напряжения превосходят прочность тела абразивного изделия, то в нем образуются трещины. Часто эти трещины скрыты под верхней корочкой.

В целях придания необходимых размеров абразивные изделия после обжига поступают на механическую обработку.

Формование абразивных изделий методом литья отличается от описанного выше тем, что абразивное зерно и связка длительное время смешиваются в кувшинных мешалках с добавлением определенного количества воды до получения однородной консистенции жидкой массы, после чего масса заливается в формы-кольца и подвергается сушке в течение нескольких суток. В процессе сушки вся влага выпаривается, и в форме остается высушенная заготовка, которая затем подвергается предварительной механической обработке для снятия части припуска. После этого заготовки поступают в термическую обработку, которая проводится в периодических или туннельных печах и затем передаются на окончательную механическую обработку для придания им размеров, установленных для готовых абразивных инструментов.

АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ

Производство абразивных инструментов на бакелитовой связке отличается от технологии изготовления таковых на керамической связке в основном операцией термической обработки. Связующими веществами при производстве изделий на бакелитовой связке являются продукты новолачных фенолформальдегидных смол: жидкий или порошкообразный бакелит, увлажненный жидким бакелитом.

Бакелиты не фенольной фракции, особенно крезольный, сообщают абразивным инструментам резко пониженную (на 30—45%)

прочность, которая еще более падает при шлифовании под действием охлаждающей жидкости, даже при применении слабых щелочных растворов. Поэтому такие сорта бакелита непригодны для производства абразивных инструментов. Также непригодны для абразивных инструментов и сорта бакелитов, изготавливаемых из торфяного фенола. Наиболее качественными являются синтетические бензольные и каменноугольные фенолы.

Применяемый для производства абразивных инструментов бакелит должен иметь вязкость 50—400 сек. Повышение вязкости снижает клеящие и смачивающие свойства бакелита. Удельный вес бакелита 1,25. Температура плавления 100—115°.

Абразивная масса готовится путем смешивания абразивного зерна с заданным по рецепту количеством связки и наполнителем, в качестве которого берутся: алебастр, глины, асбест и другие вещества. Наполнители применяются для повышения прочности и облегчения формования при жидком бакелите, которое производится на гидравлических, или фрикционных прессах, или методом механического раскатывания абразивной массы в пресс-форме. Последний метод применяется для изготовления тонких кругов — прорезных и пилоточных.

Изготовление абразивных изделий на порошкообразном бакелите обладает рядом преимуществ по сравнению с производством их на жидком бакелите: большая производительность, лучшее выравнивание массы и др. Поэтому в качестве бакелитовой связки применяется главным образом пульвер-бакелит.

Сразу после формования изделия поступают на операцию термической обработки — бакелизацию, в процессе проведения которой бакелит переходит из жидкой стадии в твердую и подвергаемые бакелизации изделия получают заданную твердость и прочность.

Процесс перехода бакелита из жидкой стадии в твердую называется полимеризацией. Этот процесс является химическим процессом, сопровождаемым экзотермической реакцией и соединением молекул бакелита. В процессе полимеризации бакелит из жидкой стадии А переходит сначала в промежуточную стадию В (при температуре около 50°) и затем в твердую стадию С. Бакелит в стадии А называется резолом, в стадии В — резитолом и в стадии С — резитом. Бакелит в стадиях В и С нерастворим.

Бакелизация производится постепенным нагревом заформованных изделий в специальных бакелизаторах периодического или непрерывного действия до температуры 170—200° в течение определенного, заданного режимом, времени. Как и обжиг изделий на керамической связке, бакелизация играет решающую роль в получении изделий заданной характеристики. Поэтому этот процесс обычно ведется при помощи автоматических терморегуляторов.

Операции механической обработки, балансировки и испытания производятся на таких же станках, как и в производстве абразивных инструментов на керамической связке.

Механической обработке подвергаются главным образом фасонные изделия и круги прямого профиля больших диаметров (свыше 300 мм).

Вследствие небольшой температуры, при которой происходит процесс бакелизации, величина образующихся при этом напряжений настолько мала, что они не являются опасными для прочности абразивных изделий, что и позволяет выпускать их без обтачивания.

Существует и другой способ производства абразивных инструментов на бакелитовой связке. Этот способ отличается тем, что операция бакелизации производится непосредственно на прессе, т.е. объединена с операцией формования. Такой способ производства, называемый горячим прессованием, применяется главным образом для изготовления абразивных инструментов небольшой толщины. Бакелизация при горячем прессовании осуществляется за счет нагрева пресс-формы до требуемой температуры, причем нагревательными элементами являются электроплиты пресса, производящие одновременно и давящее действие.

Методом горячего прессования изготавливаются шлифовальные круги с текстильными прокладками внутри их, применяемыми для повышения прочности кругов, необходимой для осуществления скоростного шлифования.

Изделия, изготовленные методом горячего прессования, обычно получаются более однородными по твердости, однако этот способ менее производителен, требует значительно большего количества прессов, а потому и более дорогой.

АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ

Сырьем для производства изделий на вулканитовой связке, кроме абразивного зерна, являются искусственные или натуральные каучуки, сера, являющаяся вулканизирующим агентом, т.е. компонентом, от воздействия которого каучук переходит в эбонит, различные мягчители, при введении которых понижается жесткость каучука, ускорители процесса вулканизации и наполнители, вводимые в массу для уменьшения прилипания и для повышения прочности и твердости изделий.

Технология производства абразивного инструмента на вулканитовой связке значительно отличается от таковой на керамической и бакелитовой связках. Приготовление связующего вещества, так же как и смешение абразивной массы, в данном случае производится на смесительных вальцах.

Исходное сырье — обычно натрий-бутадиеновый каучук, предварительно хорошо высушенный, смешивается с серой на смесительных вальцах до получения однородной массы с наполнителем и каким-либо ускорителем вулканизации (например каптаксом или тиурамом) и фактисом (мягчитель, при помощи которого регулируется получение необходимой твердости изделия), или другим видом мягчителя. После этого в массу вводится в заданном коли-

честве абразивное зерно, и смешивание продолжается. Таким образом, операции смешивания связки и массы совмещаются. В течение всего времени смешивания вальцы непрерывно охлаждаются водой.

Формование изделий небольшой толщины до 12—15 мм заменяется прокаткой смешанной ранее массы в листы требуемой толщины на прокатных вальцах и вырубкой из них заготовок изделий при помощи штампов на вырубных прессах.

Формование изделий толщиной свыше 12—15 мм производится путем спрессовывания вырубленных заготовок-пластин массы в пресс-формах требуемых размеров, при давлении от 200 до 400 кг/см² с выдержкой в течение 5—300 сек. в зависимости от толщины и твердости формируемого изделия.

Вырубленные и заформованные изделия поступают на термическую обработку — вулканизацию, в процессе проведения которой изделия получают заданную твердость и прочность. Вулканизация проводится в печах непрерывного или периодического действия, или в автоклавах при постепенном нагревании изделий до заданной температуры (обычно 160—200°) в течение определенного времени. Строгий режим вулканизации так же, как и бакелизации абразивных изделий, выдерживается за счет регулирования температуры специальными автоматическими терморегуляторами, снабженными самопишущими устройствами. Механическая обработка абразивных инструментов на вулканитовой связке и последующие операции производятся теми же способами, которые применяются в производстве абразивных инструментов на керамической и бакелитовой связках.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Назначение механической обработки заключается в придании абразивному инструменту заданных размеров в соответствии с требованиями специальных технических условий и ГОСТов 4785-53 и 4786-53. В этих ГОСТах указаны: допуски на все основные размеры абразивных инструментов (диаметр наружный, диаметр отверстия, высота, диаметр выточки и т. д.), допустимые отклонения от параллельности сторон, допускаемый эксцентриситет и т. п.

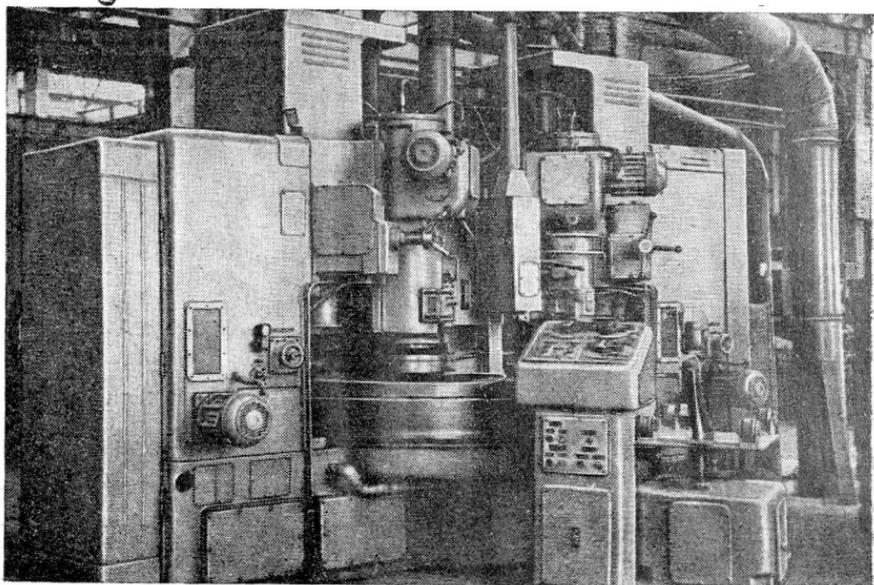
Существующие приемы и методы формования абразивных инструментов и изменения в размерах, происходящие при их термической обработке, вследствие деформаций и усадки, не позволяют для большинства типоразмеров кругов и брусков, особенно изготовленных на керамической связке, избежать механической обработки.

Необходимость механической обработки вызывается также требованиями эксплуатации абразивного инструмента в процессах шлифования, заточки, доводки и пр.

В частности совершенно необходимо, чтобы абразивный инструмент не создавал при шлифовании вибраций и биения, был

уравновешен и т. п. Удовлетворение этих требований и вызывает необходимость обтачивания шлифовальных кругов.

Кроме того, механическая обработка необходима потому, что она позволяет вскрыть имеющий место в производстве скрытый брак (трещины, черные пятна и т. п.). Поэтому этой операции подвергаются почти все абразивные инструменты на керамической связке диаметром свыше 50 мм и многие типоразмеры из изготавливаемых на органических связках.

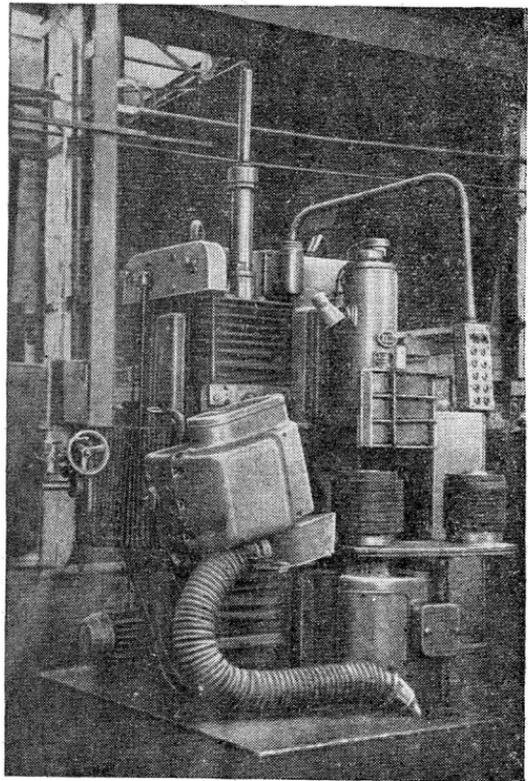


Фиг. 18. Плоскообдирочный станок для обтачивания торцовых поверхностей кругов типа ПОШ-1.

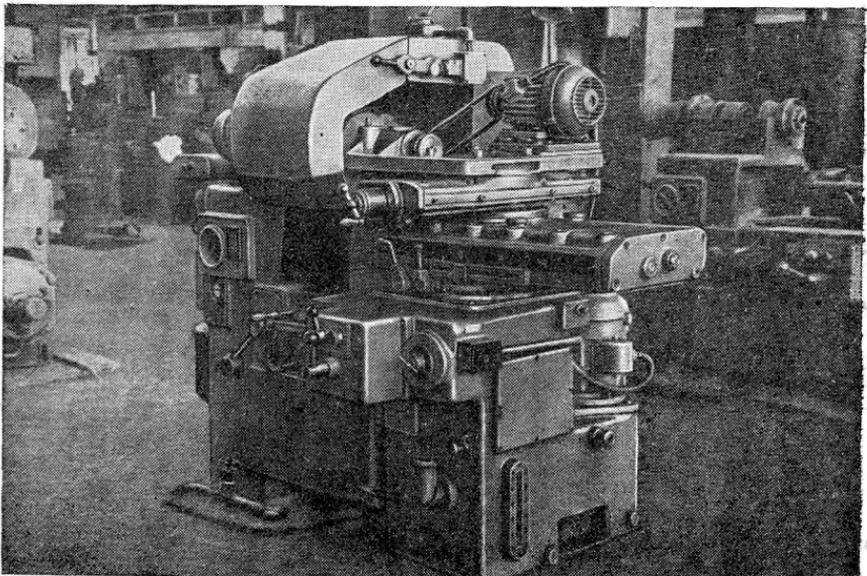
Обтачивание шлифовальных кругов производится на специальных станках, причем торцовые их поверхности, как правило, обрабатываются на плоскообдирочных станках (фиг. 18).

Обрабатываемый на этих станках круг прижимается планшайбой к вращающемуся столу станка и обтачивается при помощи насыпаемого на стол чугунного зерна требуемой зернистости. Последние, попадая между зернами круга, производят расклинивающее давление, равное силе прижима круга к столу станка, и разрушают и вырывают зерна из связки.

Обтачивание кругов по периферии производится на специальных станках, одновременно несколько штук (фиг. 19), или на лобовых токарных станках (фиг. 20) при помощи конусов, шарошек (фиг. 21) или шлифовальных кругов, устанавливаемых в державках и приспособлениях. При обтачивании кругов конусами, представляющими собой инструмент из углеродистой стали твердостью $R_c = 58 \div 60$, они получают вращательное движение за счет

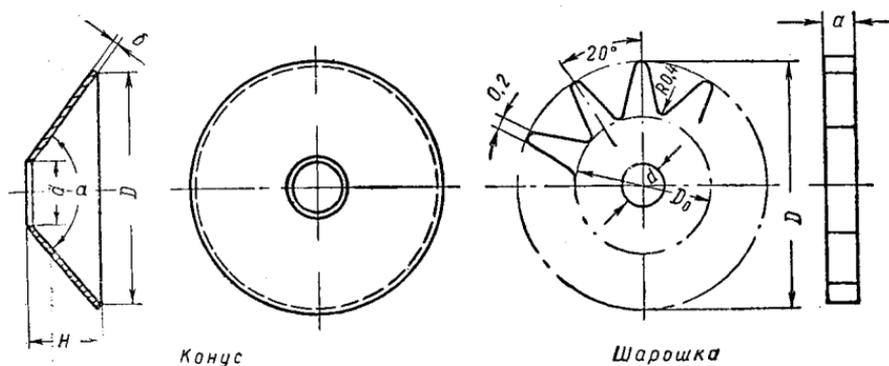


Фиг. 19. Специальный станок типа ХШ для обтачивания периферии кругов.



Фиг. 20. Специальный токарный станок типа КТ-41 для обтачивания кругов.

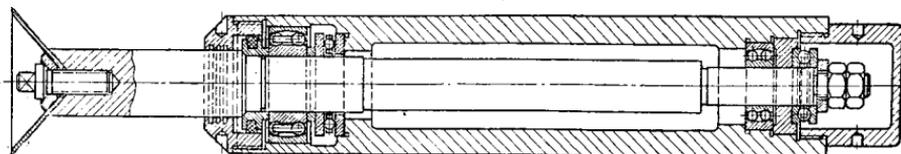
соприкосновения с вращающимся со скоростью до 15 м/сек обрабатываемым кругом. Устанавливаются конуса в оправки типа показанного на фиг. 22. В процессе обтачивания при помощи шлифовального круга, последний получает принудительное вращение с необходимой скоростью от электромотора. И в том, и в другом



Фиг. 21. Инструменты для обтачивания кругов — конус и шарошка.

случае процесс обтачивания происходит за счет выравнивания и обламывания зерен.

Расточка отверстий диаметром до 127 мм производится на сверлильных станках чугуном зерном при помощи специальных оправок-сверл. Чугунное зерно насыпается непрерывно в канавки сверл и при вращении последних прижимается к кругу и таким образом



Фиг. 22. Оправка для установки конуса.

обрабатывает его. Обработка отверстий больших диаметров производится методом расшлифовывания их шлифовальными кругами, установленными в приспособлениях на токарных станках. Часто вместо растачивания придание нужных размеров диаметру отверстия производится путем заливки (калибровки) отверстия специальной массой.

После обтачивания круги диаметром 250 мм и выше подвергаются проверке на степень их уравновешенности, и в случаях обнаружения дисбаланса производится его исправление.

Обрабатываемость кругов зависит помимо припусков и режимов обтачивания, в значительной степени, от их характеристики (табл. 3).

Характеристика обрабатываемости кругов в зависимости от вида абразивного материала, связи, зернистости и твердости

Обрабатываемость шлифовальных кругов ухудшается в следующей последовательности:			
по виду абразивного материала	по степени зернистости	по степени твердости	по виду связи
Из карбида кремния зеленого	Крупнозернистые	Мягкие	Бакелитовые
Из карбида кремния черного			
Из электрокорунда белого	Среднезернистые	Среднемягкие и средние Среднетвердые	Керамические Вулканитовые
Из электрокорунда нормального	Мелкозернистые		
	Тонкозернистые	Твердые и весьма твердые	

Таким образом, хуже всего обрабатываются круги из электрокорунда нормального, тонкозернистые, твердые и весьма твердые, а также круги на вулканитовой связке.

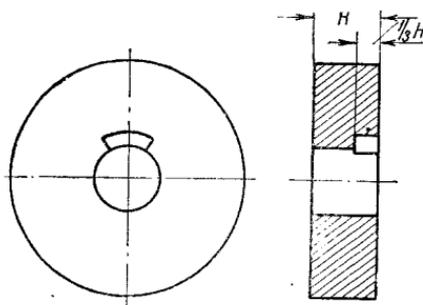
Так же как и при точении металлов, производительность обтачивания кругом возрастает с увеличением глубины t , подачи s и скорости изделия v_u .

Увеличение v_u должно обязательно сопровождаться увеличением s , так как иначе наблюдается при обтачивании конусом сильный износ режущего инструмента.

В настоящее время для обтачивания обычно выбирают следующие режимы: $t = 0,5 \div 2,5$ мм; $s = 0,2 \div 0,6$ мм/об и $v_u = 10 \div 20$ м/сек.

Чистота обрабатываемой поверхности кругов повышается при обработке их мелким чугунным зерном и при шлифовании шлифовальными кругами. Качество поверхности ухудшается с увеличением v_u и t .

После механической обработки все шлифовальные круги диаметром 250 мм и выше подвергаются проверке на дисбаланс. При выявлении дисбаланса свыше допустимого, но не превосходящего браковочного предела, круги направляются на операцию исправления дисбаланса путем заливки свинца. Для этой цели



Фиг. 23. Гнездо под заливку свинца для ликвидации дисбаланса.

в круге вырубается гнездо в виде кольцевого сектора глубиной

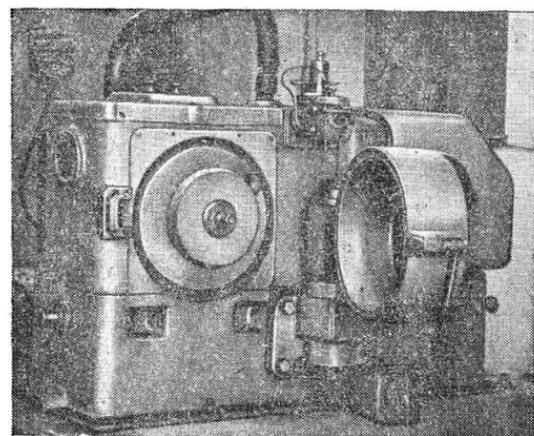
$$h \leq \frac{1}{3} H,$$

где H — толщина круга.

Гнездо располагается обычно так, что оно граничит или почти граничит с отверстием круга (фиг. 23).

ИСПЫТАНИЕ И МАРКИРОВКА

После проверки дисбаланса и его ликвидации шлифовальные круги диаметром до 200 мм и больше проверяются на прочность на разрыв, путем вращения их на специальных станках (фиг. 24) на



Фиг. 24. Испытательный станок для проверки прочности кругов на разрыв.

испытательной скорости, превосходящей допустимую рабочую на 50%, т. е. при рабочей скорости 35 м/сек испытательная скорость устанавливается 52,5 м/сек. Перед выпуском на склад абразивные инструменты проверяются на специальных приборах на твердость и маркируются, причем на каждом из них, за исключением тех, которые имеют малые размеры, проставляются: наименование завода-изготовителя, полная характеристика (шифр абразивного материала, номер зернистости, степ-

ень твердости, шифр наименования связки) и допустимая рабочая скорость в м/сек.

Однако испытание шлифовальных кругов на заводе, их производящем, не освобождает завод, их потребляющий, от повторного испытания перед установкой на шлифовальный станок.

В этом случае круги в соответствии с ГОСТом 3881-53 также испытываются при скорости, превышающей рабочую на 50%, но с выдержкой на этой скорости в течение определенного времени.

ТИПАЖ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Применяемые для абразивной обработки цельные и составные абразивные инструменты можно в зависимости от их формы разбить на четыре группы: шлифовальные круги, головки, сегменты и бруски.

Шлифовальными кругами называются инструменты, представляющие собою тела вращения, предназначенные для абразивной обработки деталей из различных материалов во время своего вращательного и поступательного движения при соответствующем вращательном и поступательном, или только вращательном движении обрабатываемой детали.

Головками называются абразивные инструменты, представляющие собою также тела вращения, но в отличие от шлифовальных кругов не имеющие сквозного отверстия.

Сегменты и бруски являются инструментом, применяемым главным образом в собранном виде в специальных патронах — головках, для абразивной обработки при вращательных и поступательных движениях. Бруски, кроме того, применяются для ручных отделочных и заточных работ.

Номенклатура абразивных инструментов различных форм и размеров исчисляется сотнями типоразмеров, а с учетом различных их характеристик она насчитывает около 12 000 разновидностей.

ГОСТом 2424-52 регламентирован выпуск 22 профилей шлифовальных кругов диаметром 3—1100 мм, толщиной 0,5—200 мм с диаметром отверстия 1—305 мм (табл. 4). Наиболее ходовыми являются круги прямого профиля и круги прямого профиля с выточками (формы ПП, ПВ, ПВК, ПВД, ПВДК), применяемые при круглом наружном, внутреннем, бесцентровом и плоском шлифовании, для шлифования резьбы, при заточке резцов и других инструментов, для правки шлифовальных кругов, для обдирочных, зачистных и других работ. Выточки у кругов указанных выше форм (ПВ, ПВК, ПВД и ПВДК) вызваны главным образом конструкцией станков, предусматривающих укрытие в этих выточках зажимных фланцев, а также условиями работы.

Так, круги ПВ и ПВК часто применяются для одновременного шлифования отверстия и торца детали, для шлифования торцом круга направляющих станин и других деталей.

Круги формы ПВДК применяются также в случаях, когда требуется одновременная обработка детали по диаметру и торцевой части, например при шлифовании шеек и щек коленчатых валов.

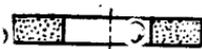
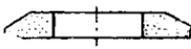
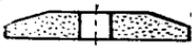
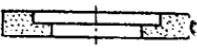
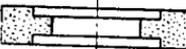
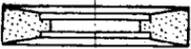
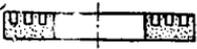
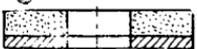
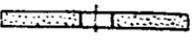
Круги формы Д, иначе именуемые дисками, предназначены для различных отрезных и прорезных работ и шлифования глубоких узких пазов, чем и объясняется их малая толщина.

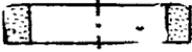
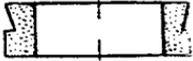
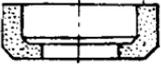
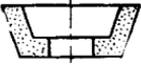
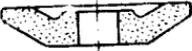
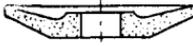
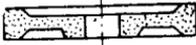
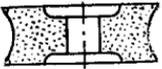
Круги формы М, наращиваемые на металлические диски, применяются для разрезки различных минералов, в частности для гранита, мрамора и других облицовочных камней, а также для обработки огнеупоров.

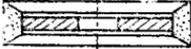
Плоские круги конического профиля (формы 2П, 3П, 4П) употребляются главным образом для шлифования резьбы, для заточки и шлифования многолезцовых инструментов: зубьев колес, долбяков, пил, фрез, разверток и т. п.

Круги формы ПН и ПР применяются преимущественно для обдирочного плоского шлифования малых и больших поверхностей различных деталей. В случаях необходимости шлифования боль-

Формы шлифовальных кругов

Формы шлифовальных кругов	Профиль круга	Обозначение
Плоские прямого профиля		ПП
Плоские с двусторонним коническим профилем		2П
Плоские конического профиля 45°		3П
Плоские с малым углом конического профиля до 30°		4П
Плоские с выточкой		ПВ
Плоские с конической выточкой		ПВК
Плоские с двусторонней выточкой		ПВД
Плоские с двусторонней конической выточкой		ПВДК
Плоские рифленые		ПР
Плоские наращенные		ПН
Диски		Д

Формы шлифовальных кругов	Профиль круга	Обозначение
Кольцо		1К
Кольца с выточкой		2К
Чашки цилиндрические		ЧЦ
Чашки конические		ЧК
Тарелки		1Т
		2Т
		3Т
Для шлифования калибровых скоб		С
Для заточки иглолок		И
Для заточки ножей косилок		КС

Формы шлифовальных кругов	Профиль круга	Обозначение
Для резки минералов		М

ших поверхностей берут круги формы ПР, имеющие рифленую рабочую поверхность, что уменьшает площадь соприкосновения круга с деталью и облегчает условия шлифования.

Круги кольца (формы 1К и 2К) служат также для плоского шлифования торцом круга деталей небольшой толщины или имеющих небольшую площадь контакта с кругом, например шарикоподшипников. Выточка на круге формы 2К делается из соображений возможности осуществления более прочного крепления круга на планшайбе.

Круги формы ЧЦ — чашки цилиндрические и ЧК — чашки конические применяются главным образом для заточки и доводки разного однолезвийного и многолезвийного инструмента. Кроме того, кругами формы ЧЦ иногда пользуются для внутреннего шлифования, а круги формы ЧК употребляют для плоского шлифования труднодоступных мест, например ласточкиных хвостов направляющих станин и т. п.

Круги тарельчатой формы (1Т, 2Т, 3Т) применяются для заточки и доводки зубьев фрез, разверток, протяжек, для шлифования зубьев долбяков и зубчатых колес и т. п. и для обработки труднодоступных мест.

Круги формы И применяются для заточки иглол.

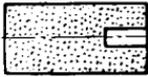
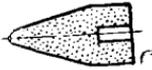
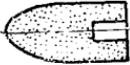
Круги формы С применяются для шлифования рабочих мест калибровых скоб, пазов и т. п.

Круги формы КС применяются для заточки ножей косилок и комбайнов.

Таким образом, из числа стандартных кругов значительная часть является кругами специального применения. Помимо стандартных форм кругов, размеры которых построены по нормальному ряду с модулем $\sqrt[10]{10}$, выпускается значительное количество типоразмеров нестандартных кругов. К их числу принадлежат получившие в последнее время широкое применение гибкие полировальные круги, применяемые для полирования канавок сверл, разверток, медицинского инструмента и других деталей.

Головки шлифовальные в соответствии с ГОСТом 2447-52 выпускаются семи форм (табл. 5). Все они применяются для внутреннего шлифования и ручной зачистки деталей и изделий, где не могут быть применены шлифовальные круги, например для зачистки кривых поверхностей штампов, пазов, выточек и т. п.

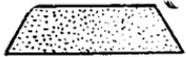
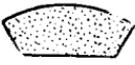
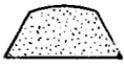
Формы шлифовальных головок

Формы шлифовальных головок	Профиль головки	Обозначение
Цилиндрические		ГЦ
Угловые		ГУ
Конические с углом конуса 60°		Г 60°
Сводчатые		ГСВ
Конические с закругленной вершиной		ГН
Шаровые		ГШ
Шаровые с цилиндрическими боковыми поверхностями		ГШЦ

В отличие от шлифовальных кругов головки крепятся посредством приклеивания к специальным шпилькам, которые вставляются в глухие отверстия головок. Шлифование головками производится на внутришлифовальных станках и станках с гибким валом.

Сегменты (табл. 6) предназначены главным образом для плоского торцового шлифования и заточки ножей. Круги, собранные из сегментов, отличаются от кругов форм 1К, 2К, ЧЦ тем, что имеют прерывистую рабочую поверхность, что обеспечивает их ра-

Форма шлифовальных сегментов

Форма шлифовальных сегментов	Профиль сегмента	Обозначение
Плоские		СП
Трапецевидные		5С
Выпукло-вогнутые		1С
		2С
Выпукло-плоские		3С
Плоско-выпуклые		4С

боту с меньшим контактом и вследствие этого меньший нагрев шлифуемых деталей. Форма сегментов зависит от конструкции патрона, в которой они крепятся.

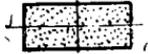
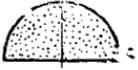
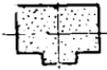
В соответствии с ГОСТом 2464-52 выпускаются сегменты шести форм.

Шлифовальные бруски (табл. 7) формы БКВ, БХ, БХВ и БП применяются главным образом для целей наружного и внутреннего хонингования и для суперфиниширования. Остальные формы брусков применяются для ручных слесарных работ. Всего, в соответствии с ГОСТом 2456-52, выпускаются бруски семи форм.

Таблица 7

Форма шлифовальных брусков

Форма шлифовальных брусков	Профиль бруска	Обозначение
Квадратные		БКВ

Форма шлифовальных брусков	Профиль бруска	Обозначение
Плоские		БП
Трехгранные		БТ
Круглые		БКр
Полукруглые		БПК
Для хонинга плоские		Бх
Для хонинга с выточками		Бхв

АЛМАЗНЫЕ КРУГИ

Каждый алмазный круг в отличие от шлифовальных кругов из других абразивных материалов состоит из корпуса и алмазоносного кольца толщиной 1,5—3 мм. Корпуса алмазных кругов делаются из пластмасс, алюминия, стали и т. п.

В зависимости от назначения алмазные круги делаются различных форм (прямого профиля, чашечные, тарельчатые и т. п.) диаметром от 75 до 200 мм и применяются для заточки и доводки различных видов твердосплавного режущего инструмента, что значительно повышает его стойкость, а также для шлифования различных деталей из твердых сплавов.

Как правило, алмазные круги изготавливаются на органической или металлокерамической связках с 50%-ной концентрацией алмазосодержащего слоя, т. е. в 1 мм³ этого слоя содержится

0,44 мг алмазных зерен. В отдельных случаях изготавливаются круги с большей или меньшей концентрацией алмазных зерен.

Формуются алмазные круги методом холодного и горячего прессования в заданный размер.

ШЛИФОВАЛЬНАЯ ШКУРКА

Шлифовальная шкурка является весьма распространенным абразивным инструментом, имеющим, как правило, один слой абразивных зерен, закрепленных на гибкой основе.

Этот вид абразивного инструмента широко применяется для всевозможных ручных и машинных зачистных, подгоночных, шлифовальных и полировальных работ в процессе сборки и отделки деталей различных машин и изделий. Гибкость шлифовальной шкурки и ее небольшая толщина позволяют успешно применять ее для обработки разных труднодоступных мест, узких пазов и т. п.

Шлифовальная шкурка, в зависимости от основы, на которую наклеивается шлифовальное зерно, называется полотняной или бумажной. Полотняная шкурка изготавливается главным образом на нанке, бязи, сарже и диагонали. Бумажная шкурка выпускается на специальной бумаге разных марок: БШ-200, БШ-140, БШ-120, БШ-100. Наиболее прочной бумагой является бумага БШ-200, имеющая вес 1 м — 200 г. Шкурка, изготовленная на этой бумаге, во многих случаях заменяет полотняную шкурку, обеспечивая ту же производительность и ту же стойкость в работе.

Ткань и бумага, применяемые для производства шкурки, должны удовлетворять прочностным требованиям, приведенным в табл. 8.

Таблица 8

Прочностные требования к ткани и бумаге, применяемым для производства шкурки

Наименование ткани и бумаги	Сопротивление разрыву в направлении		Удлинение в направлении	
	продольном	поперечном	продольном	поперечном
	не ниже в кг		не более в %	
Бязь	42	40	11—15	11—15
Нанка (артикул 1137) . .	68	30	10—14	7—11
Саржа № 2	105	35	18—22	7—11
БШ-100	14	6,5		
БШ-120	15	8		
БШ-140	18	10		
БШ-200	23	12		

Чем меньше удлинение ткани при разрыве, тем меньше удлинение шкурки в работе, что особенно важно для лент.

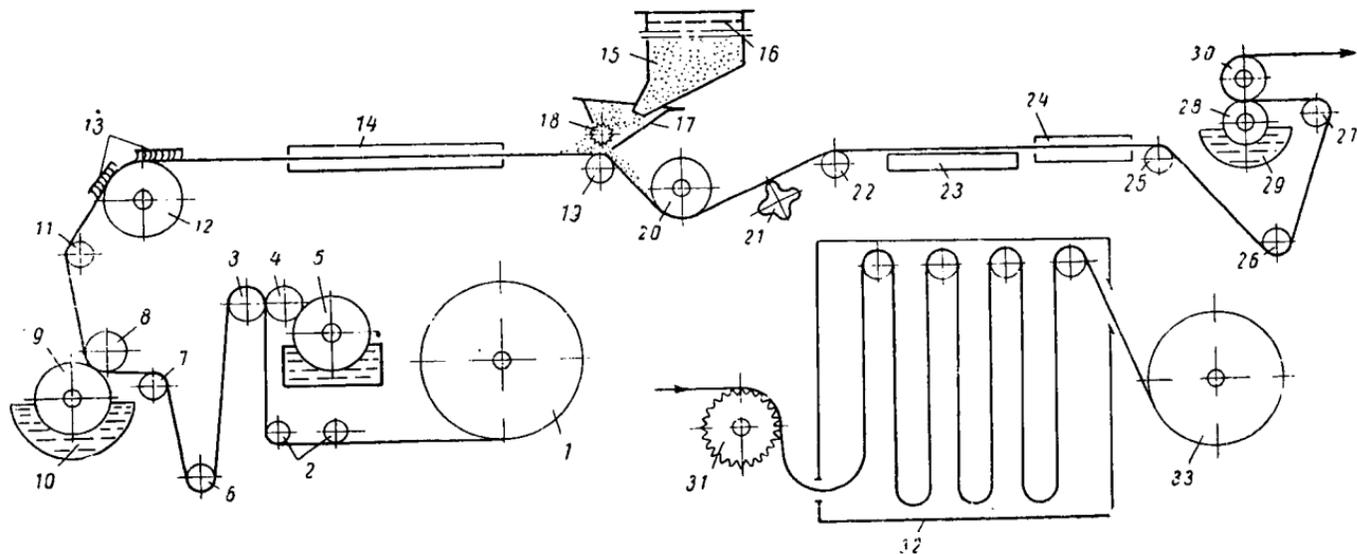
В зависимости от вида зерна, наносимого на шкурку, она называется: электрокорундовой, карборундовой, кремневой, стеклянной.

Как и шлифовальные круги, шкурка выпускается различных номеров зернистости от 16 до 320, применяемых в той или другой последовательности в зависимости от требуемой степени отделки.

В зависимости от условий работы: всухую или с охлаждением шлифовальная шкурка изготавливается на том или другом виде клеящего вещества. Для шкурки, работающей всухую, применяется главным образом мездровый клей; шкурка, предназначенная для работы с охлаждением — водоупорная или водостойкая, изготавливается на специальном лаке (янтарном, глифталеовом и др.).

Производство шлифовальной шкурки как на нанке, так и на бумаге осуществляется по схеме, показанной на фиг. 25. Установленный на вал машины ролик основы (бумаги, или предварительно аппретированной ткани), постепенно разматываясь, проходит сначала на печатный станок, где на основу через определенное расстояние ставится при помощи штампа название материала, зернистость шкурки и марка завода. Затем основа поступает на клеевую машину, где на нее наносится тонкий слой клея, и оттуда проходит через холодильную коробку на насыпной аппарат, где на покрытую слоем клея основу насыпается абразивное зерно, которое вводится в клей вращающимся валиком. Зерно перед насыпкой, в целях лучшего закрепления, целесообразно подвергать прокатке. Сразу после насыпки зерна основа проходит через специальное приспособление (вал-отбойку), ударяющее по нерабочей стороне основы в целях удаления плохо приклеившихся или совсем не приклеившихся абразивных зерен. После этого основа проходит над горячей плитой и затем через холодильную коробку на подклеичный аппарат, где на нее для лучшего закрепления зерна наносится второй слой клея. Для подклейки берется раствор мездрового клея более низкой концентрации; для мелкозернистых шкурок — казеиновый клей. Затем основа поступает в специальную сушильную камеру, где она, находясь в непрерывном движении, проходит от начала до конца сушильного помещения, при этом основа высыхает, клей затвердевает, и зерно закрепляется на ней, создавая шкурке необходимые свойства. Время сушки зависит от скорости конвейера и длится несколько часов. Температура сушки не должна превышать 35° для того, чтобы шкурка сохранила определенную эластичность. Из сушильной камеры шлифовальная шкурка поступает на намоточный станок, где она наматывается в рулоны, или на ножицы для разрезки на листы, или на бобинорезку для резки на ленты заданной ширины и сматывания в бобины. В каждый рулон в зависимости от зернистости наматывается 30 или 50 м шкурки. Листы бумажной шкурки нарезаются размерами 900 × 620 и 720 × 780 мм, и листы шкурки на тканевой основе размерами 210 × 285 мм, 725 × 660—615 и 775 × 615—595—575 мм.

Прочность приклеивания абразивного зерна, определяющая стойкость шлифовальной шкурки, зависит от качества (степени вязкости) клея, качества зерна и метода насыпки, температуры и длительности сушки. Чем выше вязкость клея, тем выше прочность приклеивания зерна и стойкость шкурки и изделий из нее



Фиг. 25. Схема производства шлифовальной шкурки:

1 — рулон ткани или бумаги; 2 — направляющие штанги; 3 — опорный валик; 4 — штемпельный валик для маскировки; 5 — красконосящий валик; 6 и 7 — направляющие валики; 8 — металлический барабан; 9 — маншонный (клеенаносящий) валик; 10 — корыто для клея; 11 — направляющий валик; 12 — металлический барабан; 13 — щетки для разравнивания клея; 14 — холодильная коробка; 15 — загрузочный бункер; 16 — контрольная сетка; 17 — питательный бункер; 18 — рифленый валик; 19 — направляющий валик; 20 — прижимной валик; 21 — отбойка для удаления неприклеившегося зерна; 22 — направляющий валик; 23 — горячая плита; 24 — холодильная коробка; 25, 26 и 27 — направляющие валики; 28 — маншонный вал для подклейки; 29 — корыто для клея; 30 — прижимной валик; 31 — выводной ребристый вал; 32 — сушильная камера; 33 — намоточный станок.

три шлифовании. Чем выше чистота поверхности зерен, тем выше должна быть степень вязкости клея.

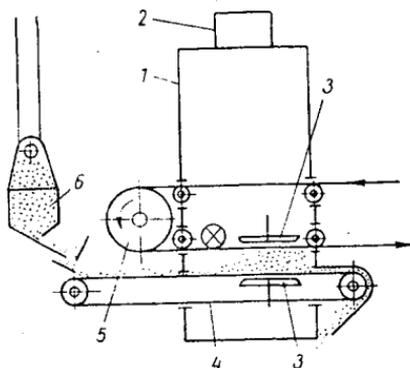
Поэтому для производства шкурки из карбида кремния и электрокорунда белого применяют клей наивысшей вязкости и для стеклянной и кремневой вязкости 3—4° по Энглеру.

Приготовление клевого раствора производится путем варки его при температуре до 70° в специальных котлах.

Для шкурок зернистостью 16—100 иногда готовится комбинированный клеевой раствор, в состав которого, кроме мездрового клея, входит каолин и сульфитный щелок. Для шкурок зернистостью 120 и мельче применяется раствор одного мездрового клея. Чем лучше обеспылено зерно, тем прочнее оно будет приклеиваться к основе.

Для того чтобы раствор клея не проникал через поры ткани на нерабочую ее сторону и этим самым не затруднял изготовление шкурки, ткань перед пуском ее в производство проходит на специальных машинах процессы аппретирования и каландрования (проглаживания). В процессе аппретирования поры ткани заполняются специальным составом (аппретом), который придает ткани плотность, необходимую для непроницаемости клевого раствора.

Водоупорная шлифовальная бумажная шкурка, как правило, изготавливается на бумаге повышенной прочности, пропитанной для придания ей водостойкости меламиновой смолой. В качестве абразивного материала применяется обычно карбид кремния специального рассева. Нанесение зерна на основу водоупорной шкурки производится электростатическим методом, основанном на использовании свойства разноименных электрических зарядов притягиваться. Зерно на транспортерную ленту проходит над заземленным электродом, получая заряд, противоположный заряду другого электрода, расположенного выше над проходимой под ним основе (фиг. 26), на нижней стороне которой нанесен слой лака. Этот электрод находится под напряжением десятков тысяч вольт (50—70 кВ и выше). Сила притяжения этого электрода заставляет зерна карбида кремния устремляться к нему, при этом зерна приобретают такую ориентацию, что их наибольшая ось располагается перпендикулярно по отношению к основе. Встречая на своем пути движущуюся с определенной скоростью основу, зерна закрепляются в слое лака. Те зерна, которые попадают не на слой лака, а на уже закрепившиеся зерна, падают назад. Таким образом на основу наносится один слой вертикально расположенных зерен, что придает шкурке



Фиг. 26. Схема электростатической установки:

1 — электростатическая камера; 2 — генератор-выпрямитель; 3 — электроды; 4 — транспортерная лента; 5 — поворотный вал; 6 — бункер-питатель.

большую остроту, чем при механическом методе нанесения зерна, и более высокую режущую способность.

Нанесение зерна электростатическим методом позволяет получать шкурку с меньшим количеством зерна на единице поверхности, чем при механическом способе, однако прочность удержания зерен на основе при механическом способе насыпки значительно больше, что позволяет применять такую шкурку при более жестких режимах работы.

Наносимые электростатическим методом зерна, вследствие своей вертикальной ориентировки, соприкасаются с клеящим веществом меньшей площадью, чем при механическом способе насыпки, что и вызывает меньшую прочность их закрепления. Для повышения прочности пользуются, когда это возможно, повышением напряжения и уменьшением расстояния между электродами, вследствие чего зерна внедряются в слой лака с большей силой.

Электростатический метод нанесения зерна требует более строгой гранулометрии зерна, что достигается повышением содержания в нем основной фракции. Электрокорундовое зерно электростатическим методом наносится реже, что объясняется до известной степени тем, что эти зерна, как правило, не имеют удлиненной формы. Электрокорунд более близок к диэлектрикам, чем карбид кремния, и потому нанесение его этим способом требует применения более мощных электростатических установок.

Водостойкая шкурка на ткани изготавливается на специальных водупорных лаках и сушится при температуре около 100° С. В целях создания непроницаемости ткани для лака она аппретируется специальным составом.

Применение водостойкой шкурки обеспечивает возможность шлифования с водяным охлаждением без опасности отклеивания зерна.

Обычная шлифовальная шкурка, изготовленная на мездровом клее или жидком стекле, может применяться для работы всухую или с масляным охлаждением, так как мездровый клей и жидкое стекло не обладают водостойкостью.

ЗЕРНИСТОСТЬ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИНСТРУМЕНТОВ

Согласно ведомственной нормали МА-Т7-18-56 и проекта стандарта номенклатура абразивных материалов по их зернистости подразделяется на следующие 12 номеров: 10, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 46, 54, 60, 70, 80.

Кроме того, в соответствии с этим же стандартом выпускаются шлифовальные порошки 6 номеров зернистости: 100, 120, 150, 180, 230, 280 и шлифовальные микропорошки 7 номеров зернистости: МНО, М28, М20, М14, М10, М7 и М5.

Для этих номеров зернистости установлены нормы гранулометрического состава, т. е. определены пределы содержания в основном номере зерен соседних более крупных и более мелких номеров, что вызывается, с одной стороны, различной формой зерен и, с дру-

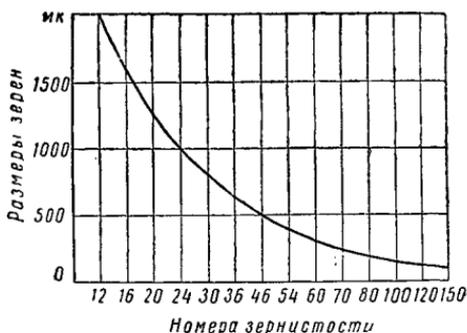
гой стороны, формой ячеек сеток и допусками на точность их изготовления.

Как известно, форма ячеек сеток квадратная, что позволяет зернам, превышающим по своим линейным размерам номинальные размеры до 1,4 раза, при рассеивании проходить через сетку при диагональном расположении. Крупность ячеек сит подчинена метрическому нормативному ряду с модулем $\sqrt[10]{10}$.

Согласно техническим условиям в каждом номере шлифзерна должно содержаться 45—40% зерен основной фракции (основного номера), 20% зерен более крупной фракции (соседнего более крупного номера зерна) и 90% зерен комплексной фракции (основного и соседнего более мелкого номера зерна).

Примерно такое же соотношение содержания этих фракций установлено и для шлифпорошков.

Размерные характеристики зерен основной фракции в микронах в одном номере зернистости приведены ниже — в табл. 9 и на фиг. 27.



Фиг. 27. Зависимость размеров зерен от номеров зернистости.

Таблица 9

Примерные размеры зерен основной фракции

№ зернистости	Размерная характеристика основной фракции	№ зернистости	Размерная характеристика основной фракции	№ зернистости	Размерная характеристика основной фракции	№ зернистости	Размерная характеристика основной фракции
10	2500—2000	30	800—630	70	250—200	180	80—63
12	2000—1600	36	630—500	80	200—160	230	63—50
16	1600—1250	46	500—400	100	160—125	280	50—40
20	1250—1000	54	400—315	120	125—100		
24	1000—800	60	315—250	150	100—80		

Для микропорошков гранулометрический состав входящих в них зерен нормирован согласно табл. 10.

В одном и том же номере зернистости содержатся зерна, отличающиеся по своим линейным размерам в 1,5—2 раза, а частицы, содержащиеся в микропорошках, колеблются по своей величине до 3 раз и более, что является большим недостатком, влияющим на однородность абразивных инструментов и стабильность их работы.

Абразивные инструменты выпускаются следующих номеров зернистости: 16, 24, 36, 46, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 230, 280, М40, М28, М20, причем согласно ГОСТу 4785-53 из электрокорунда выпускаются круги зернистостью 16—100, из электрокорунда

Гранулометрический состав микропорошков

№ зерни- стости	Фракции материала										
	предельная		крупная		основная		комплексная		мелкая		
	должны содержать										
	размер зерна в <i>МК</i>	не более в %	размер зерна в <i>МК</i>	не более в %							
M40	63—50	2	50—40	15	40—20	65	40—14	82	Мельче	14	10
M28	50—40	2	40—28	15	28—20	65	28—14	82	"	14	11
M20	40—28	2	28—20	18	20—14	60	20—10	77	"	10	12
M14	28—20	3	20—14	25	14—10	55	14—7	69	"	7	13
M10	20—14	4	14—10	28	10—7	50	10—5	64	"	5	14
M7	14—10	5	10—7	30	7—5	45	7—3,5	62	"	3,5	15
M5	10—7	6	7—5	32	5—3,5	40	3,5 и мельче	62	—	—	—

белого — всех номеров зернистости, из карбида кремния черного — зернистостью 16—180 и из карбида кремния зеленого — 36-M20.

Согласно ГОСТу 4786-53 бруски из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого изготавливаются зернистостью 100—M20 и сегменты из электрокорунда и карбида кремния черного — зернистостью 16—100.

ФОРМА ЗЕРЕН

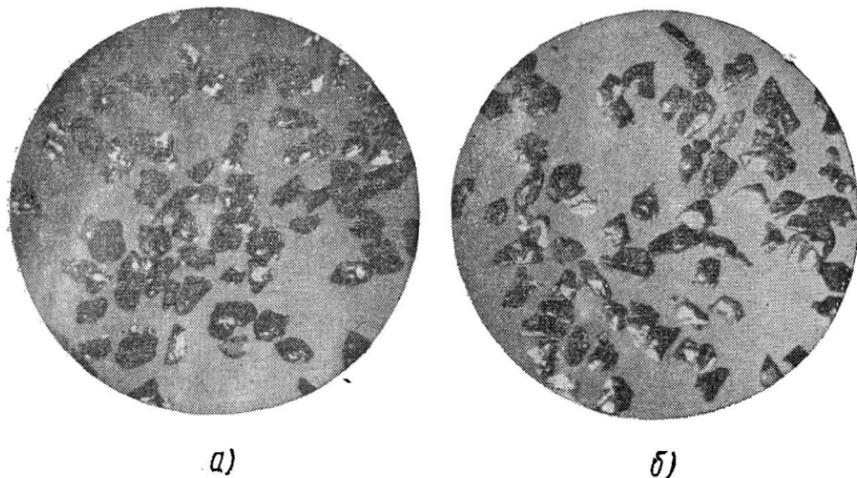
Действующая технология производства абразивных материалов определяет различные условия для роста кристаллов. Так, кристаллы электрокорунда образуются в середине блока по своим размерам больше, чем по краям блока, кристаллы карбида кремния в непосредственной близости от источника тепла — керны печи — вырастают больших размеров, чем кристаллы, образующиеся в более далеких зонах печи. Вместе с тем как кристаллы электрокорунда, так и кристаллы карбида кремния не имеют плоскостей спайности. Вследствие этого зерна абразивных материалов не получают при дроблении определенной и сколь-либо однородной формы. Среди них имеются зерна, приближающиеся по форме к неправильным пирамидальным, кубическим, шаровидным многогранникам различных форм, пластинкам, иголкам и другим весьма разнообразным профилям.

Вместе с тем форма зерен, величина углов, острота и прямолинейность кромок имеют весьма существенное влияние на их абразивную способность, износ и механическую прочность, а также на силу сцепления зерен с связующим веществом и на однородность абразивных инструментов по их твердости, как в пределах одного инструмента, так и в пределах партии, а следовательно и на их работоспособность. Каждое абразивное зерно, участвующее в работе резания, является резцом. Отсюда его наиболее выгоднейшей формой

должна была бы быть такая, которая обеспечила бы при любом его расположении максимальную работоспособность.

Такой формой является изометричная, или близкая к ней форма зерен, лучше сопротивляющаяся скалывающим усилиям, возникающим при шлифовании.

Однако, так как характер и свойства абразивного материала и существующие средства дробления не позволяют придать зернам определенные наивыгоднейшие формы, они носят случайный характер, зависящий от очень многих причин. В частности форма зерен зависит и от применения средств дробления: при дроблении на валь-



Фиг. 28. Зерна:
а — электрокорунда; б — карбида кремния.

цах получают зерна с более острыми углами и гранями, чем при дроблении в шаровых мельницах, где зерна получают более округлую форму.

Наибольшее количество зерен как электрокорунда, так и карбида кремния имеют форму неправильных многогранников (фиг. 28), с более заостренными и гладкими гранями у карбида кремния. Среди зерен карбида кремния, в силу строения его кристаллов, имеется значительно большее количество, чем у электрокорунда, таких форм, как пластинчатые, игольчатые, мечевидные и им подобные (фиг. 29), в которых длина в 2—3 раза больше их размеров в поперечнике и которые вследствие этого менее прочны.

Зерна карбида кремния имеют больше прямолинейных режущих кромок и более сложную конфигурацию. Многие зерна карбида кремния имеют грани с блестящей зеркальной поверхностью, чистота которой достигает 13-го и даже 14-го классов, причем некоторые зерна имеют такую поверхность с двух сторон.

На фиг. 30 показаны полученные автором результаты замера чистоты поверхности кристалла карбида кремния. Замер производился на индуктивном профилографе-профилометре Калибр-ВЭИ

при увеличении глубины неровностей в 120 000 раз и расстояний между ними в 450 раз. Из рассмотрения фиг. 30 видно, что глубина неровностей поверхности не превышает 0,01 мк (1,2 мм на рисунке), т. е. чистота поверхности данного кристалла равна 14-му классу.

Такие же результаты были получены и при замере чистоты поверхности карбида кремния на приборе Киселева.



Фиг. 29. Дефектные зерна (мечевидные, пластинчатые, игольчатые и т. п.).

Такая чистота и гладкость граней зерен карбида кремния ухудшает их сцепляемость с связующими материалами по сравнению с зернами электрокорунда и улучшает способность врезания в обрабатываемый материал, требуя меньшей затраты мощности.

Ухудшение сцепляемости зерен карбида кремния вместе с тем вызывает то, что многие из них выпадают, совершенно не работая, особенно зерна, гладкие грани которых имеют высокую чистоту поверхности.

Зерна электрокорунда имеют шероховатую поверхность и более простую конфигурацию, пластинчатых зерен среди них встречается

значительно меньше, игольчатых почти нет.

Зерна монокорунда (фиг. 31), каждое из которых большей частью является монокристаллом, а не его осколком, имеют большее по сравнению с электрокорундом количество граней.

Зерна монокорунда вместе с тем содержат меньше пороков — раковин, пустот и т. п., чем зерна электрокорунда.

Фиг. 30. Прсфилограмма чистоты поверхности кристалла карбида кремния.

От формы зерен одних и тех же размеров зависит их вес и размеры их поверхности, что имеет весьма существенное значение, так как для данного абразивного материала определяет число зерен в абразивном инструменте.

От формы зерен зависит также их расположение в абразивном инструменте, прочность их сцепления и работа абразивного инструмента.

Так, зерна причудливой формы, как правило, являющиеся сростками двух или более зерен, имеют меньшую прочность, чем монокристаллы, и быстрее обламываются.

Каждое зерно имеет несколько граней, образующих в пересечениях различные по величине углы при вершинах граней от 30 до 180°, причем большая часть углов тупые 100—130°. Зерна в круге

образуют главным образом отрицательные передние углы. Отрицательный же передний угол у резца, как известно, создает более тяжелые условия резания. Это обстоятельство в значительной степени способствует развитию высокой температуры в процессе шлифования.

Зерна карбида кремния, как правило, имеют несколько более острые углы, чем зерна электрокорунда, причем чем выше содержание SiC в карбиде кремния, тем острее углы при вершине.

Вершины углов зерен № 24—80, как показали произведенные измерения, имеют радиусы закруглений в пределах от 4 до 180 *мк*. Большинство абразивных зерен зернистости № 46—80 имеют радиусы закруглений 7—25 *мк*. Порошки и микропорошки имеют меньшие радиусы закруглений, вследствие чего и могут снимать более тонкие стружки.

Наименьшие радиусы закруглений имеют зерна карбида кремния. Чем мельче зерна, тем обычно меньшие радиусы закруглений они имеют. Так, зерна № 320—M28 имеют, как правило, радиусы закруглений 2—5 *мк*. Чем меньше угол при вершине зерна, тем меньше его прочность, тем скорее оно обламывается в работе.



Фиг. 31. Зерна монокорунда.

Как известно, нормально заточенные токарные резцы имеют радиусы притуплений около 15—20 *мк*. Доведенные резцы имеют радиусы 7—12 *мк*. При достижении резцом радиуса притуплений 120 *мк* им фактически работать нельзя. На режущей поверхности абразивного инструмента всегда имеется значительное число зерен, имеющих вершины с такими радиусами, при которых резание протекает с большими затруднениями, или совсем не совершается; в этом случае происходит, без снятия стружки, уплотнение металла.

Необходимо учесть, что формы зерен, расположенных на режущей поверхности, их углы и радиусы закруглений непрерывно меняются в процессе работы абразивного инструмента за счет износа, выкрашивания и правки. Особенно изменяет форму зерен, а следовательно производительность шлифования, чистоту поверхности и стойкость абразивного инструмента, правка, которой поэтому должно придаваться большое значение.

ОСНОВНЫЕ НЕДОСТАТКИ И ЗАДАЧИ ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Абразивные инструменты состоят из миллионов зерен, скрепленных между собой связующим веществом. Таким образом, абразивные инструменты, в отличие от металлических режущих инструмен-

тов, состоят из двух разнородных материалов, резко отличающихся по своим свойствам зерна и связки. Кроме того, абразивные зерна отличаются друг от друга по форме и расположению их в абразивном инструменте.

Эти факторы предопределяют некоторую неоднородность абразивных инструментов одинаковой характеристики и разную их работоспособность при одних и тех же условиях работы. В значительной степени на нестабильность качества абразивных инструментов влияют способы их производства. В частности, чем мельче помол связки и лучше однородность смешивания компонентов связки и абразивной массы, тем однороднее будет абразивный инструмент. Чем лучше равномерность распределения массы в пресс-форме, тем более одинаковая будет ее плотность, тем однороднее будет твердость и структура абразивного инструмента. Чем больше параллельность верхней и нижней траверз пресса, т. е. чем меньше перекос плит при формировании, чем более одинаковы условия термической обработки и чем точнее произведена механическая обработка, тем однороднее будет степень твердости абразивных инструментов, тем лучше их уравнишенность, тем выше прочность, тем стабильнее их качество. Чем мельче зернистость, тем труднее достигнуть однородности качества абразивного инструмента. Для достижения этой цели необходимо максимально автоматизировать и механизировать процессы производства абразивных материалов и инструментов, чтобы исключить влияние неточности и неодинаковости ручных операций.

Опыт создания и работы автоматического агрегата (фиг. 32) для производства кругов на бакелитовой связке показал, что повышается не только производительность, но и попадание в заданную рецептом твердость круга до 75—80%.

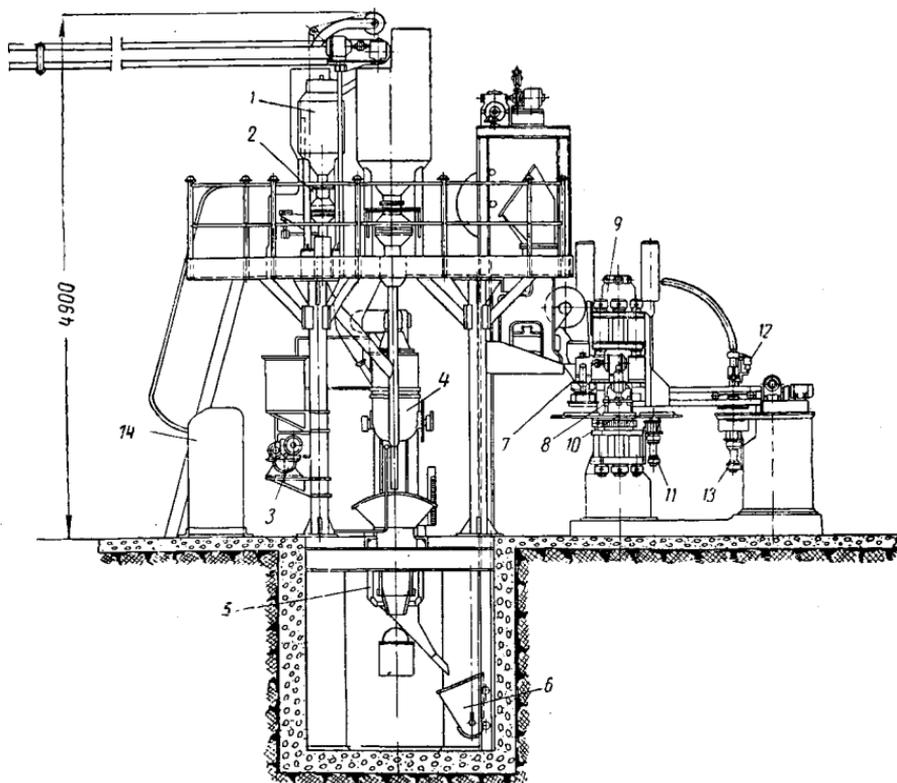
В автоматическом агрегате автоматизированы операции дозирования компонентов массы для одного замеса, точно соблюдается время механического смешивания массы, автоматически отмеряется и засыпается в пресс-форму требуемое для одного круга количество массы, которая затем разравнивается специальным устройством и также автоматически прессуется. Заформованная заготовка круга автоматически выталкивается из пресс-формы и при помощи пневмосъемника переносится на плиту, которая затем укладывается на этажерку. После заполнения всех полок этажерка при помощи подъемной электрокары перемещается в электробакелитизатор, где круги проходят бакелизацию по заданному режиму.

Опыт применения на механизированных гидравлических прессах разравнивающих устройств показал, что, помимо повышения процента заданной твердости, улучшается уравнишенность кругов, т. е. равномерность степени плотности массы в каждой точке круга.

Опыт создания щелевых туннельных печей показал, что одновременно с повышением степени равномерности температуры в них повышается равномерность твердости кругов и попадание в твердость, установленную рецептурой.

Задача в настоящее время заключается в широком распространении этого опыта и в создании таких устройств и машин для всех типоразмеров абразивных инструментов.

Еще не разработаны автоматические агрегаты для формовки многих типоразмеров кругов на керамической связке, в частности



Фиг. 32. Автоматический агрегат для формования кругов диаметров 250—300 мм:

1 — бункер для зерна; 2 — дозатор зерна; 3 — дозатор бакелита; 4 — мешалка; 5 — протирачная машина; 6 — скиповый подъемник абразивной массы; 7 — автоматические весы для взвешивания массы; 8 — механизм засыпки и разравнивания массы; 9 — гидравлический пресс; 10 — поворотный стол; 11 — гидровыталькатель; 12 — вакуум-съемник кругов; 13 — гидравлический подъемник; 14 — автоматический дистрибутор.

для кругов фасонных профилей, кругов прямого профиля диаметром свыше 300 мм и кругов на вулканитовой связке. Не найдено решения для разравнивания массы тонких кругов. Не созданы конструкции, гарантирующие большую однородность смешения связки и массы особенно для мелкозернистых кругов и т. п.

Повышение стабильности качества абразивных инструментов в значительной степени зависит от однородности абразивных материалов. Как известно, в каждом металлургическом производстве однородность качества в первую очередь определяется постоянством качества сырья. Такое же положение имеет место и в производстве абразивных материалов и шлифовальных кругов. Поэтому

второй задачей является повышение степени постоянства применяемых сырьевых материалов: бокситов, глинозема, антрацита, кварцитов, шпата, глины, клея и др.

Эта задача требует соответствующих решений от поставщиков сырья: выборочной добычи, обогащения сырья на месте добычи, например агломерации или кальцинации боксита, организации усреднения применяемого сырья и абразивного зерна, опаливания текстиля для шлифовальной шкурки и уничтожения узелков на ткани, расширения добычи и организации помола полевого шпата и специальных глин для связки и т. п.

Третьей задачей является повышение качества абразивных материалов и особенно электрокорунда, путем перехода на плавку непрерывным способом и более широкого внедрения различных способов обогащения в процессе его производства: магнитной сепарации и прокалки зерна при температуре $\sim 1000^\circ$, эффективно повышающей его прочность, корректировки формы зерна, также для повышения прочности, улучшения гранулометрического состава зерна, химического обогащения и т. п.

Большое значение имеет лучшая отработка технологии и электрического режима плавки для получения электрокорунда высокого качества во всех частях блока, а также решение таких вопросов, как вопросы лучшей отсадки ферросплава, полной механизации загрузки шихты и т. п.

Решению этих задач будет значительно способствовать принятое в абразивной промышленности направление на увеличение удельного веса выпуска белого электрокорунда, карбида кремния зеленого и электрокорунда марки Э95.

Четвертой задачей является создание специального абразивного оборудования для повышения его сроков службы, обеспечения более высокой точности и повышения качества работы. Опыт создания специальных станков для обработки абразивных инструментов показал, что таким путем достигается не только повышение производительности обтачивания, но и повышение качества. Создание всех необходимых типов оборудования и организация их производства позволит быстрее решить вопросы повышения стабильности качества абразивных инструментов.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

ТВЕРДОСТЬ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

«Под твердостью абразивного инструмента понимается сопротивляемость связки вырыванию абразивных зерен с поверхности инструмента под влиянием внешних усилий», так определяется понятие о твердости ГОСТом 3751-47. Таким образом, твердость абразивного инструмента это не твердость связки, как утверждают некоторые авторы, а ее способность сопротивляться действующим на абразивные зерна усилиям, которые возникают в процессе шлифования. Вместе с тем твердость абразивных инструментов это не твердость абразивных зерен, из которых они изготовлены. Твердость зерен абразивных материалов в несколько десятков раз выше, чем твердость связки, скрепляющей их в одно целое. Несмотря на это, из зерен разных абразивных материалов, различающихся по твердости, можно изготовить абразивные инструменты одной и той же твердости. Вместе с тем абразивные инструменты одной и той же твердости, изготовленные из одного и того же абразивного материала, но на различных связках, ведут себя в работе по-разному. Поэтому абразивные инструменты одинаковой характеристики, изготовленные на различных заводах, могут отличаться по своим рабочим свойствам, так как заводы, производящие абразивный инструмент, применяют для связок главным образом местное сырье.

Из самого твердого абразивного материала может быть изготовлен весьма мягкий абразивный инструмент.

В процессе работы абразивного инструмента его зерна постепенно затупляются, вследствие чего ширина снимаемой стружки и усилия резания несколько возрастают. При этом давления на зерна и скрепляющую их связку также возрастают, и, если они превосходят их прочность или прочность связки, то зерна обламываются или выкрашиваются целиком, или частично. Выкрашиванию и обламыванию вершин зерен, а также обламыванию непрочных зерен в сильной степени способствует то, что каждое зерно абразивного инструмента в процессе шлифования работает на удар, сила которого зависит от режима работы абразивного инструмента. Таким образом, чем тверже абразивный инструмент, чем прочнее связь

между зернами и сами зерна, тем медленнее будет происходить обновление режущей поверхности, тем больше будут затупляться зерна, тем больше будут возрастать усилия, которые в конечном итоге или превзойдут сопротивление связки и повлекут выкрашивание и обламывание зерен, или приведут к такому затуплению зерен, что резание прекратится. Следовательно, между твердостью абразивного инструмента, допускаемой степенью его затупления, и режимом его работы существует определенная зависимость: чем тяжелее режим работы, тем относительно тверже может применяться абразивный инструмент, тем больше допускается затупление его зерен.

При работе слишком мягким абразивным инструментом на тяжелом режиме абразивные зерна будут выкрашиваться не затупившимися.

Существует также определенная зависимость между твердостью абразивного инструмента, свойствами обрабатываемого материала и допустимой степенью затупляемости абразивных зерен. Опыт показывает, что чем прочнее и вязче обрабатываемый материал, тем меньшая допускается степень затупления для нормальной работы абразивного инструмента, тем мягче он должен быть.

Твердость абразивного инструмента, помимо количества и качества связки (прочности, хрупкости, упругости), зависит также от вида материала, степени шероховатости (чистоты) поверхности абразивных зерен и их конфигурации. Так, зерна карбида кремния хуже сцепляются с связкой, при одном и том же ее количестве, чем зерна электрокорунда, так как последние химически взаимодействуют с связкой в процессе обжига абразивного инструмента и имеют значительную шероховатость.

Таким образом, количество связки, необходимое для получения абразивного инструмента определенной степени твердости, зависит от ее качества, вида абразивного материала, чистоты поверхности зерен и технологического процесса производства (давление, режим обжига и т. п.).

Твердость абразивного инструмента зависит также от его строения, что в свою очередь определяет его работоспособность. Чем более открытая структура абразивного инструмента, тем большее количество связки требуется для получения одной и той же твердости.

Фактически в одном и том же абразивном инструменте имеются зерна и поры разной величины, т. е. каждое зерно имеет разную поверхность и расположено на неодинаковом расстоянии друг от друга. Отсюда следует, что поверхность и сила сцепления различных зерен различная, а следовательно, и сила сопротивления внешним усилиям разных зерен различная.

Таким образом, абразивный инструмент, замаркированный одной твердостью, фактически представляет конгломерат зерен, скрепленных между собой с разной силой. Этим в значительной степени объясняется характер износа и самозатачивания абразивных инструментов. Этим же в известной степени объясняется и разли-

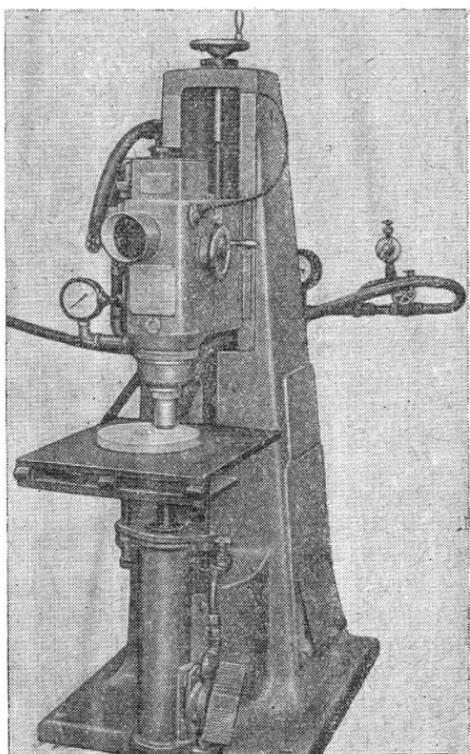
чие в глубине лунок, получаемых при определении твердости в различных местах одного и того же абразивного инструмента.

Как показывает опыт, даже при весьма тщательном разравнивании и укладке массы, имеют место некоторые отклонения от средней глубины лунок, особенно заметные в мелкозернистых абразивных инструментах. Замеры показывают, что эти отклонения колеблются в пределах 20% и более, даже в абразивных инструментах, показывающих хорошую однородность и стойкость к работе.

Определение твердости абразивных инструментов на керамической и бакелитовой связках зернистостью № 16—90 производится измерением глубины лунки, образующейся на поверхности инструмента под действием струи кварцевого песка № 24—30, выбрасываемой из камеры пескоструйного аппарата (фиг. 33) под давлением $1,5 \text{ кг/см}^2$.

Объем рабочей порции песка определяется емкостью рабочей камеры.

Для определения степени твердости абразивного инструмента М1—СМ2 применяется камера объемом 5 см^3 , для определения твердости СМ2—ЧТ2 служит камера объемом 28 см^3 . Величина твердости определяется по средним арифметическим значениям глубин лунок: для шлифовальных кругов и сегментов по четырем



Фиг. 33. Прибор для определения твердости под действием струи кварцевого песка.

точкам, расположенным диаметрально друг против друга, и для брусков по трем точкам. Как можно видеть из шкалы твердости (табл. 11), чем тверже абразивный инструмент, тем меньше размер глубины лунки, и чем мельче его зернистость, тем больше глубина лунки для той же твердости. Из шкалы видно также, что чем мягче абразивный инструмент, тем больше пределы допускаемых значений глубины лунок одной и той же твердости. Для наиболее ходовых твердостей абразивных инструментов СМ1—С2 эти пределы равны 15—20%.

Таким образом, определение твердости этим методом построено на принципе многочисленных ударов зерен песка в группу абразивных зерен и между ними в связку, вследствие чего связь между

Глубина лунок в мм при замере твердости

Шкала твердости	№ зернистости абразивного инструмента				
	16—36	46—90	16—36	46—54	60—90
	Объем камеры аппарата 5 см ³		Объем камеры аппарата 28 см ³		
M1	3,90—3,01	5,40—4,11	—	—	—
M2	3,00—2,31	4,10—3,01	—	—	—
M3	2,30—1,71	3,00—2,21	—	—	—
CM1	1,70—1,31	2,20—1,65	4,80—4,01	—	—
CM2	—	1,64—1,31	4,00—3,41	4,90—4,21	5,60—4,91
C1	—	—	3,40—2,86	4,20—3,61	4,90—4,31
C2	—	—	2,85—2,36	3,60—3,06	4,30—3,71
CT1	—	—	2,35—2,01	3,05—2,56	3,70—3,16
CT2	—	—	2,00—1,71	2,55—2,21	3,15—2,76
CT3	—	—	1,70—1,46	2,20—1,91	2,75—2,37
T1	—	—	1,45—1,26	1,90—1,61	2,36—2,11
T2	—	—	1,25—1,12	1,60—1,46	2,10—1,89
BT1	—	—	1,11—1,01	1,45—1,31	1,88—1,73
BT2	—	—	1,00—0,91	1,30—1,21	1,72—1,61
CT1	—	—	0,90—0,83	1,20—1,16	1,60—1,51
CT2	—	—	0,82—0,75	1,15—1,11	1,50—1,42

ними нарушается, и они выламываются из тела абразивного инструмента.

Этим объясняется, что при определении твердости мелкозернистых абразивных инструментов глубина лунки получается больше, чем у крупнозернистых. В этом случае на единицу глубины лунки затрачивается меньше работы, т. е. для выламывания мелкого зерна нужно затратить меньше усилий, чем для крупного зерна.

Следует отметить, что при определении таким способом твердости электрокорундовых абразивных инструментов зерна, их составляющие, почти не измельчаются, а выпадают целиком, в то время как при испытании твердости абразивных инструментов из карбида кремния зерна их в значительной степени измельчаются.

В процессе шлифования абразивные зерна испытывают удары о шлифуемый материал; ударов же, непосредственно приложенных к связке, почти не получают. Кроме того, в процессе шлифования зерна испытывают раздавливающе действующие на них усилия сжатия. Таким образом, условия шлифования отличаются от условий испытания абразивных инструментов пескоструйным методом.

Определение твердости абразивных инструментов на керамической и бакелитовой связках зернистостью 100—M14 производится измерением глубины лунки, образуемой прибором Роквелла путем вдавливания стального шарика (диаметром 1/4" и 1/8") под действием нагрузки в 60 кг на чисто обработанной поверхности, не имеющей следов грубой обработки. Как видно из шкалы твердости (табл. 12), значения глубин лунок для инструментов мягких степеней твердости имеют весьма большие пределы, причем глубина

лунок повышается с уменьшением величины зерен. Это повышение особенно заметно для кругов мягких степеней.

Таблица 12

Твердость по прибору Роквелла

Шкала твердости	№ зернистости абразивного инструмента			
	100—150	100—150	180—240	280-M14
	испытание шариком $\frac{1}{4}$ "	испытание шариком $\frac{1}{8}$ "		
M1	27—42	—	4—17	30—40
M2	43—54	—	18—29	41—50
M3	55—63	8—22	30—40	51—60
CM1	—	23—35	41—50	61—68
CM2	—	36—48	51—59	69—76
C1	—	49—57	60—68	77—82
C2	—	58—66	69—76	83—88
CT1	—	67—74	77—82	89—93
CT2	—	75—81	83—89	94—98
CT3	—	82—88	90—94	99—103
T1	—	89—93	95—99	104—105
T2	—	94—98	100—104	107—109

Таким образом, способ вдавливания построен на принципе разрушения зерен и связей между ними за счет приложения сжимающих сил.

Этот метод также далек от фактических условий работы абразивных инструментов. Он дает более повторяющиеся результаты при определении твердости абразивных инструментов зернистостью мельче 280 и то только при частой смене и поворотах шарика. Для зернистостей 100—200 этот способ дает менее сходные результаты. Поэтому в настоящее время устанавливается возможность применения для определения твердости кругов этих зернистостей пескоструйного метода.

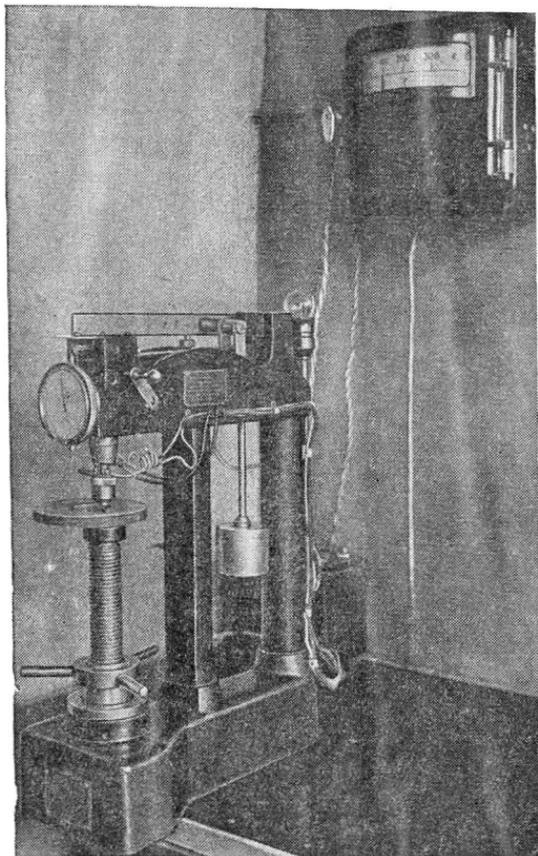
Определение твердости абразивного инструмента на вулканитовой связке производится методом высверливания лунок на специальном приборе, в котором в качестве сверлящего инструмента применяется пластинка особого профиля. Этот метод дает значительные погрешности и потому его намечено заменить методом вдавливания, разработанным во ВНИИАШе Карташевым А. М.

В основу этого метода положено вдавливание в испытуемое тело под воздействием определенной нагрузки конусного наконечника с углом при вершине в 60° , нагретого до температуры $100^\circ \pm 5^\circ$. Этот метод, хотя и больше приближается к условиям шлифования, чем первый, однако также не воспроизводит их.

При шлифовании круги на вулканитовой связке несколько нагреваются, и зерна круга вследствие этого слегка вдавливаются в связующее вещество. Это явление вызвало идею нагрева инструмента, определяющего твердость. При помощи прибора, построенного на этом принципе (фиг. 34), намечено определять твердость

с подразделением всей шкалы твердости только на четыре ступени: СМ, С, СТ и Т.

Таким образом, вопрос о создании такого прибора, который позволил бы применить в производстве вулканитовых кругов такую же широкую шкалу, как для керамических и бакелитовых кругов, пока остается нерешенной задачей.



Фиг. 34. Прибор для определения твердости кругов на вулканитовой связке.

Ни один из существующих способов определения твердости не воспроизводит полностью условия, при которых фактически работают абразивные инструменты в процессе шлифования, и поэтому определяемые этими способами показатели твердости являются, до известной степени, условными.

Недостатком этих способов и приборов является также то, что каждый из них дает значительную погрешность определения, в связи с чем ГОСТом 3751-47 указывается, что «... При производстве параллельных определений твердости абразивных инструментов одного у производителя, а другого у потребителя — допускается отклонение результатов у потребителя от таковых у производителя на одну степень твердости».

СТРОЕНИЕ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Каждый абразивный инструмент в зависимости от его характеристики и технологии изготовления имеет ту или другую структуру. Его структура задается определенным процентным соотношением объемов: зерна, связки и пор. В табл. 13, составленной для абразивного инструмента зернистостью 16—80, приведены различные соотношения объемов зерна и связки, при соблюдении которых в процессе производства получают абразивные инструменты различной твердости с тем или другим объемом пор.

Соотношение объемов зерна, связки и пор

Твердость		BM1	BM2	M1	M2	M3	CM1	CM2	C1	C2	CT1	CT2	CT3	T1	T2	BT1	BT2	CT1	CT2
№ струк- туры	Объем зерна в %	Объем пор в %																	
		49,5	48,0	46,5	45,0	43,5	42,0	40,5	39,0	37,5	36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	24,0
0	62	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0
1	60	—	—	—	—	—	—	—	1,0	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0
2	58	—	—	—	—	—	—	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0
3	56	—	—	—	—	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0
4	54	—	—	—	1,0	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0
5	52	—	—	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0
6	50	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0
7	48	2,5	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	26,5	28,0
8	46	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0	25,5	27,0	28,5	30,0
9	44	6,5	8,0	9,5	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0	27,5	29,0	30,5	32,0
10	42	8,5	10,0	11,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	26,5	28,0	29,5	31,0	32,5	34,0
11	40	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0	19,5	21,0	22,5	24,0	25,5	27,0	28,5	30,0	31,5	33,0	34,5	36,0
12	38	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0	27,5	29,0	30,5	32,0	33,5	35,0	36,5	38,0

При содержании в инструменте 56—62 % зерна от общего объема его строение является плотным, при объеме зерна 46—54 % структура такого инструмента называется средней и при 38—44 % открытой. В зависимости от условий работы при шлифовании применяется абразивный инструмент с той или другой структурой.

Открытая структура обеспечивает возможность лучшего отвода снимаемой стружки, позволяет работать с более высокими режимами, создает лучшие условия для охлаждения обрабатываемой детали и самого абразивного инструмента воздушной струей, уменьшает опасность засаливания абразивного инструмента и возникновения прижогов шлифуемой детали. Недостатком абразивных инструментов с открытой структурой является их большой износ, меньшая прочность, ухудшение чистоты шлифуемой поверхности.

Абразивные инструменты плотной структуры применяются главным образом для доводочных работ. Наиболее часто применяются абразивные инструменты, имеющие среднюю структуру.

Обычно крупнозернистые абразивные инструменты № 16—24 изготавливаются третьей-четвертой структуры, среднезернистые № 36—46 пятой-шестой структуры, № 60—100 шестой-седьмой структуры.

Большое влияние на выбор структуры имеют свойства металла, подлежащего шлифованию. Так, при шлифовании вязких металлов, обладающих низким сопротивлением разрыву, применяют абразивные инструменты с открытой структурой и при шлифовании металлов, обладающих высоким сопротивлением разрыву, — абразивные инструменты средних структур.

Из табл. 8 видно, что для каждого номера структуры объем пор зависит от соотношения объемов связки и зерна. Чем больше объем связки, т. е. чем больше твердость при одном и том же объеме зерна, тем меньше объем пор. Чем больше объем зерна, тем плотнее строение абразивного инструмента, тем меньше номер его структуры. Из таблицы также видно, что для получения инструмента одной и той же твердости, с одним и тем же объемом пор, но с разным объемом зерна, т. е. с разным номером структуры, необходимо применять разное количество связки. Чем меньше объем зерен, тем меньше их количество, тем больше расстояния между ними, тем более открытая структура, тем большее количество связки необходимо для связывания зерен в инструмент требуемой твердости. Таким образом, структура не определяет еще его степени пористости.

Уменьшение или увеличение объема связки на 1,5 % дает соответственное изменение твердости на одну степень. Изменение объема зерна на 2 % определяет получение другой структуры, отличающейся от первой на один номер.

На том основании, что определенной твердости соответствует определенный объем пор, не следует отождествлять понятия твердости и пористости, так как эти понятия совершенно различные.

Высокопористыми абразивными инструментами называются такие, у которых объемная пористость больше, чем у структурных

кругов. Вместе с тем высокопористые круги зачастую имеют величину пор больше размеров зерен, из которых они изготовлены.

Получение такой величины пор достигается за счет введения в массу абразивных инструментов при смешивании таких добавок (например, при производстве методом прессования: древесных опилок, молотого угля и т. п.), которые в процессе термической обработки выгорают, или других добавок, которые улетучиваются при сушке, образуя в теле заготовок поры. Форма пор различная. Многие из них соединяются одна с другой, что и создает лучшую вентилируемость круга, многие поры глухие.

При производстве кругов литым способом поры образуются в процессе сушки за счет удаления содержащейся в массе воды. Круги получаются для данной зернистости и твердости одной и той же степени пористости.

Высокопористые круги, изготавливаемые методом литья, содержат в массе добавки некоторого количества перекиси водорода, улетучивающейся в процессе сушки и образующей таким образом поры.

Высокая пористость придает абразивным инструментам более легкий вес, создает лучшую возможность для прохождения воздуха, а следовательно, возможность лучшего охлаждения шлифуемых деталей и отвода снимаемой стружки. Высокопористые круги особенно пригодны при тех видах шлифования, где приходится опасаться получения прижогов шлифуемой поверхности, а также при шлифовании разных неметаллических материалов. Однако из-за недостаточной однородности и меньшей прочности высокопористые круги в массовых количествах не изготавливаются.

Заточка инструмента обычно из-за необходимости наблюдения за процессом производится всухую. Между тем при заточке и шлифовании инструмента прижоги, как ухудшающие его качество и стойкость, особенно недопустимы. Поэтому в этих случаях шлифование надо вести более пористыми кругами при легких режимах.

Объем воздуха, нагнетаемый пористым кругом, в 1,3—1,5 раза больше, чем объем воздуха, нагнетаемый кругом плотной структуры, что способствует уменьшению температуры, возникаемой при шлифовании, и, как следствие, прижогов.

ОБЪЕМНЫЙ ВЕС

Объемные веса абразивных инструментов зависят от их строения, т. е. соотношения объемов зерна, связки и пор и объемных весов зерна и связки.

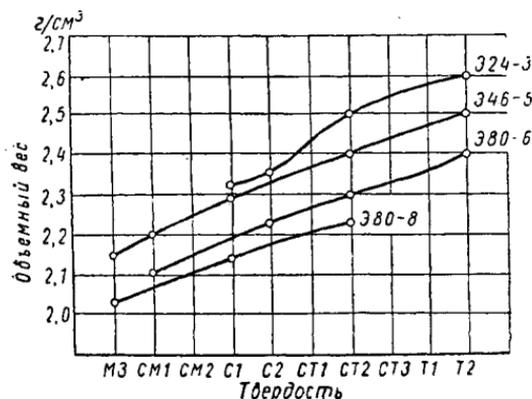
Объемным весом зерна, иначе называемым насыпным весом, считается уплотненный встряхиванием вес 1 см^3 зерна в граммах. Вес зерна зависит от его минералогического состава, формы и гранулометрического состава. Так, объемный вес зерен электрокорунда номеров зернистости 16—100 находится в пределах 1,25—1,58 г/см^3 .

Насыпной вес зерна электрокорунда, так же как и удельный вес, на 15—20% больше объемного веса зерна карбида кремния.

Чем мельче зернистость, тем меньше объемный вес зерен.

Объемный вес связки зависит от ее состава, для наиболее распространенной керамической связки он равен 2,4—2,5 г/см³.

Объемные веса наиболее применяемых абразивных инструментов, изготовленных на керамической и бакелитовой связках, зернистостью 24—80, твердостью МЗ—Т2, находятся в пределах 2,0—2,6 г/см³. Чем выше степень твердости и чем плотнее строение абразивного инструмента, тем больше его объемный вес. На фиг. 35



показана зависимость объемного веса от зернистости, твердости и структуры у кругов определенного состава связок.

Объемный вес кругов на вулканитовой связке выше, чем кругов на керамической связке, и составляет 2,6—3,0 г/см³.

В некоторых случаях практики шлифования объемный вес является дополнительной характеристикой абразивного инструмента. Так, например, шлифовальные круги для шлифования шариков, работающие при

Фиг. 35. Зависимость объемного веса от степеней твердости, зернистости и структуры кругов.

очень больших давлениях, в зависимости от их назначения применяются с объемным весом 2,5—2,9 г/см³. Чем выше давление при шлифовании и чем меньше диаметры шлифуемых шариков, тем больше должен быть объемный вес шлифовального круга и его твердость.

Применение кругов высокообъемных весов требует обязательного обильного охлаждения в процессе шлифования.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Характерным отличием абразивных инструментов от стальных инструментов, помимо других свойств, является их резко различная прочность на растяжение и на сжатие. Последняя в 5 и более раз превышает первую. Кроме того, у абразивных инструментов явление ползучести под действием нагрузки проявляется очень слабо, и разрушение их носит такой же характер, какой оно имеет у хрупких тел. Особенно это проявляется у инструментов на керамической связке.

В зависимости от типа и характеристики абразивных инструментов прочность их на разрыв, сжатие и изгиб колеблется в больших пределах. Так, прочность на разрыв шлифовальных кругов различных характеристик на керамической связке, от действия центробежных сил инерции находится в пределах 50—250 кг/см² и даже выше, при этом их сопротивление на изгиб в 1,5—2 раза больше

прочности на разрыв ($100\text{--}350 \text{ кг/см}^2$), а прочность на сжатие превосходит прочность на изгиб в 2—3 и более раз ($250\text{--}1100 \text{ кг/см}^2$). Таким образом, шлифовальные круги хуже всего сопротивляются разрывным усилиям, а так как они работают на весьма высоких скоростях: $25\text{--}50 \text{ м/сек}$ и больше и развивающиеся при этом центробежные силы могут вызвать их разрыв, то к ним предъявляются особые требования. Все круги, работающие на шлифовальных станках, должны отвечать следующему условию: $v_{\text{крит}} > v_{\text{исп}} > v_{\text{раб}}$, т. е. иметь такую прочность, которая гарантировала бы отсутствие разрывов. Где $v_{\text{крит}}$ — скорость, при которой круг рывается, $v_{\text{исп}}$ — скорость, при которой ведется испытание кругов на разрыв, $v_{\text{раб}}$ — скорость, на которой ведется работа.

В этих целях каждый круг перед установкой на шлифовальный станок должен быть испытан вращением на специальных испытательных станках при скорости $v_{\text{исп}}$, превышающей рабочую скорость на 50%, в течение 5—10 мин., в зависимости от диаметра испытываемого круга. Так как возникающие при вращении кругов центробежные силы пропорциональны квадрату их скорости, то запас прочности получается равным 2,25 раза.

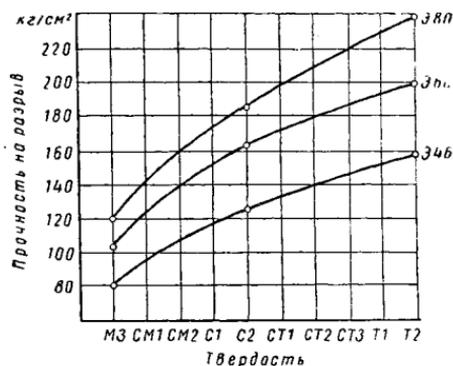
Прочность абразивных инструментов является функцией технологии их производства, твердости, зернистости, структуры, рода абразивного материала, типа и качества связки, отношения радиуса отверстия r к радиусу круга R , формы круга и других факторов. Указанный выше запас прочности при испытании кругов (2,25) задан для всех типоразмеров кругов, исходя из средней их характеристики. В дальнейшем следует разработать и установить запасы прочности и допустимые скорости работы кругов в зависимости от их характеристики, профиля и размеров. Прочность абразивных инструментов зависит также от технологии изготовления кругов, в частности от тщательного смешивания массы, способа прессования и обжига. Шлифовальные круги, запрессованные с применением двустороннего давления, более однородны и потому более прочны, чем круги, запрессованные при помощи одностороннего давления. Шлифовальные круги, подвергнутые в процессе обжига резким температурным переходам, особенно в процессе охлаждения, получают, как правило, внутренние напряжения, уменьшающие их прочность. При обжиге кругов, имеющих разную степень плотности в разных местах, вследствие получающихся, благодаря этому, разных условий термической обработки, часто возникают напряжения, которые или приводят к браку кругов, или к разной напряженности различных участков, которая при снятии этого напряженного состояния в процессе шлифования может привести к разрыву. Во избежание этого все круги диаметром свыше 200 мм подвергаются после их обжига обязательному обтачиванию для уничтожения остаточных внутренних натяжений.

Проведенные рядом исследователей, и в частности канд. техн. наук Васильевым Н. Н. и Вороновым С. Г., опыты по определению прочности кругов позволяют установить ряд зависимостей.

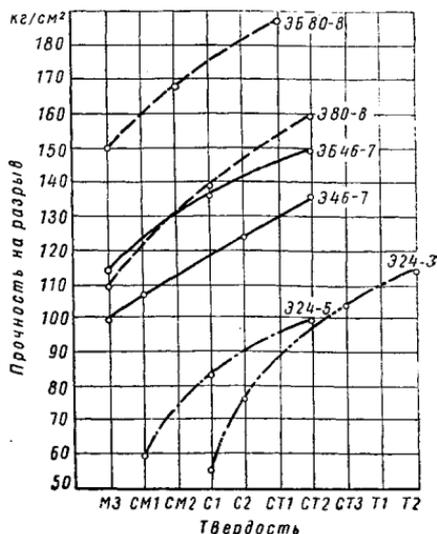
Прочность кругов на керамической связке с увеличением их твердости растет по закону произвольной прямой $x = my + c$.

На фиг. 36 показано влияние степени твердости и зернистости кругов из электрокорунда на их прочность.

На фиг. 37 приведены результаты испытаний на прочность кругов, изготовленных из электрокорунда нормального и белого, разных зернистостей и структур, на одной и той же связке, одних и тех же размеров и формы. Эти опыты показывают, что при повышении твердости круга на одну степень прочность повышается на 15—30%, в зависимости от характеристики круга, причем процент роста прочности больше в области мягких и среднемягких кругов.



Фиг. 36. Зависимость прочности кругов от их степеней твердости и зернистости.



Фиг. 37. Зависимость прочности кругов из нормального и белого электрокорунда.

Увеличение размера зерен в кругах сопровождается при прочих равных условиях уменьшением их прочности. Однако влияние зернистости сказывается в меньшей степени, чем влияние твердости.

Прочность кругов из белого электрокорунда выше, чем кругов из электрокорунда.

Чем выше содержание Al_2O_3 в электрокорунде, тем выше его прочность. Наличие в электрокорунде таких минералов, как анортит и гексаалюминат кальция, снижает прочность абразивных инструментов.

Анортит вызывает кристаллизацию связки, что снижает прочность, сопровождающуюся глухим звуком кругов.

Прочность электрокорундовых зерен и абразивных инструментов, изготовленных из них, также снижается при повышенном коэффициенте линейного расширения зерен.

У керамических кругов из карбида кремния прочность значительно меньше, чем у электрокорундовых кругов, несмотря на то, что при изготовлении их для достижения твердости, одинаковой с электрокорундовыми кругами, в формовочную массу заклады-

вается связки в 2,5—3 раза больше. Пониженная прочность этих кругов объясняется особенностями и меньшей реакционной способностью карборундового зерна со связкой по сравнению с электрокорундовым зерном. Даже в тех случаях, когда круги карбида кремния делаются на химически активной связке, их прочность на 10—15% ниже электрокорундовых кругов, а при обычно применяемых связках она ниже прочности электрокорундовых кругов на 25—40% и больше.

Так, прочность карборундовых кругов зернистости 46 твердости М2—СМ1 лежит в пределах 50—70 кг/см², в то время как прочность нескоростных электрокорундовых кругов этих же характеристик находится в пределах 80—115 кг/см². Вместе с тем прочность самой керамической связки равна 80—90 кг/см².

Прочность кругов тем выше, чем меньше содержится в связке щелочных окислов, поэтому применение в качестве увлажнителя массы жидкого стекла не способствует повышению прочности.

Прочность кругов также несколько снижается при применении в связке вместо калиевого полевого шпата легматита.

Чем плотнее по своему строению круги, тем выше их прочность, т. е. с увеличением в кругах расстояний между зернами прочность их падает. Опыты показали также, что прочность кругов на разрыв падает с увеличением отношения $\frac{r}{R} = \alpha$.

Прочность кругов прямого профиля выше, чем кругов фасонных профилей, вследствие чего допустимые скорости вращения для последних меньше, чем для дисковых кругов. Это объясняется концентрацией напряжений в местах выточек кругов, поэтому при обтачивании их места перехода одной поверхности к другой не следует делать с очень малым радиусом или под прямым углом, как это показано на фиг. 38. Такое выполнение выточек бывает причиной разрыва кругов и несчастных случаев.

Величина допустимых возникающих напряжений во вращающемся диске определяется по следующей формуле:

$$\sigma_t = \frac{0,1\gamma v^2}{g} \cdot \frac{3 + \mu}{4} \left(1 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \alpha^2 \right),$$

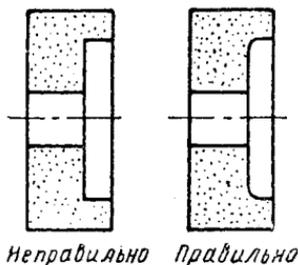
где γ — объемный вес материала круга в г/см³;

v — окружная скорость круга в м/сек;

g — ускорение силы тяжести в м/сек²;

μ — коэффициент поперечного сжатия (для шлифовальных кругов разных характеристик находится в пределах 0,2—0,3);

α — отношение радиуса отверстия к радиусу круга.



Фиг. 38. Выполнение выточек у кругов.

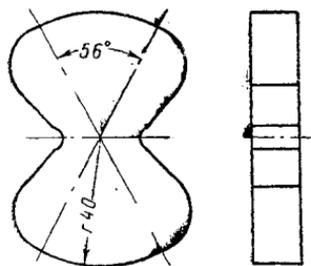
Из этой формулы видно, что σ_t пропорционально квадрату линейной скорости и объемному весу круга.

Модуль упругости при изгибе растет с повышением твердости абразивного инструмента и с уменьшением величины зерен.

В зависимости от характеристики керамических кругов он находится в пределах $1,5 \cdot 10^5$ — $5,0 \cdot 10^5$ кг/см².

Чем больше объемный вес кругов, тем выше их прочность.

Как показали расчеты и опыты, приведенная формула позволяет с достаточной степенью вероятности исчислять σ_t для электрокорундовых керамических и бакелитовых кругов и требует внесения серьезных поправок при исчислении σ_t карборундовых кругов.



Фиг. 39. Эталон для испытания прочности кругов (восьмерка).

Этой формулой не учитывается влияние неуравновешенности кругов на их прочность. Хорошо известно, что неуравновешенность способствует уменьшению прочности и увеличению опасности разрыва кругов. Неуравновешенность в допустимых ГОСТом 3060-55 пределах не оказывает заметного влияния на прочность.

Также неправильные результаты дает эта формула и для вулканитовых кругов, хотя у них и в большей степени проявляются пластические деформации.

В силу этого круги на вулканитовой связке более прочны на изгиб, чем круги, изготовленные на других связках. Прочность вулканитовых кругов на разрыв колеблется в пределах 80—150 кг/см².

Материал кругов на керамической связке подчиняется закону Гука, причем остаточные деформации отсутствуют. У кругов на бакелитовой связке, наоборот, упругие деформации отсутствуют, а влияние остаточных деформаций растет с увеличением напряжений.

Прочность бакелитовых кругов на разрыв несколько выше, чем не скоростных керамических и вулканитовых кругов, что позволяет с успехом применять их при обдирочном шлифовании на скоростях 40—50 м/сек и изготавливать из них отрезные круги, которые могут работать со скоростью 60—80 м/сек и выше. Так, специальные бакелитовые прорезные круги и круги для зачистки сварочных швов, изготавливаемые для повышения прочности с прослойками текстиля, обеспечивают возможность работы со скоростями круга 80—100 м/сек.

Повышение прочности у бакелитовых кругов по сравнению с одинаковыми по характеристике вулканитовыми и керамическими кругами объясняется более высокой прочностью и лучшей сцепляемостью бакелита с зерном.

Прочность на разрыв бакелитовых и вулканитовых кругов ниже, чем разрывная прочность связок, на которых они изготовлены. Так,

прочность бакелита в стадии С составляет 350 кг/см^2 и выше, прочность эбонита 500 кг/см^2 и выше.

Приведенные данные о разрывной прочности кругов, связок и зерен абразивных материалов показывают, что разрыв кругов происходит, как правило, не по зерну, а в местах сцепления зерна со связкой. Это подтверждает и визуальный осмотр поверхностей кругов в местах их разрыва.

Для определения прочности кругов часто пользуются методом разрыва на прорезе восьмерок (фиг. 39), изготовленных из той же массы, из которой производятся круги.

Следует отметить, что прочность на разрыв восьмерок и кругов несопоставима.

По данным различных опытов разрыв восьмерок дает величину прочности в 1,5—2,25 раза меньшую, чем действительная прочность кругов.

САМОЗАТАЧИВАЕМОСТЬ, ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ

Абразивные инструменты в отличие от металлических инструментов обладают свойством в процессе работы до некоторой степени восстанавливать свою режущую способность за счет облома, выкрашивания и даже вырывания целых зерен и таким путем обновлять отдельные участки рабочей поверхности. Благодаря этому суммарная длина режущих кромок зерен в течение процесса шлифования все время меняется, что в свою очередь вызывает в каждое мгновение различную суммарную работу, совершаемую зернами абразивного инструмента.

В зависимости от характеристики абразивного инструмента и условий работы (обработываемого материала, режима шлифования, станка и т. п.) это свойство самозатачиваемости проявляется по-разному и определяет показатели работы и в первую очередь стойкость инструмента между правками.

Под стойкостью понимается работоспособность абразивного инструмента между двумя правками, измеряемая во времени. Под правкой понимается принудительное затачивание рабочей поверхности, совершаемое специальными правящими инструментами.

Чем больше и равномернее самозатачиваемость, тем больше стойкость абразивного инструмента. Это положение является общим правилом почти для всех видов шлифования. При резьбошлифовании стойкость круга зависит в большей степени от стойкости его режущей кромки, чем от самозатачивания всей его режущей поверхности.

При сильном, но неравномерном самозатачивании круга его стойкость снижается.

Наибольшим свойством самозатачивания обладают абразивные инструменты, имеющие невысокую степень твердости, мягкие и средне-мягкие и работающие при тяжелых режимах резания, обычно на обдирочных и плоскошлифовальных работах торцом круга.

Самозатачивание наступает, когда усилия резания превосходят прочность зерен или их силу сцепления со связкой. Следует не забывать, что в абразивном инструменте имеются зерна различной формы, и часть из них имеет трещины, раковины и другие дефекты, что способствует их обламыванию. Следует также иметь в виду, что зерна вследствие своей различной формы и размеров соединяются друг с другом по разной величине поверхности соприкосновения и разным количеством связки и поэтому для вырывания их из тела круга требуются разные усилия. Часть зерен, особенно карбида кремния, скреплена между собой связкой настолько слабо, что достаточно небольших усилий для их вырывания и некоторого обновления режущей поверхности. Этому способствует также разновысотность расположения зерен относительно обрабатываемой детали.

Износ круга в процессе шлифования протекает следующим образом. У зерен, имеющих острые режущие грани, сначала происходит истирание работающей грани, затем по мере увеличения степени затупления и возрастания усилий резания происходит выкрашивание частиц зерен, снова начинается истирание образовавшихся новых граней и т. д. Зерна, ориентированные к обрабатываемой поверхности тупыми гранями, скорее выкрашиваются, причем облом происходит по наиболее слабым местам зерна.

Таким образом, износ и стойкость круга зависят не только от режима работы, но и от расположения зерен в нем.

Интересен характер износа зерен при шлифовании титановых сплавов. В этом случае режущие грани зерен получают зазубренную и как бы изъеденную форму, что дает основание высказывать предположения о химическом взаимодействии между зерном и сплавом.

Установлено также, что при шлифовании стали кислород воздуха, окисляя обработанную поверхность и снимаемую стружку, способствует ускорению износа абразивных зерен.

Стойкость зависит также от метода и режима правки. Если с абразивного инструмента снять при правке очень малый слой, его стойкость будет ниже, чем при съеме несколько большего слоя. Опытom установлено, что при правке следует снимать слой не менее 0,05 мм.

На кромках абразивных инструментов зерна закреплены менее прочно, в значительной части, с одной стороны, вследствие чего абразивные инструменты изнашиваются быстрее именно в этих местах. Поэтому резьбошлифовальные круги, круги для шлифования шеек коленчатых валов и т. п. имеют меньшую стойкость.

Стойкость зависит от режимов шлифования и от износа абразивного инструмента. Она уменьшается с увеличением износа при работе абразивного инструмента с затуплением и увеличивается при его работе с самозатачиванием.

Стойкость зависит также от размеров абразивного инструмента. Она больше у кругов больших диаметров и ширины, чем у кругов малых диаметров, так как в этом случае зерна реже участвуют

в работе за счет меньшего числа оборотов при одинаковой скорости шлифования.

Стойкость зависит и от диаметра и формы шлифуемой детали. Она выше при шлифовании деталей больших диаметров и имеющих прерывистую поверхность. Стойкость зависит от всех факторов шлифования, вида и количества охлаждающей жидкости, режима шлифования и от того, какой из элементов режима преобладает (глубина резания, величина продольной подачи, скорость детали), от характеристики круга и в частности от его структуры. Так, при плоском шлифовании круги с открытой структурой имеют более высокую стойкость, чем круги той же характеристики с плотной структурой.

В большинстве случаев шлифования самозатачиваемость наблюдается или в малой степени (у мягких и средне-мягких кругов), или почти совсем не проявляется, так как возникающие при существующих режимах шлифования силы резания являются не всегда достаточными для облома и вырывания затупившихся зерен. В этих случаях работа шлифования через некоторое время после правки происходит затупленным абразивным инструментом, вследствие чего расход мощности возрастает. При этом усилия резания возрастают, и часть менее прочных и слабо закрепленных зерен самозатачивается, вследствие чего резание совсем не прекращается, а постепенно ухудшается.

С увеличением скорости круга явление самозатачиваемости проявляется больше, чем при малых скоростях, вследствие чего стойкость круга возрастает.

Затупление круга есть результат истирания зерен. Хотя путь, проходимый каждым зерном за время его работы, весьма невелик, скорость его работы весьма значительна, что и определяет его износ. Износ зерен за счет истирания достигает за период стойкости круга 0,05 мм и более.

Затупление круга чаще всего характеризуется образованием на его кромках закруглений и на выступах зерен гладких площадок, при этом поры и частично зерна, даже острые, забиваются прилипшей к ним стружкой. Затупление круга вместе с тем сопровождается уменьшением его износа и съема металла.

Однако не следует смешивать засаливание круга с затуплением. Засаливание может происходить и при острых зернах круга, что особенно часто имеет место при обработке таких хрупких материалов, как чугун, специальные стали и т. п., когда стружка застревает в порах круга, а также в тех случаях, когда для шлифования выбран круг не той структуры, которая требуется для данной работы, вследствие чего стружка также застревает в порах круга. Засаливание также зачастую является следствием недостаточного охлаждения, неправильного выбора твердости и зернистости круга и пр.

Засаливание круга резко снижает его стойкость, вызывает дробление, вибрации и другие пороки. Стойкость круга снижается и при увеличении износа круга, особенно когда круг работает в условиях затупления.

Самозатачивание абразивного инструмента и его износ позволяют вступать в работу новым режущим кромкам и зернам, находившимся в период начала работы вне зоны шлифования, т. е. на большем чем фактическая глубина резания расстоянии от режущей поверхности абразивного инструмента.

Чем вязче обрабатываемый металл и тверже абразивный инструмент, тем больше склонность его к затуплению и засаливанию.

Стружка, получаемая при шлифовании вязких металлов (жаропрочные сплавы, алюминий, медь и т. п.), не обладает необходимой упругостью и потому легче сцепляется с зернами круга и сплющивается на зернах круга при последующих его оборотах, создавая явление налипания, которое также может быть отнесено к засаливанию, так как также уменьшает режущую способность и стойкость круга. Это явление в значительной степени напоминает явление образования нароста металла на резце при точении, фрезеровании и т. п., который, как известно, возникает при несвободном резании особенно в условиях обработки пластичных металлов с большим трением при температурах свыше 300° и который при больших скоростях резания представляет собой тонкий заторможенный, но не приваренный на поверхности резца слой, часто отпадающий в процессе резания. При шлифовании такой слой металла сцепляется с зернами круга настолько прочно, что для удаления его шлифовальный круг необходимо править.

Крупнозернистые и высокопористые абразивные инструменты обладают более высокой степенью самозатачиваемости, чем такие же инструменты с плотной структурой и мелкозернистые. Абразивные инструменты на керамической и бакелитовой связках лучше самозатачиваются, чем инструменты на вулканитовой связке, и поэтому имеют большую стойкость. Стойкость в зависимости от условий применения абразивного инструмента колеблется в очень больших пределах. Так, стойкость кругов для внутреннего шлифования, по данным НИБТН МСиИП, при разных работах изменяется в пределах 0,5—300 мин. При круглом наружном шлифовании она составляет от 7 до 80 мин., при бесцентровом шлифовании на проход от 30 до 300 мин., при бесцентровом шлифовании методом врезания от 7 до 70 мин. и т. д.

При точении стойкость резца тем меньше, чем выше скорость резания. При шлифовании, наоборот, стойкость растет с повышением скорости резания.

Так, при шлифовании шатунных шеек коленчатых валов было установлено, что при работе кругом диаметром 1100 мм со скоростью 34 м/сек, стойкость круга между правками равнялась шести валам.

При шлифовании этим же кругом со скоростью 23 м/сек стойкость круга снизилась до двух валов. Эта разница в поведении резца и абразивного инструмента объясняется их разной теплостойкостью и условиями работы.

Самозатачиваемость является весьма важным свойством, так как от нее зависит не только стойкость, но и производительность,

расход абразивного инструмента, а также другие технико-экономические показатели шлифования.

Чем больше самозатачиваемость абразивного инструмента, тем больше его удельный износ, т. е. тем больше отношение изношенного объема круга к объему снятого металла непосредственно в процессе шлифования, тем реже необходима правка. Вместе с тем сьем металла в единицу времени повышается.

Круги из электрокорунда белого и особенно из монокорунда имеют, особенно при чистовом шлифовании, более высокую стойкость (в 1,5—2 раза), чем круги из электрокорунда и карбида кремния, вследствие чего износ их меньше. Так, круги из монокорунда изнашиваются при тех же условиях меньше, чем круги из электрокорунда.

Износ кругов при шлифовании составляет малую долю от общего расхода кругов, на правку же расходуется до 95% рабочего объема кругов.

Только при обдирочном круглом и плоском шлифовании, при разрезке, при шлифовании шариков и в некоторых других специальных случаях шлифования износ кругов собственно на процесс шлифования составляет от 50 до 90% от их рабочего объема. В этих случаях самозатачивание является целиком результатом износа кругов в процессе шлифования.

Большой износ кругов происходит также при шлифовании жаропрочных сплавов. Вместе с тем, несмотря на большой износ при шлифовании жаропрочных сплавов часто наблюдается налипание сплава, вследствие большой его вязкости, на зерна круга. Именно поэтому для шлифования многих жаропрочных сплавов применяют круги из карбида кремния, зерна которого легче выкрашиваются и обламываются, уничтожая таким путем налипание и создавая самозатачиваемость круга. Стойкость и износ круга зависят не только от условий работы, но и от типа связки, твердости и зернистости. Так, круги на бакелитовой связке, при тех же условиях работы, изнашиваются быстрее, чем круги на керамической связке.

Между твердостью и износом абразивных инструментов существует почти такая же зависимость, как между твердостью и глубиной лунок, получаемых при замере твердости. С увеличением степени твердости удельный износ уменьшается, а с возрастанием степени зернистости увеличивается.

Удельный износ повышается с увеличением степени пористости, поэтому применение высокопористых кругов влечет за собой больший их расход. При шлифовании деталей малых диаметров удельный расход кругов больше, чем при шлифовании деталей больших диаметров, поэтому при шлифовании таких деталей, например, как веретен и других диаметром до 25—50 мм, выбирают более твердые круги. При увеличении диаметра круга износ его уменьшается.

Износ абразивных инструментов зависит также от механической прочности зерен, из которых они изготовлены. Чем выше прочность зерен, тем несколько выше и производительность шлифования.

Крупнозернистый абразивный инструмент изнашивается быстрее, чем мелкозернистый, что объясняется большими усилиями резания, которые возникают при работе крупнозернистым инструментом, так как режимы работы в этих случаях всегда выше. С увеличением скорости детали износ повышается. Увеличение поперечной и продольной подачи понижает стойкость круга и увеличивает его износ, сьем металла в единицу времени при этом тоже увеличивается.

ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ

Абразивные инструменты на всех связках и особенно на керамической обладают такой теплостойкостью, какой не имеют никакие металлические и твердосплавные инструменты.

Красностойкость быстрорежущей стали равна около 400°, твердых сплавов 600—900°, керамических пластинок около 1200°. При этом следует отметить, что с повышением температуры нагрева инструментов из этих материалов, твердость их падает.

В табл. 14 приведены данные об изменении твердости твердых сплавов и керамических пластинок при их нагревании. Измерения твердости производились на приборе Роквелла алмазным конусом при нагрузке 60 кг.

Таблица 14

Изменение твердости при нагревании

Наименование	Температура нагрева в °С					
	20	400	600	800	1000	1200
ВК2	—	87	84	80	75	67
ВК8	88	81	78	73	62	45
Т30К4	—	85	82	77	70	63
Т15К6	90	83	80	75	68	61
Керамические пластинки	92	89	86	83	82	78

Температура плавления электрокорунда находится около 2000°. Таким образом, можно считать, что теплостойкость абразивного инструмента из электрокорунда близка к этой температуре. Теплостойкость карбида кремния еще выше, так как температура его разложения выше, чем температура размягчения электрокорунда. Однако с поверхности карбид кремния разлагается при более низкой температуре, около 900—1200°. Твердость электрокорундовых и карборундовых зерен при температурах, которые возникают в процессе шлифования, почти не изменяется.

Следует также отметить, что абразивные инструменты не представляют собою монолитных тел, что способствует их высокой теплостойкости.

Известно, что чем больше теплостойкость и красностойкость, тем меньше изменяется с повышением тепловыделения твердость реза, тем менее интенсивно протекает его износ.

Этим обстоятельством, а также большой разницей в твердости зерен абразивного инструмента и обрабатываемых деталей и объясняется столь высокая износоупорность, которую имеют зерна абразивных инструментов.

Высокая теплостойкость абразивных инструментов обеспечивает возможность работы ими при очень больших скоростях и при тяжелых режимах.

Вместе с тем длительный нагрев при значительной температуре некоторых видов абразивного инструмента приводит к его разрушению. Так, длительный нагрев бакелитовых абразивных инструментов, при температуре свыше 230° в течение 4—5 час., значительно уменьшает их прочность.

Теплостойкость абразивных инструментов зависит также от состава связки.

Так, введение идитола в связку бакелитовых и вулканитовых кругов и брусков способствует уменьшению теплостойкости связки.

АБРАЗИВНАЯ СПОСОБНОСТЬ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Абразивную способность абразивного инструмента следует отличать от абразивной способности абразивных материалов и не смешивать эти два понятия. Хотя по абразивной способности карбид кремния превосходит электрокорунд, это не значит, что абразивный инструмент из карбида кремния обладает большей режущей способностью, чем инструмент из электрокорунда. Абразивная способность одного и того же абразивного инструмента, работающего в разных условиях, будет различна.

Под абразивной способностью абразивного инструмента понимается его способность обрабатывать тот или другой материал за период между двумя правками. Чем больше снимает данный абразивный инструмент стружки в единицу времени и чем дольше он работает без правки, тем выше его абразивная способность. Таким образом, абразивная способность оценивается съемом металла, стойкостью и износом круга.

На абразивную способность инструментов влияют все факторы шлифования, от которых и зависит успешность их работы. Так, при обработке материалов с высоким сопротивлением разрыву, к которым принадлежат стали всех марок, электрокорундовые абразивные инструменты показывают большую абразивную способность, чем инструменты из карбида кремния, которые наиболее пригодны для обработки металлов с низким сопротивлением разрыву, таких, как медь, бронзовое литье, чугун, алюминий, цинк и т. п.

Не в меньшей степени на абразивную способность влияет режим шлифования и другие факторы.

Абразивные инструменты, имеющие различную характеристику, имеют и разную абразивную способность. Вопрос о создании метода и прибора для определения абразивной способности, из-за большого количества факторов, влияющих на нее, до сих пор не нашел положительного решения.

СВОЙСТВА СВЯЗОК

В зависимости от вида и состава связки, на которой изготовлен абразивный инструмент, он имеет различные свойства и по-разному ведет себя в работе. Технология изготовления абразивных инструментов также зависит от вида связки.

Наиболее широкое применение получили абразивные инструменты на керамической связке, обладающие рядом преимуществ перед инструментами на других связках. Керамическая связка помимо высокой прочности придает абразивным инструментам высокую теплостойкость, большую жесткость, значительную химическую стойкость и водоупорность. Эти свойства позволяют применять абразивный инструмент на керамической связке для разнообразных шлифовальных работ при скоростях шлифования до 50 м/сек, больших подачах и глубинах резания, с любым видом охлаждающей жидкости и всухую, для обдирочных и для самых точных работ, т. е. имеет универсальное применение. Керамическая связка позволяет изготавливать абразивный инструмент любой степени зернистости, всех твердостей и различных структур. При соответствующей мощности гидравлических прессов на керамической связке могут быть изготовлены абразивные инструменты любых диаметров и толщин, за исключением очень тонких, при больших диаметрах.

Коэффициент линейного расширения керамической связки при конечной температуре обжига близок к коэффициенту линейного расширения электрокорунда ($5 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6}$), а ее удельный вес 2,3—2,6 г/см³ близок к объемным весам абразивного инструмента: 1,9—2,6 г/см³. Керамическая связка при температуре обжига обладает способностью вступать в реакцию с электрокорундовым зерном, что увеличивает прочность ее сцепления с ним и прочность абразивного инструмента. Вообще качество керамической и любой другой связки определяется в первую очередь прочностью ее сцепления. Чем выше прочность сцепления, тем лучше связка, тем меньше ее надо применять для достижения той же степени твердости, тем эффективнее работа абразивного инструмента.

Однако не все керамические связки обладают в равной степени этими ценными свойствами. Так, связки, содержащие в своем составе В₂О₃, обладают повышенной реакционной способностью с абразивным зерном и создают более прочные сцепления, в результате чего шлифовальные круги, изготовленные на боросодержащих связках, имеют значительно более высокую механическую прочность, могут безопасно работать на скоростях порядка 50 м/сек и имеют лучшую стойкость. Связки с повышенным содержанием СаО, наоборот, как правило, снижают механическую прочность и работоспособность абразивных инструментов, изготовленных на них. Также снижается механическая прочность у тех связок, у которых в зоне контакта с зерном образуются кристаллы муллита 3Al₂O₃·2SiO₂, шпинели MgO·Al₂O₃, рутила TiO₂ и других минералов в зависимости от состава связок.

Вместе с тем керамическая связка придает абразивному инструменту повышенную, по сравнению с инструментом на других связках, хрупкость. Поэтому на работах, где возникают изгибающие усилия и где абразивный инструмент подвергается ударному воздействию, применяются инструменты на бакелитовой и вулканитовой связках.

Таким образом, состав связки очень сильно влияет на работу абразивных инструментов. Поэтому для разных работ и шлифуемых материалов изготовляют абразивные инструменты на связках различных составов.

Керамическая и все другие виды связок плохо сцепляются с запыленными и загрязненными зернами, а также с зернами, имеющими высокого класса чистоты поверхность, что особенно относится к зернам карбида кремния.

Примеси, содержащиеся в электрокорунде, особенно СаО, также снижают прочность сцепления связки с зерном и ухудшают условия попадания абразивных инструментов в заданную твердость.

Бакелитовая связка придает абразивным инструментам более высокую прочность, чем керамическая, особенно на сжатие, и сообщает им также большую упругость. Водоупорность у инструментов на бакелитовой связке несколько ниже. На бакелитовой связке так же, как и на керамической, могут быть изготовлены абразивные инструменты всех форм и размеров и даже очень тонкие, до 1 мм толщиной, применяемые для прорезных и отрезных работ. Вместе с тем бакелитовая связка обладает невысокой теплостойкостью, выгорая при длительном нагревании уже при температуре порядка 250—300°. При температуре 200° и выше бакелитовая связка приобретает хрупкость. Химически она недостаточно стойка. При охлаждении жидкостью с содержанием свыше 1,5% щелочей абразивные инструменты на бакелитовой связке в этих условиях несколько теряют свою твердость и прочность.

Потеря прочности тем больше, чем больше в жидкости щелочей, чем выше температура при шлифовании и длительнее время шлифования.

Абразивные инструменты на бакелитовой связке при шлифовании меньше нагревают шлифуемые изделия.

Свойством недостаточной химической стойкости бакелитовой связки иногда сознательно пользуются для уменьшения таким образом твердости круга. Для этого круг выдерживают некоторое время в крепком содовом растворе охлаждающей жидкости. Однако этот способ нельзя рекомендовать, так как при этом теряется не только твердость, но и прочность.

Для повышения твердости и прочности бакелитовых и керамических кругов применяют способ пропитки их в растворе бакелита.

Для предохранения бакелитового круга от понижения твердости и прочности при работе с охлаждением применяется пропитка круга парафином, или окраска его лаком.

Вулканитовая связка придает абразивному инструменту высокую плотность, несколько меньшую прочность, чем бакелитовая связка, и хорошую водоупорность.

Абразивные инструменты на вулканитовой связке могут быть изготовлены толщиной до 0,1 мм. Они успешно применяются при прорезных и отрезных работах и в случаях, когда надо получить высокую чистоту поверхности. Они нестойки к ряду охлаждающих жидкостей, например к керосину, их связка имеет низкую теплоустойчивость (около 160—200°) и поэтому при достижении в процессе шлифования высокой температуры абразивные зерна несколько вдавливаются в связку, резание ухудшается, и круг начинает полировать обрабатываемое изделие. Такие случаи наблюдаются при слишком тяжелых режимах шлифования.

Следует отметить еще одно интересное свойство связок — уменьшение прочности с увеличением толщины их слоя; предел прочности слоя связки обратно пропорционален его толщине.

Чем тоньше помол связки, тем равномернее ее распределение в круге, тем больше прочность круга. В производстве абразивного инструмента следует стремиться к более тонкому помолу всех компонентов связки.

ЧИСЛО ЗЕРЕН

Число зерен, находящихся в абразивном инструменте и на его режущей поверхности, определяет в значительной степени производительность процесса шлифования и качество получаемой поверхности. От количества одновременно режущих зерен и нагрузки на них зависит суммарная длина режущей кромки, а следовательно и стойкость инструмента.

Число зерен в абразивном инструменте зависит не только от его формы, размеров и номера его зернистости, но и от вида абразивного материала, типа и качества связующего вещества, его твердости и структуры. Поэтому при определении числа зерен в абразивном инструменте необходимо учитывать все эти факторы и, кроме того, иметь в виду, что в каждом абразивном инструменте зерна распределяются на разной высоте от рабочей поверхности и друг от друга. Вследствие этого подсчитать точно число зерен невозможно, да этого и не требуется, так как в процессе шлифования количество режущих зерен и их конфигурация вследствие износа круга непрерывно изменяется. Для правильного представления явлений, происходящих в процессе шлифования, достаточно и приблизительного подсчета. В литературе по шлифованию этому вопросу уделялось внимание, однако необходимой ясности о числе зерен, содержащихся в единице объема абразивного инструмента, нет. Разные авторы приводят для определения количества зерен разные формулы, и при этом большинство исходит из неверного предположения, что зерна имеют форму шара и распределены в круге со строгой и определенной равномерностью. На самом деле зерна далеки от формы шара и имеют разнообразные неправильные формы, приближающиеся к кубу, призме, клину и другим

формам. Расположение зерен носит беспорядочный характер. Поэтому к вопросу определения числа зерен автор подошел путем исчисления их в единице веса и отсюда в единице объема. Фактическое исчисление зерен в единице веса с точностью $\sim 10\%$ показало, что в 1 г содержится зерен электрокорунда:

Зернистости № 16	около	. . . . .	150 шт.
" № 20	"	. . . . .	230 "
" № 24	"	. . . . .	700 "
" № 36	"	. . . . .	2 300 "
" № 46	"	. . . . .	6 700 "
" № 60	"	. . . . .	19 500 "
" № 80	"	. . . . .	75 000 "

В 1 г карбида кремния содержится несколько большее количество зерен, чем в 1 г электрокорунда (исчислено также с точностью 10%), а именно:

Зернистости № 16	около	. . . . .	200 шт.
" № 20	"	. . . . .	350 "
" № 24	"	. . . . .	1 000 "
" № 36	"	. . . . .	3 000 "
" № 46	"	. . . . .	7 300 "
" № 60	"	. . . . .	23 000 "
" № 80	"	. . . . .	90 000 "

Необходимо напомнить, что объемный вес карбида кремния (3,12—3,25) ниже объемного веса электрокорунда (3,9—4,0), вследствие чего абразивный инструмент из карбида кремния примерно на 20% легче, чем инструмент из электрокорунда.

Приведенный подсчет зерен показывает, что в каждом последующем номере зернистости наиболее ходовых номеров 46—80 содержится в 3—4 раза больше зерен, чем в предыдущем номере. Отсюда видно, какое большое значение имеет правильный выбор зернистости и как резко меняются условия работы абразивного инструмента в зависимости от степени его зернистости.

Число зерен, содержащихся в единице объема абразивного инструмента, изготовленного на одной и той же связке, зависит от его степени зернистости, твердости и структуры. Объемный вес, а следовательно и число зерен, увеличивается с увеличением степени плотности и твердости. Чем крупнее зерна, тем выше объемный вес и тем меньшее число зерен содержится в единице объемного веса. Объемные веса наиболее ходового абразивного инструмента на керамической связке из электрокорунда зернистости 24—80, твердости СМ-СТ колеблются в пределах 2,05—2,5 г/см³.

Абразивные инструменты на бакелитовой связке из жидкого бакелита имеют почти такой же объемный вес, как и керамические. При применении в качестве связки порошкообразного бакелита объемный вес абразивных инструментов и количество зерна в них несколько меньше, чем при жидком бакелите. Средний объемный вес абразивного инструмента на керамической связке можно принять 2,25 (5-я структура, твердость СМ2, зернистость 46). Учитывая, что в абразивном инструменте содержится в зависимости от

твердости и структуры тот или другой объем связки, обозначим коэффициент, учитывающий количество связки в абразивном инструменте, через k .

Обычно в большинстве случаев количество связки составляет 10—20% от веса абразивного инструмента, т. е. $k = 0,9—0,8$. Тогда количество зерен в шлифовальном круге будет равно

$$i = \frac{\pi(D^2 - d^2)Hk\gamma_k i_2}{4}$$

или, принимая $k = 0,9$, т. е. считая, что в объеме круга в среднем содержится 10% связки, и принимая $\gamma_k = 2,25 \text{ г/см}^3$, получаем $i = 1,6 (D^2 - d^2) H i_2$, где i_2 — количество зерен в 1 г, H — высота круга в см, D — диаметр круга в см, d — диаметр отверстия круга в см.

Подсчет количества зерен, содержащихся в электрокорундовом круге зернистостью № 60 размерами $400 \times 40 \times 127 \text{ мм}$, показывает, что в этом круге находится около 180 миллионов зерен, а в 1 см^3 данного круга содержится 39 500 зерен.

Число зерен, находящихся на режущей поверхности круга в слое, равном по высоте размеру зерна в поперечнике, может быть подсчитано по следующей формуле:

$$i_{p,n} = \pi D H a k \gamma_k i_2,$$

где a — средний размер зерна в поперечнике (табл. 15).

Таблица 15

Средневзвешенные размеры зерен в поперечнике в мм ;

№ зернистости						
16	20	24	36	46	60	80
1,24	0,94	0,79	0,56	0,40	0,25	0,15

Подсчет показывает, что на режущей поверхности круга указанных выше размеров и характеристики находятся ~ 500 тысяч зерен. На 1 мм^2 режущей поверхности данного круга зернистости № 60 в слое, равном размеру зерна в поперечнике, находится 9,9 зерен.

По данным фирмы Нортон на 1 мм^2 поверхности электрокорундового круга зернистости № 60 находится 5,12 зерен, по данным Дж. Геста 2,48 зерен.

Подсчет числа зерен по формуле Н. И. Волского дает для этой же зернистости 19 зерен на 1 мм^2 и подсчет по формуле П. Е. Дьяченко дает 8,9 зерен.

В табл. 16 приводится исчисленное нами действительное число зерен, находящихся на 1 мм^2 поверхности электрокорундового кру-

га на керамической связке, имеющего объемный вес 2,25 и около 10% связки.

Таблица 16

Число зерен на 1 мм² поверхности электрокорундового круга

№ зернистости						
16	20	24	36	46	60	80
0,37	0,44	1,11	2,57	5,30	9,9	23,4

Таким образом, резание при шлифовании осуществляется значительным числом зерен, особенно при применении мелкозернистых кругов и при большой площади соприкосновения абразивного инструмента с обрабатываемой деталью.

РАЗНОВЫСОТНОСТЬ И НЕСООСНОСТЬ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗЕРЕН

Зерна в круге расположены на разных расстояниях от его поверхности.

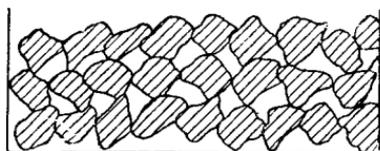
Разновысотность расположения зерен в шлифовальном круге, считая от поверхности соприкосновения круга с деталью вглубь круга (фиг. 40), определяет количество зерен, при одной и той же поперечной подаче, участвующих в процессе шлифования в каждый данный момент, а также до известной степени стойкость круга и чистоту поверхности шлифуемой детали.

Толщина стружки, снимаемая каждым зерном при одной и той же поперечной подаче, зависит от расстояния расположения зерен от шлифуемой поверхности и от того, с каким местом поверхности детали они войдут в контакт (в канавку, образованную зерном при предыдущем проходе, или в гребешок между канавками).

Степень разновысотности зависит не только от характеристики круга и естественного расположения зерен в круге, образовавшегося при его формовании, но и от способа и режима правки.

Разновысотность увеличивается с увеличением вырывания и обламывания зерен и уменьшается, когда в процессе правки часть зерен скалывается, что особенно имеет место при правке алмазом.

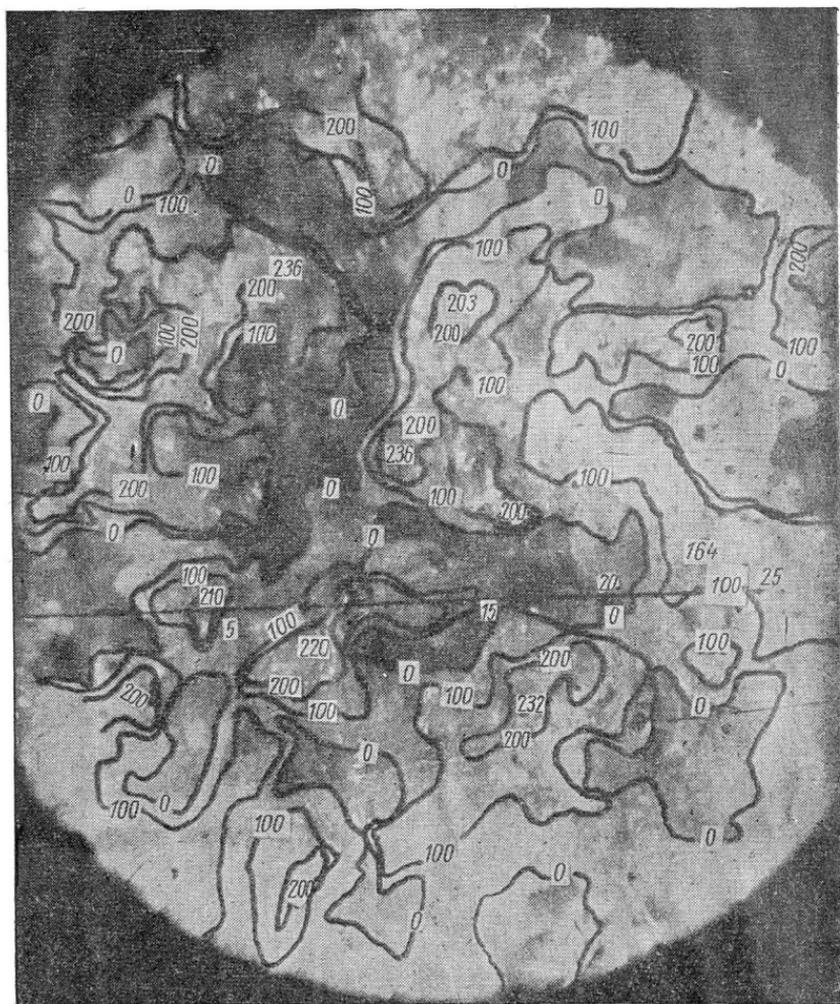
Чем больше степень разновысотности, тем меньшее число зерен принимает участие в резании, тем меньше средняя толщина и объем снимаемых стружек и грубее отшлифованная поверхность, но при этом резание происходит спокойнее, и опасность засалива-



Фиг. 40. Расположение зерен в шлифовальном круге.

ния уменьшается, так как с увеличением степени разновысотности увеличивается и расстояние между одновременно работающими зернами.

С уменьшением степени разновысотности равномерность нагрузки, приходящейся на каждое зерно, возрастает, число зерен,



Фиг. 41. Микростереофотография разновысотности зерен.

принимающих активное участие в резании, увеличивается, и чистота шлифуемой поверхности улучшается.

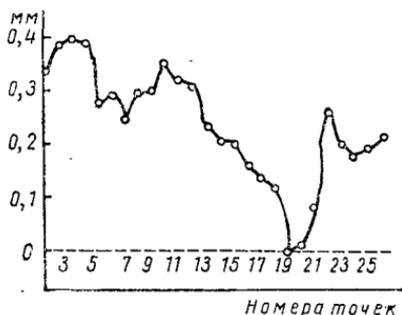
Правка с замедленной подачей приводит к уменьшению разновысотности, уменьшению стойкости круга и улучшению чистоты поверхности. К этим же результатам приводит и правка на затупление абразивных зерен.

Для определения разновысотности зерен в круге канд. техн. наук Сильвестеров В. Д. применил обычно используемые в топографии стереограмметрические приборы (стереокомпаратор СК-2 и др.), позволяющие устанавливать по микростереофотографии разновысотность зерен того участка круга, с которого была снята данная фотография. На фиг. 41 приведена фотография участка круга зернистости № 46, после его правки, снятая через бинокулярный микроскоп с увеличением $\times 40$, и на фиг. 42 — профиль зерен, находящихся на данном участке круга, зарисованный при помощи замеров, сделанных на указанном стереокомпараторе.

Разновысотность зерен увеличивается с увеличением зернистости и уменьшением степени твердости. Так, например, у круга 46С1К, в зависимости от способа его правки, разновысотность достигала 20—110 мк, а у круга 180С1К она колебалась в пределах 7—20 мк.

Таким образом, шлифование кругами с мелкой зернистостью происходит в условиях снятия стружек более стабильной толщины.

Расположение зерен на рабочей поверхности, несоосное друг к другу, приводит к тому, что даже при шлифовании методом врезания каждое последующее зерно проходит по своему пути, не совпадающему точно с путем предыдущего зерна, что и обеспечивает известную чистоту поверхности, даже при этом виде шлифования. Такое расположение зерен не всегда учитывается при исследовании процессов шлифования, что приводит, как мы увидим ниже, к неправильным и неточным выводам о протекании процесса шлифования.



Фиг. 42. Профили зерен.

ГЛАВА V

ОСНОВЫ ШЛИФОВАНИЯ

Целью процесса шлифования является придание деталям размеров требуемой точности и качества поверхности.

В зависимости от формы обрабатываемых деталей и допусков на размер и чистоту поверхности, процесс обработки совершается на определенном шлифовальном станке. Режим шлифования назначается в зависимости от тех условий, которым должны отвечать обрабатываемая деталь или изделие. Так, например, при заточке инструмента основная цель заключается в достижении остроты и чистоты затачиваемого лезвия, для обеспечения максимальной стойкости инструмента, а следовательно и получения высокой производительности при его эксплуатации. Этим условиям должен быть подчинен как режим шлифования, так и выбор характеристики шлифовальных кругов.

При обдирочных процессах, когда не надо бояться прижогов, основной целью является получение высокой производительности процесса шлифования. В этих случаях надо выбирать более твердые круги и применять высокие, допустимые мощностью станка, режимы.

ЭЛЕМЕНТЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Процесс шлифования осуществляется обычно с большой скоростью резания.

Подсчет скорости круга, измеряемой в метрах в секунду, может быть произведен по формуле

$$v_k = \frac{\pi D n}{60} \text{ м/сек},$$

где D — диаметр круга в м ;

n — число оборотов круга в минуту;

v_k — скорость круга, обычно равная 20—50 м/сек .

По мере износа круга его диаметр и скорость уменьшаются. В целях обеспечения проведения шлифования с возможно более постоянной скоростью резания, что имеет важное значение для успешности этого процесса, необходимо по мере износа круга повышать его число оборотов.

Скорость детали или иначе скорость круговой подачи может быть подсчитана по формуле

$$v_d = \frac{\pi d n}{1000} \text{ м/мин},$$

где d — диаметр детали в мм, n — число оборотов детали в минуту. Скорость детали чаще всего равна 10—50 м/мин.

Скорость детали при шлифовании обычно в десятки раз меньше скорости круга.

Относительное перемещение детали и круга, создающее возможность обработки детали, называется подачей.

Относительное перемещение детали и круга вдоль оси детали называется продольной подачей. Величина продольной подачи выражается в долях ширины круга на один оборот шлифуемой детали или скорости стола шлифовального станка.

При работе с продольной подачей, меньшей ширины круга, в резании принимают участие зерна, расположенные по всей ширине круга, но главная доля работы падает на часть ширины круга, равную продольной подаче на оборот изделия.

Относительное перемещение круга и детали в направлении, перпендикулярном к шлифуемой поверхности, называется поперечной подачей.

Поперечная подача определяет слой обрабатываемого материала, снимаемый за один ход стола, и осуществляется за одинарный или двойной ход стола (t мм/дв. ход или t мм/ход). Непрерывная поперечная подача исчисляется в мм/мин.

Поперечная подача при шлифовании в десятки и даже сотни раз меньше, чем при точении и фрезеровании. При круглом шлифовании она обычно равна 0,025—0,05 мм/дв. ход.

В зависимости от вида шлифования и длины шлифуемых деталей применяются или непрерывная поперечная подача на каждый оборот детали, или периодическая действующая в течение одного хода стола.

Прерывистая подача обычно применяется при шлифовании длинных деталей, а непрерывная при шлифовании коротких деталей методом врезания.

В зависимости от вида и условий шлифования, типа и мощности станка, требований к точности и чистоте поверхности шлифуемых деталей, процесс шлифования ведется с тем или иным режимом, определяющим съем металла, точность, чистоту поверхности, износ абразивного инструмента и время шлифования.

ВИДЫ ШЛИФОВАНИЯ

В зависимости от способа закрепления обрабатываемой детали процессы шлифования можно подразделять на две группы: ручное и механическое шлифование.

К первой группе следует отнести работу на точильных, подвес-

ных и плоскообдирочных станках: обдирку, очистку, снятие заусенец, заточку, обработку различных плоскостей.

Вторая группа включает все другие виды шлифования, а именно:

1. Круглое наружное шлифование: а) с продольной подачей, б) методом врезания, в) бесцентровое с продольной сквозной подачей, с подачей до упора и методом врезания.

2. Круглое внутреннее шлифование: а) с продольной подачей, б) планетарное, в) бесцентровое.

3. Плоское шлифование: а) периферией круга, б) торцом круга и сегментами.

4. Заточка различного стального, твердосплавного и керамического режущего инструмента.

5. Разрезные и прорезные работы.

6. Шлифовально-доводочные работы: а) доводка, б) хонингование, в) суперфиниширование.

7. Фасонное шлифование: а) резьбошлифование; б) зубошлифование; в) шлифование шаров и т. д.

8. Ленточное шлифование.

Наиболее широкое распространение получило круглое наружное шлифование.

Существующие конструкции станков дают возможность производить круглое наружное шлифование разными способами.

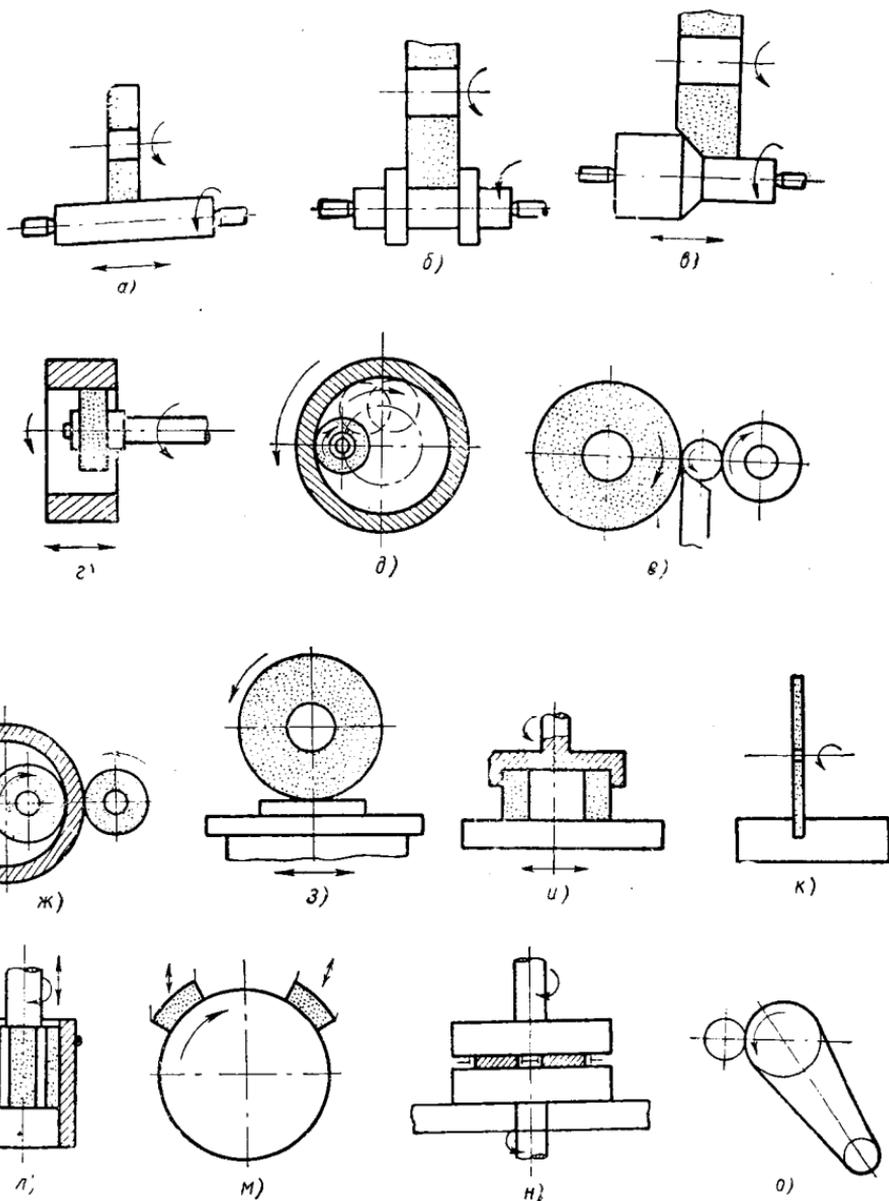
В условиях индивидуального и мелкосерийного производства чаще всего применяется способ шлифования с продольной подачей (фиг. 43, а), при котором шлифовальный круг, кроме вращательного движения, имеет возможность осуществлять поперечную подачу, а шлифуемая деталь, вращаясь, движется возвратно-поступательно вместе со столом станка.

В этом случае припуск снимается за несколько проходов, число которых зависит от величины поперечной подачи и жесткости станка.

В условиях крупносерийного и массового производства и при работе широким кругом, когда шлифуемая длина равна ширине круга, обычно применяется шлифование врезанием, в этом случае круг работает полной шириной. Иногда для равномерности износа и достижения лучшей чистоты поверхности круг получает возвратно-поступательное перемещение с ходом в пределах 5—10 мм, вдоль оси детали (фиг. 47, б).

Способ шлифования врезанием применяется часто в случаях, когда шлифуемая часть детали ограничена с двух сторон буртиками, как например, шейки коленчатых валов.

При шлифовании различают три периода протекания процесса (фиг. 44): период врезания, в течение которого идет постепенное нарастание усилий резания и снимаемого объема стружки, период установившегося резания и период выхаживания, в течение которого шлифование происходит без подачи; при выхаживании объем снимаемой стружки в единицу времени и усилие резания уменьшаются. Иногда применяется глубинный способ шлифования, при

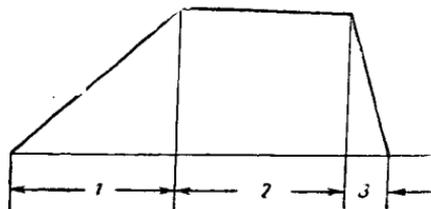


Фиг. 43. Схемы процессов абразивной обработки:

a — круглого наружного шлифования с продольной подачей; *b* — круглого наружного шлифования методом врезания; *v* — круглого наружного глубинного шлифования; *z* — круглого внутреннего шлифования; *d* — внутреннего шлифования с планетарным вращением круга; *e* — бесцентрового наружного шлифования; *ж* — бесцентрового внутреннего шлифования; *з* — плоского шлифования периферией круга; *и* — плоского шлифования торцом круга; *к* — разрезного шлифования; *л* — хонингования; *м* — суперфиниша; *н* — доводки; *o* — ленточного шлифования.

котором весь припуск снимается за один-два прохода. В этом случае шлифовальному кругу придается при правке ступенчатый или скошенный профиль (фиг. 43, в), а продольная подача делается весьма малой и большей частью осуществляется от руки. Этот способ шлифования повышает производительность за счет уменьшения числа холостых проходов.

Общим недостатком станков круглого наружного шлифования является необходимость постоянного наблюдения рабочего за процессом шлифования и управления станком, что затрудняет переход на многостаночное обслуживание. Учитывая, что круглошлифовальные станки для наружного шлифования занимают наибольший



Фиг. 44. Три периода процесса шлифования.

удельный вес в общем парке шлифовальных станков, необходимо в первую очередь обратить внимание на модернизацию этих станков и на увеличение выпуска новых, в которых было бы максимально автоматизировано управление станками, и процесс шлифования выключался бы по достижении заданного размера.

Круглое внутреннее шлифование осуществляется чаще всего методом продольной и поперечной подачи круга при одновременном вращательном движении круга и детали в разных направлениях (фиг. 43, г).

При шлифовании отверстий в деталях, имеющих некруглую наружную форму, применяется шлифование, при котором круг, помимо поперечной подачи и вращения вокруг оси, получает вращение вокруг оси детали, т. е. имеет планетарное движение. Шлифуемая деталь при этом не имеет вращательного движения. Такой способ шлифования называется планетарным (фиг. 43, д).

Станки для внутреннего шлифования обычно более автоматизированы, чем станки для круглого наружного шлифования, однако и для них задача прекращения шлифования по достижении требуемого размера является актуальной.

Бесцентровое наружное шлифование широко применяется в массовом производстве. Осуществляется оно в зависимости от формы детали способом продольной или врезной подачи. Детали цилиндрической формы, не имеющие каких-либо выступов, шлифуются методом сквозной подачи, при котором деталь вращается и движется между шлифовальным и ведущим кругами, которые вращаются в одном направлении. Круги устанавливаются так, что между ними образуется щель, равная диаметру шлифуемой де-

тали минус толщина слоя, снимаемого за один проход (фиг. 43, е).

Снятие всего припуска осуществляется обычно за несколько проходов на одном или нескольких установленных в ряд станках. Сквозную продольную подачу шлифуемая деталь получает от ведущего круга, за счет поворота его на некоторый угол в вертикальной плоскости.

Бесцентровое шлифование методом врезания применяется при обработке деталей ступенчатой или фасонной формы. В этом случае продольная подача детали отсутствует, а поперечная подача дается при шлифовании для каждой детали.

Бесцентровое внутреннее шлифование отличается тем, что шлифуемая деталь получает вращение за счет трения от вращающегося ролика, а продольная и поперечная подача осуществляется шлифовальным кругом (фиг. 43, ж). Этот способ шлифования получил распространение в массовом производстве.

Плоское шлифование широко применяется при отделочной обработке плоскостей деталей машин и в некоторых случаях вытесняет строгание, фрезерование и шабрение. Плоское шлифование периферией круга применяется главным образом при обработке точных поверхностей. В этом случае шлифовальный круг, помимо вращательного движения, осуществляет поперечную и вертикальную подачи, а детали, закрепленные на столе станка, возвращают поступательное при прямоугольном столе, или вращательное движение при круглом столе (фиг. 43, з).

Плоское шлифование торцом круга или сегментами применяется для обдирки и отделки деталей. В этом случае шлифование осуществляется на станках с вертикальным или горизонтальным шпинделем шлифовальными кругами, или сегментами, имеющими широкую поверхность, вследствие чего площадь контакта круга с деталью имеет значительную величину. Вертикальная подача осуществляется кругом, а деталь вместе со столом осуществляет возвратно-поступательное или вращательное движение (фиг. 43, и).

Операции заточки режущего инструмента производятся или на универсальных, или на различных специальных заточных станках, в которых резание осуществляется кругом, а подачи — столом: станка или кругом.

Разрезные и прорезные работы обычно производятся на станках, в которых шлифовальный круг осуществляет и вращательное движение, и движение подачи (фиг. 43, к).

Хонингование является чистовой шлифовальной операцией, применяемой для придания поверхности отверстия детали или наружной поверхности высокой точности и чистоты. При хонинговании абразивный инструмент (хонинговальная головка с укрепленными в ней мелкозернистыми абразивными брусками) осуществляет главное движение резания и движение подачи (фиг. 43, л).

Суперфиниш (фиг. 43, м) является отделочной операцией. При проведении этой операции абразивные бруски, укрепленные в державке, совершают возвратно-поступательное движение с большим

числом колебаний при небольшой амплитуде. Обрабатываемая деталь совершает вращательное и поступательное движение, в зависимости от ее длины и формы.

Характерной особенностью суперфиниша является то, что после снятия гребешков, оставшихся от предыдущей обработки, снятие металла прекращается, независимо от времени дальнейшей работы брусков.

Доводка дисками, шаржированными абразивными порошками и пастами, и абразивными дисками производится для придания обрабатываемым деталям круглой и плоской формы высокой степени точности и чистоты поверхности. Этим способом доводят плоские концевые меры, ролики точных подшипников, калибры и др. Доводка осуществляется на различных станках со специальными наладками (фиг. 43, *н*).

Большое число шлифовальных операций выполняется на различных специальных станках. К числу наиболее распространенных относятся станки для шлифования коленчатых валов, распределительных валиков и много других.

Ленточное шлифование, получающее в последнее время все более широкое распространение, осуществляется на специальных ленточно-шлифовальных станках, режущим инструментом на которых являются бесконечные ленты из шлифовальной шкурки, или специальные шлифовальные ленты. Ленточное шлифование применяется для обработки круглых, плоских и фасонных поверхностей (фиг. 43, *о*).

Кроме этих видов шлифования, к абразивной обработке относятся: полирование войлочными кругами и их заменителями и полирование подаваемой под давлением абразивной жидкостью.

ОБРАЗОВАНИЕ СТРУЖКИ

Процесс снятия стружки при шлифовании происходит путем непрерывного одновременного врезания в шлифуемую деталь нескольких зерен, находящихся в данный момент в месте контакта абразивного инструмента с деталью.

Врезаясь в металл, кромка зерна действует на него сдавливающе, и если сила сжатия превосходит силу сопротивления металла — происходит отделение стружки. Очень много зерен при этом, скользя по металлу, уплотняют его поверхность, в результате чего последующим зернам приходится совершать большую работу для снятия стружки. Каждое зерно при шлифовании срезает стружку переменной толщины, совсем малой при врезании и выходе из контакта и большей в середине процесса врезания, т. е. испытывает переменные напряжения, постепенно возрастающие и затем падающие.

Таким образом, процесс образования стружки сопровождается упругими и пластическими деформациями, в результате которых происходит изменение формы и свойств снимаемого металла и поверхностного слоя. Процесс снятия стружки при шлифовании на большой скорости резания сопровождается большим трением зе-

рен и связки о металл и большим тепловыделением. Эти явления вызывают оплавление части стружек.

В зависимости от режима, характера обрабатываемого и абразивного материалов, углов зерен и степени их остроты происходит резание, царапание или скобление поверхности шлифуемого изделия.

В тех случаях, когда зерна имеют острые кромки, небольшие радиусы закруглений и выгодные углы, происходит резание или царапание металла. При этом получаемая стружка часто имеет такой же вид, как сливная стружка при точении мягкой незакаленной стали с высокой скоростью резания. Такую стружку чаще всего можно наблюдать при шлифовании кругами из монокорунда и карбида кремния. Такое сходство стружки по ее форме подтверждает, что законы резания стальным инструментом в большой степени применимы и для многих процессов шлифования. Если зерна имеют тупые кромки, большие радиусы закругления и невыгодно ориентированы по отношению к обрабатываемой поверхности, то такие зерна производят скобящее действие, причем образование стружки сопровождается в этих случаях резким повышением температуры, и получаемая стружка целиком или частично сгорает; температура образования стружки достигает 1000° и больше. Чем больше радиусы закруглений режущих кромок зерен, тем труднее они врезаются в снимаемый слой металла, тем большее возникает трение, тем сильнее деформации стружки, тем выше температура резания. Чем меньше радиусы закругления зерен, тем меньше может быть толщина снимаемой стружки.

Каждое зерно начинает работу резания с удара режущей кромки о снимаемый слой металла с силой, зависящей от величины подачи.

Сила удара уменьшается за счет того, что в момент удара одних зерен часть других уже снимает стружку, так как величины дуги контакта, как правило, больше чем размеры зерен в поперечнике.

Если сила резания превосходит прочность зерна, или силу его сцепления с другими зернами, то оно обламывается или вырывается из связки. Практически, значительно чаще зерна не вырываются и не обламываются, а только истираются. Особенно это относится к мелкозернистым кругам.

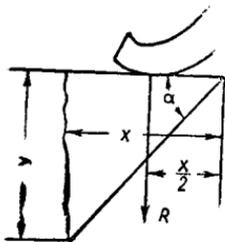
В отличие от точения, при котором резец, непрерывно снимая стружку, в течение всего прохода находится под воздействием сил резания, при шлифовании каждое режущее зерно в течение одного оборота круга находится в работе, время, измеряемое десяти-тысячными и даже стотысячными долями секунды; это время, равно $T = \frac{l}{1000v_k}$, где l — длина дуги соприкосновения круга с изде-

лием. Таким образом, каждое зерно работает с перерывом, в $\frac{\pi D}{l}$ раз превосходящим время его работы. Эти перерывы благоприятно отражаются на работе и стойкости абразивного инструмента.

Чем больше это отношение, т. е. чем больше диаметр круга и чем меньше дуга соприкосновения, тем легче условия работы зерна.

Величина усадки стружки также зависит от радиуса закругления и угла резания зерен. Чем они больше, тем большую деформацию испытывает снимаемая стружка, тем больше ее усадка.

В процессе шлифования часть стружки сгорает, часть вылетает из зоны шлифования и часть застревает на зернах и между зернами в порах круга.



Фиг. 45. Схема давления на зерно.

Увеличение отношения $\frac{\pi D}{l}$ способствует лучшему удалению стружки и охлаждению круга.

Вследствие быстрой смены усилий зерна круга испытывают большие и быстро меняющиеся напряжения.

Отсюда возникает вопрос: какие соотношения должны существовать между давлением шлифования и строением круга.

Немецкий специалист Круг определяет это соотношение так.

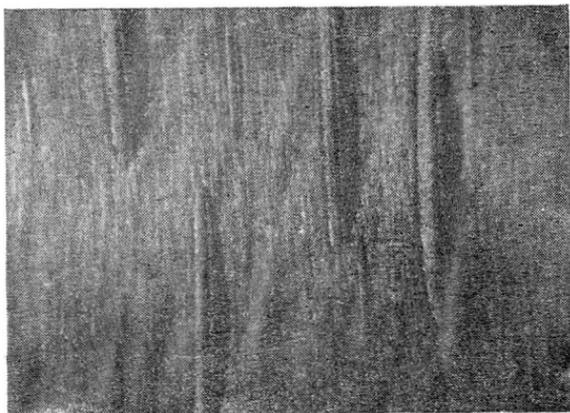
Зерно шириной l и длиной x подвергается при равномерно распределенном давлении в P кг на единицу поверхности давлению резания величиной $R = 1 xP$ кг, приложенному на расстоянии $\frac{x}{2}$ от острия зерна (фиг. 45).

На работающем на изгиб сечении высотой в y , уравнение изгиба при угле резания α дает отношение: $\text{tg } \alpha = 1,732 \sqrt{\frac{P}{K}}$, где K — прочность зерна на изгиб. Следовательно, угол зерна определяется отношением $\frac{P}{K}$. Он увеличивается в тем большей степени, чем в большее количество раз удельное давление на грани P превышает прочность на изгиб. Удельное же давление зависит непосредственно от характера материала. По мере увеличения давления на грань зерна, например при шлифовании литой стали, должен увеличиваться угол зерна. Даже при материале меньшей прочности удельное давление может увеличиваться, если давление резания вблизи острия зерна распределяется на небольшой площади и тем самым может возникнуть опасность разрушения режущей кромки и отламывания при слишком остром угле зерна.

ТОЛЩИНА, ШИРИНА И ДЛИНА СТРУЖКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Толщина стружек, снимаемых зернами абразивного инструмента в процессе шлифования, зависит не только от поперечной подачи, но и от других параметров режима шлифования, а также от характеристики и диаметра абразивного инструмента, диаметра обрабатываемой детали, метода и режима правки и вида правящего инструмента.

Так как на поверхности абразивного инструмента находятся зерна разной величины, в пределах одного номера зернистости, и расположены они на разной высоте, то уже поэтому толщина стружки при шлифовании при совершенно одинаковых прочих условиях является величиной переменной. Толщина стружки в процессе шлифования сильно меняется и потому, что после каждого прохода на шлифуемой поверхности остаются гребешки. Вследствие беспорядочного расположения режущих зерен шаг выступов и впадин этих гребешков непостоянен и при каждом последующем проходе зерна круга, попадая то на места впадин, то на места выступов, снимают



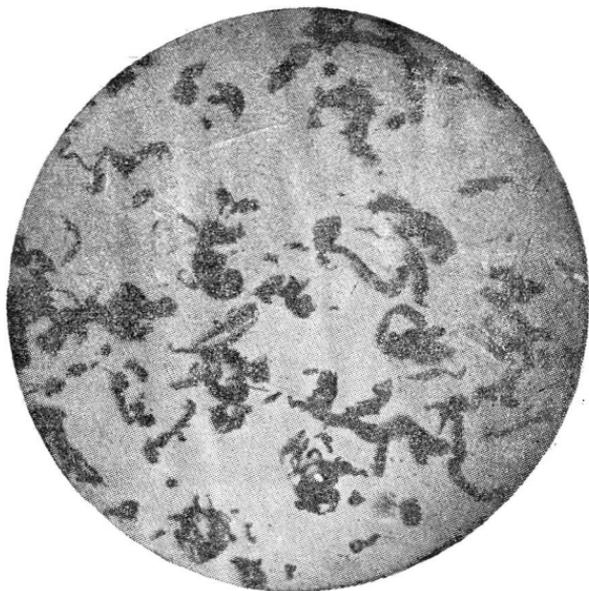
Фиг. 46. След от стружки, снятой одним зерном.

стружку разной толщины, величина которой иногда превосходит величину поперечной подачи. Вообще же, как правило, толщина стружки h меньше величины поперечной подачи t . Такое положение объясняется упругим отжатием системы: станок — деталь — абразивный инструмент, происходящим при нарушении равновесия в системе, которое может быть вызвано, как мы увидим ниже, рядом причин. В связи с этим, утверждения некоторых авторов, что фактическая глубина резания, а следовательно, и толщина стружки за счет снятия ее с гребешков получается в несколько раз больше, чем номинальная поперечная подача, нельзя считать правильными.

Ширина стружки зависит от профиля врезающейся в металл части зерна, толщины стружки и ее деформации и от профиля обрабатываемой поверхности. Так как все эти параметры переменные даже при одних и тех же условиях шлифования, то и ширина стружки является переменной величиной. Общим для всех стружек является то, что ширина их, как правило, в 10—20 раз больше, чем их толщина, и меньше наибольших поперечных размеров абразивных зерен. Это объясняется тем, что шлифование обычно производится с поперечными подачами, во много раз меньшими величины зерен. Таким образом, и сечение стружки является ве-

личной переменной. Отсюда можно сделать вывод, что шлифованная поверхность после каждого прохода имеет свой профиль, отличный по расположению и глубине впадин и выступов от профиля, полученного при других проходах.

Рассмотрение значительного числа стружек и их следов (фиг. 46 и 47) также позволяет сделать вывод, что они имеют весьма разнообразные профили в сечении: клина, треугольника с большим основанием и малой высотой, трапеции, запятой. Часть стружек сплавляется и имеет вид шариков и т. п.



Фиг. 47. Стружки, снимаемые при шлифовании.

Длина стружки зависит от ее толщины, соотношения скоростей круга и детали, от вида шлифования и шлифуемой поверхности, т. е. от степени ее неровности и расположения выступов и впадин. Длина стружки, снимаемая зернами одного и того же круга, так же как толщина и ширина, различна по своей величине и помимо указанных выше факторов зависит от расположения зерен в круге и от места их встречи с деталью.

Несмотря на такое различие снимаемых одним и тем же кругом стружек по их сечению и размерам, их образование подчиняется общему закону и оказывает большое влияние на ход и успешность процесса шлифования.

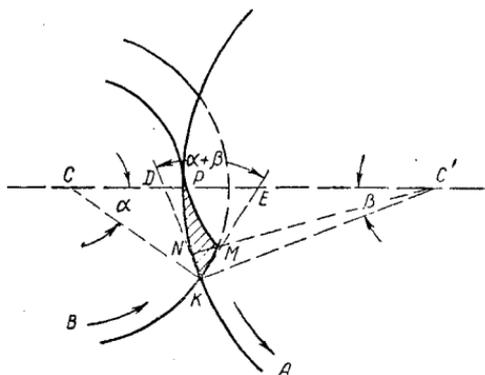
ТОЛЩИНА СТРУЖКИ

Зависимость удельного напряжения режущих зерен шлифовального круга от толщины стружки настолько велика, что в настоящее время принято считать, что толщина стружки оказывает преобладающее влияние на процесс шлифования.

Изменение толщины стружки сказывается на производительности и условиях работы круга, на его самозатачиваемости и стойкости, на износе и частоте правки, на силах резания и качестве отшлифованной поверхности и т. д.

В главе «Абразивные инструменты» было указано, что шлифовальный круг по своей работе может быть сравнен с фрезой, хотя он и отличается от фрезы прерывистостью режущей кромки, беспорядочным расположением зерен, их формой и геометрией и т. п. Поэтому на процесс образования стружки при шлифовании, строго говоря, нельзя распространять схему образования стружки при фрезеровании. Несмотря на это, почти во всех книгах по резанию металлов и по шлифованию при рассмотрении вопроса образования стружки пренебрегали этими отличиями процесса шлифования, что справедливо отмечено канд. техн. наук Брозголь И. М.

При определении толщины стружки по схеме фрезерования некоторые исследователи (Ольден, Дженкс, Чампен, Гест, Гофман, Круг, Слепак, Баранец и др.) и в том числе автор, исходили из следующего представления: в процессе круглого наружного шлифования зерна круга врезаются в обрабатываемую деталь и снимают стружку, имеющую вид, показанный на фиг. 48.



Фиг. 48. Схема процесса круглого наружного шлифования.

Обозначим: шлифовальный круг A , деталь B , толщину стружки h , дугу контакта круга с деталью l , число режущих зерен на единице длины дуги круга i_p угол PCK через α и угол $PC'K$ через β .

Представим себе, что в течение некоторого промежутка времени t процесса шлифования методом врезания зерно, находящееся в точке P , переместится в точку K . За это же время деталь, вследствие ее вращения с меньшей скоростью, пройдет меньший путь KM , в результате чего зерно снимет стружку PKM . Расстояние MN представляет собой максимальную толщину стружки, снимаемую воображаемым отдельным зерном. Так как в действительности на расстоянии PK находится i_p зерен, то каждое зерно снимает толщину $\frac{MN}{i_p}$.

Из рассмотрения двух прямоугольных треугольников SKE и $S'KD$ находим, что $\angle DKE = \alpha + \beta$.

Из рассмотрения треугольника KMN , находим, что

$$MN = KM \sin(\alpha + \beta),$$

но KM равно пути детали за время t , т. е. $KM = v_d t$. В действительности на протяжении дуги контакта круга с деталью $PK =$

$= l = v_{\kappa} t$ имеется не одно зерно, а некоторое число $i_p = l$. Так как $t = \frac{l}{v_{\kappa}}$, то

$$h = \frac{v_{\partial} l}{v_{\kappa} i_p l} \sin(\alpha + \beta) = \frac{v_{\partial}}{v_{\kappa} i_p} \sin(\alpha + \beta). \quad (1)$$

Из тех же треугольников легко установить, что $\sin(\alpha + \beta) = 2\sqrt{t_{\phi}} \sqrt{\frac{D+d}{Dd}}$, где t_{ϕ} — фактическая глубина резания.

Подставляя значение $\sin(\alpha + \beta)$ в формулу (1), получим, что толщина стружки

$$h = \frac{2v_{\partial}}{v_{\kappa} i_p} \sqrt{t_{\phi}} \sqrt{\frac{D+d}{Dd}}. \quad (2)$$

Д-р техн. наук Е. Н. Маслов, рассматривая вопрос о толщине стружки, учел прерывистость режущей кромки и влияние ширины круга и дополнил формулу (2) при шлифовании способом врезания тем, что ввел в знаменатель слагаемое $2v_{\partial}$, весьма мало изменяющее, однако, результат при исчислении толщины стружки. Для случая круглого наружного шлифования с продольной подачей он совершенно правильно дополнил эту формулу отношением $\frac{s}{B}$, где s — продольная подачи и B — ширина круга.

Формула Ольдена-Дженкса, как и все формулы других исследователей, фактически не учитывает влияния отжима системы станок — круг — деталь на толщину стружки.

Канд. техн. наук И. М. Брозголь, исходя из другой схемы образования стружки, показанной на фиг. 49, считает, что максимальная толщина стружки равна

Фиг. 49. Схема образования стружки.

глубине врезания зерна круга в деталь $h = t_{\phi}$.

Фактически при одном и том же режиме шлифования, в зависимости от разной высоты расположения зерен на режущей поверхности и величины упругого отжатия системы, толщина стружек, снимаемых даже только в течение одного их контакта с деталью, будет резко различной и лежит в пределах $h = t_{\phi} = t - c \pm x$, где c — величина отжатия, всегда направленная в сторону уменьшения глубины резания; t — поперечная подача; x — некоторая часть выступа (+) или впадины (—), оставшаяся неснятой при предыдущем проходе зерна. В тех случаях, когда $x = c$, глубина врезания равна поперечной подаче. Когда x имеет знак минус, т. е. зерно попадает во впадину, t_{ϕ} меньше t и наоборот. Величина x может

быть и больше t . Таким образом, толщина многих стружек t_{ϕ} , снимаемых при шлифовании, превосходит t до 2 раз и даже несколько больше, но не в 15—30 раз, как ошибочно указывается в книге «Основы теории шлифования металлов» Е. Н. Маслова. Величина s в процессе шлифования все время меняется. В период врезания она растет, в период выхаживания она уменьшается, в период установившегося резания она остается относительно постоянной.

Для разных видов шлифования и типов станков величина s имеет различные значения. Так, для случаев круглого наружного шлифования она, как показали опыты канд. техн. наук В. А. Шальнова, достигает 0,4—0,6 t , а для плоскошлифовальных станков, работающих периферией круга, 0,2—0,3 t , т. е. отжим происходит главным образом за счет передней и задней бабок круглошлифовального станка.

Подсчет толщины стружки для реальных случаев шлифования по формулам Олдена-Дженкса, Маслова и других авторов, принявших эту схему образования стружки, дает очень малые ее значения (доли микрона), отличные от фактической толщины стружки, которую можно собрать в процессе шлифования и которая измеряется сотыми и десятными долями миллиметра.

Однако это не говорит о том, что при шлифовании совсем не получается стружек, имеющих такую толщину. По нашему мнению, часть зерен, вершины которых расположены на расстоянии от поверхности круга, почти равной h , срезают тонкие стружки (меньше 1 $\mu\text{к}$), которые в силу этого сгорают в виде искр и потому не могут быть собраны.

Таким образом, существующие формулы не позволяют точно определить толщину стружки. Однако нам представляется, что вывод этих формул все же полезен, так как они дают некоторое общее представление о влиянии основных факторов, составляющих режим шлифования, диаметров круга и детали на толщину стружки, а следовательно и на весь процесс шлифования.

Фактически одна сторона стружки (срезаемая данным зерном) менее выпуклая (почти плоская), чем другая. За время контакта зерна круга с деталью она пройдет расстояние во столько раз меньше, во сколько раз скорость детали меньше скорости круга, т. е. в $\frac{v_d}{60v_k}$ раз. При нескоростных режимах шлифования это отношение обычно колеблется в больших пределах 1:40—1:100. Так как длина контакта сама по себе является очень малой величиной, то расстояние, которое пройдет деталь за время ее контакта с одним (данным) зерном — Δl , будет совсем малой величиной. Совсем малой величиной будет и Δh , на которую увеличивается, за счет скорости детали, максимальная толщина стружки. Однако нельзя делать вывод о том, что скорость детали не влияет на толщину и длину стружки. Правильнее сказать, что хотя скорость детали оказывает незначительное влияние на изменение размеров стружки, однако так как при шлифовании снимается громадное число стружек, она сказывается на производительности процесса.

С повышением скорости детали сила резания обычно увеличивается, чем и объясняется повышение производительности. Это положение находит подтверждение и в практике, особенно, как мы увидим далее, при скоростном шлифовании.

Минимальная толщина стружки, которая может быть снята при шлифовании, не зависит, как при точении, от величины радиуса притупления. Она может быть меньше, чем величина радиуса зерна, за счет применения при шлифовании высоких скоростей резания и возникающих при этом упругих деформаций.

ДЛИНА СТРУЖКИ

Длина стружки, снимаемой при шлифовании одним зерном круга, равна пути зерна, которое оно совершает при соприкосновении с деталью.

Этот путь различен и зависит от многих факторов.

Дуга контакта зерна круга с деталью может быть полной, равной MN , и неполной, равной $NL = LM$ (фиг. 49), в зависимости от значений величин x .

В случае круглого наружного врезного шлифования, т. е. когда продольная подача отсутствует, длина стружки будет равна приблизительно длине дуги контакта круга с деталью плюс длина дуги от поворота детали Δl за время соприкосновения ее с одним (данным) зерном круга, причем l_n будет лежать в пределах

$$l_n = D \left(1 \pm \frac{v_{\partial}}{60v_k} \right) \alpha \div l_n = R \left(1 \pm \frac{v_{\partial}}{60v_k} \right) \alpha.$$

Пренебрегая величиной $\frac{v_{\partial}}{60v_k}$, как весьма малой, будем иметь, что l_n лежит в пределах

$$D\alpha \div R\alpha. \quad (3)$$

Из рассмотрения треугольников OPM и CPM находим.

$$R^2 = (R - h_2)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2$$

и

$$r^2 = (r - h_1)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2,$$

где

$$\frac{b}{2} = NP = PM, \quad R = OL \quad \text{и} \quad r = CK;$$

отсюда

$$\frac{b^2}{4} = h_2(2R - h_2) = h_1(2r - h_1).$$

Приравнивая величины $2R - h_2$ и $2r - h_1$ соответственно равным $2R$ и $2r$, так как доли толщины стружки h_1 и h_2 чрезвычайно малы по сравнению с диаметрами круга и детали, получаем

$$\frac{b^2}{4} = 2Rh_2 = 2rh_1,$$

отсюда

$$h_2 = \frac{b^2}{4D} \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{b^2}{4d},$$

и следовательно

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{d}{D},$$

и отсюда

$$h_2 = h_1 \frac{d}{D} = (t_\phi - h_2) \frac{d}{D}.$$

Решая относительно h_2 , получаем

$$h_2 = \frac{dt_\phi}{D + d}. \quad (4)$$

Угол α вследствие его малой величины можно считать равным $\sin \alpha$, тогда

$$\alpha = \sin \alpha = \sqrt{1 - \cos \alpha} = \sqrt{1 - \frac{R - h_2}{R}} = \sqrt{\frac{2h_2}{R} - \frac{h_2^2}{R^2}},$$

или, пренебрегая величиной $\frac{h_2^2}{R^2}$, как очень малой, получаем

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{h_2}{D}}. \quad (5)$$

Подставляя вместо h_2 ее значение из формулы (4), получаем

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{dt_\phi}{D(D+d)}} = 2\sqrt{t_\phi} \cdot \sqrt{\frac{d}{D(D+d)}}. \quad (6)$$

Подставляя эти значения α в формулы длины стружки, получаем, что величина l_n будет лежать в пределах

$$l_n = 2D\sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{d}{D(D+d)}} = 2\sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{Dd}{D+d}} \quad (7)$$

и

$$l_n = 2R\sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{d}{D(D+d)}} = \sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{Dd}{D+d}}. \quad (8)$$

Таким образом, при круглом наружном шлифовании длина стружки становится больше с увеличением: диаметров круга и изделия, величины фактической глубины резания, отношения скорости детали к скорости круга.

При внутреннем шлифовании дуга контакта между зернами круга и детали будет больше, чем при наружном шлифовании, при-

чем формулы для длины стружки будут отличаться от (7) и (8) только знаком минус в знаменателе, так как $d > D$, а именно

$$l_s = 2\sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{Dd}{d-D}} \quad (9)$$

и

$$l_s = \sqrt{t_\phi} \sqrt{\frac{Dd}{D-d}} \quad (10)$$

При плоском шлифовании периферией круга, когда $\alpha = \infty$ l_n будет лежать в пределах

$$l_n = 2\sqrt{Dt_\phi} \quad (11)$$

и

$$l_n = \sqrt{Dt_\phi} \quad (12)$$

Следовательно, длина стружки при этом виде шлифования возрастает пропорционально корню квадратному из диаметра круга и фактической глубины резания. Она также увеличивается, но на очень незначительную величину при увеличении соотношения скорости продольной подачи детали к скорости круга.

При плоском торцовом шлифовании дуга контакта каждого зерна круга (сегмента, бруска) с деталью во много раз больше, чем при другом любом виде шлифования и зависит от диаметра круга, ширины или диаметра шлифуемой детали и соотношения скорости детали и скорости круга.

Максимальная длина стружки может быть выражена:

$$l_T = \frac{\pi D \alpha}{360^\circ} \pm \frac{v_d}{60 v_k} \quad (13)$$

Чем больше α , тем длиннее стружка, тем хуже условия удаления ее из зоны резания, тем более открытой должна быть структура круга. Именно этими обстоятельствами объясняется применение при торцовом плоском шлифовании круга более открытых структур и составных кругов из сегментов. Расстояния между сегментами, уменьшая поверхность контакта абразивного инструмента, одновременно облегчают условия выхода стружки и условия всего процесса шлифования.

Угол α тем больше, чем больше ширина или диаметр шлифуемой детали. Отсюда длина стружки тем больше, чем шире шлифуемая поверхность. Из формулы (13) также видно, что длина стружки при торцовом плоском шлифовании прямо пропорциональна диаметру круга. Таким образом, чем больше диаметр круга, тем больше должна быть производительность процесса шлифования. С увеличением отношения скорости движения детали к скорости круга длина стружки также увеличивается, однако настолько мало, что ею можно пренебречь. С увеличением скорости круга длина стружки, наоборот, несколько уменьшается.

ГЛАВА VI

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИКИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Успех процессов шлифования, заточки, доводки и полирования, как сказано выше, зависит от весьма многих факторов, в числе которых первенствующее значение имеет правильный выбор требуемой для данных условий работы характеристики абразивного инструмента.

Выбор нужной характеристики абразивного инструмента определяется:

а) характером операции абразивной обработки и размерами абразивного инструмента;

б) типом, мощностью и состоянием станка, на котором она будет производиться;

в) формой, размерами и физико-механическими свойствами материала детали, подлежащей обработке;

г) требуемой степенью точности, чистоты и качества поверхности детали;

д) количеством подвергаемых обработке деталей (массовая, серийная, штучная обработка) и степенью автоматизации;

е) величиной припуска и отсюда подразделением операций на предварительную, получистую, чистовую и т. д.;

ж) режимом обработки, т. е. интенсивностью шлифования;

з) видом, количеством и методом подачи охлаждающей жидкости.

От правильного выбора характеристики абразивного инструмента в значительной мере зависит не только производительность шлифования, расход абразивного инструмента и экономика всего процесса, но и качество шлифуемых деталей, поэтому мы остановимся подробнее на вопросах его выбора.

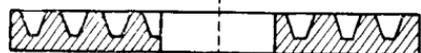
Следует помнить, что операции абразивной обработки являются последними операциями в механической обработке деталей. Поэтому брак на этих операциях особенно недопустим. Он влечет за собой высокие потери, включающие в себя не только стоимость материала, но и стоимость всех предыдущих операций.

Особое внимание при выборе характеристик абразивного инструмента надо обращать на его твердость, так как от правильности назначения твердости особенно зависит успешность работы.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ОПЕРАЦИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Характер операции абразивной обработки определяется видом шлифования. При «силовом» шлифовании, т. е. когда работа производится с большими подачами, например при работе на подвесных и других обдирочных станках, должны применяться крупнозернистые (зернистостью 12—24) и твердые шлифовальные круги СТ-ВТ на керамической или бакелитовой связках.

При шлифовании с большим контактом между абразивным инструментом и шлифуемой деталью, например при торцовом плоском шлифовании, должны применяться абразивные инструменты с максимально открытой структурой. Чем больше этот контакт, т. е. чем больше одновременно шлифуемая площадь детали, тем более открытая структура должна быть у абразивного инструмента. Так



Фиг. 50. Круг с искусственными порами (отверстиями).

как в ряде случаев шлифования даже самые открытые структуры абразивных инструментов не обеспечивают необходимого отвода сошлифованной стружки и вызывают прижоги на обрабатываемых деталях и «засаливание»

абразивных инструментов, то в таких случаях применяют шлифование сегментами или высокопористыми кругами с искусственными, полученными методами формования, порами (фиг. 50).

Для плоского торцового и внутреннего шлифования применяют также высокопористые круги, в которых поры образованы за счет выгорающего при их термической обработке наполнителя (в кругах на керамической связке), или применения таких наполнителей, которые при термической обработке улетучиваются из тела абразивного инструмента (в кругах на бакелитовой связке). Иногда в этих случаях применяют также наполнители, которые плохо сцепляются с бакелитовой связкой и при шлифовании выпадают из тела абразивного инструмента, создавая таким путем дополнительные поры.

При внутреннем и особенно при плоском торцовом шлифовании применяют более мягкие абразивные инструменты, на 1—2 степени, чем при шлифовании таких же материалов и деталей при круглом наружном центровом и бесцентровом шлифовании, конечно, если прочие условия не отличаются резко от сравниваемых. Бывают случаи, когда при этих видах шлифования выбираются более твердые круги, чем при круглом наружном шлифовании. Так, например, при внутреннем шлифовании лерок применяют более твердые круги, чем при шлифовании отверстий деталей из такого же металла, но большего диаметра, и чем при наружном шлифовании деталей большего диаметра. Это объясняется тем, что при шлифовании отверстий очень малых диаметров скорость шлифования мала (5—10 м/сек), вследствие чего более мягкие круги быстро изнашиваются.

При врезном шлифовании применяемые абразивные инструменты также должны быть несколько мягче. Отрезные и прорезные

работы должны производиться с применением крупнозернистых кругов с открытой структурой, так как при этом виде шлифования условия удаления стружки, так же как и при торцовом шлифовании, весьма неблагоприятны.

Одновременное шлифование двух сопряженных поверхностей, как например, шлифование резьбы, шлифование шеек коленчатых валов и другие, требует применения кругов, способных более длительное время держать свой профиль. Чем меньше шаг шлифуемой резьбы, тем мельче, в связи с этим, должна быть зернистость и выше степень твердости шлифовального круга. Вообще шлифование сопряженных под каким-либо углом поверхностей требует применения относительно более твердых, или с более плотной структурой кругов.

При доводочных операциях, например при доводке режущих инструментов, колец и роликов подшипников, следует применять мелкозернистые круги на бакелитовой или вулканитовой связке.

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ И СОСТОЯНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Тип, мощность и состояние станка определяют возможность выбора оптимального режима шлифования и таким образом косвенно влияют на выбор характеристики круга.

От типа и мощности станка также зависит выбор формы и размеров круга. Мощные станки позволяют применять круги больших диаметров, чем маломощные, что, как мы знаем, в значительной мере определяет их производительность.

Мощный и находящийся в хорошем состоянии станок обеспечивает более спокойную с меньшими вибрациями работу, вследствие чего позволяет применять при обработке одинаковых деталей более высокие режимы шлифования и более твердые круги, чем на маломощном станке, что в свою очередь обеспечивает более высокую производительность и чистоту шлифования.

Станки с ручными подачами не обеспечивают равномерного использования мощности станка в каждый момент его работы. Ручные подачи создают неравномерность нагрузки станка и неравномерный износ круга, вследствие чего возникает опасность нарушения механической прочности и разрыва круга. Поэтому при ручных подачах скорость круга ограничивается до 25 м/сек.

Станки с механическими и особенно с автоматическими подачами позволяют обеспечить более равномерную нагрузку на круг.

При тяжелых массивных станках можно применять более крупнозернистые круги, чем при легких станках.

Мощные станки, как правило, имеют большую жесткость и лучше будут противостоять отжимающим силам, т. е. у мощных станков отношение $\frac{t_{\phi}}{t}$ будет больше приближаться к единице.

Шлифовальные станки, встроенные в автоматические линии, должны быть более жесткими для тех же режимов работы, что и на отдельно работающих станках, для того, чтобы обеспечить

равномерную работу и износ круга. Вместе с тем шлифовальные круги, работающие на таких станках, должны иметь более равномерную твердость, чем обычные, для обеспечения необходимой стабильной их стойкости.

Недостаточная жесткость таких станков и неравномерность твердости кругов, как показывает практика, приводят к невозможности сохранить заданный темп работы автоматической линии. Поэтому шлифовальные круги, предназначенные к работе на автоматических линиях, должны изготавливаться по ужесточенным техническим условиям.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ

Процессам шлифования подвергаются детали из самых разнообразных материалов, имеющих различные физико-механические свойства.

Как выше было сказано, между материалом детали и материалом абразивного инструмента существует определенная зависимость, а именно: электрокорунд применяется для производства абразивных инструментов, предназначенных для обработки металлов и материалов с высоким сопротивлением разрыву (стали, железа, ковкого чугуна, марганцовистой бронзы, латуни, стеллитов, никеля и пр.), и карбид кремния для обработки металлов и материалов, обладающих низким сопротивлением разрыву, и вязких (твердых сплавов, чугуна, жаропрочных сталей и сплавов, меди, алюминия и его сплавов, цинка, олова, гранита, мрамора, кости, кожи, стекла, резины, керамических изделий, угля и пр.). Такие свойства абразивных материалов вполне понятны, так как карбид кремния значительно более хрупок, чем электрокорунд, и обладает более острыми зернами. Чугун и прочие металлы, обрабатываемые карбидом кремния, имеют почти вдвое меньшее удельное сопротивление резанию, чем стали, и поэтому круги из карбида кремния обрабатывают их лучше, чем круги из электрокорунда, зерна которого более вязки и лучше сопротивляются давлению снимаемой стружки. Опыт показал, что чем больше в стали содержание углерода, тем лучше она обрабатывается электрокорундовыми кругами, тем меньше мощности расходуется на шлифование.

Обычные углеродистые стали шлифуются лучше, чем легированные конструкционные и инструментальные стали. Таким образом обрабатываемость сталей зависит и от их химического состава. Исследования, проведенные д-ром техн. наук Н. И. Волским, показали, что стали ЭУ8А и Р9 хотя и имеют почти одинаковые механические свойства, однако резко отличаются по обрабатываемости, а именно сталь Р9 в 2,5 раза хуже шлифуется, чем ЭУ8А. Наличие в стали Р9 карбида хрома, ванадия и вольфрама сильно ухудшает ее шлифуемость.

Присадки легирующих элементов вызывают в сталях образование карбидных соединений, вследствие чего они получают повышенную твердость и температуру плавления, что ухудшает про-

цесс шлифования, вызывает повышенную затупляемость абразивных зерен и требует больших затрат энергии. Особенно плохо обрабатываются стали, имеющие присадки кремния и алюминия. Карбиды вольфрама, молибдена, ванадия и другие имеют высокую твердость, чем и объясняется худшая обрабатываемость содержащих их сталей и повышенный расход кругов. Также плохо шлифуются стали, сочетающие в себе высокую прочность и вязкость. В частности, плохо шлифуются такие специальные стали, как марок 12ХН2А, 18ХНВА, 45ХНМФА, сталь Гатфильда, ЭЯ1Т, ЭИ69 и другие жаропрочные сплавы. Вообще, стали аустенитовой структуры шлифуются хуже, чем стали, имеющие мартенсито-трооститовую структуру, и еще хуже, чем перлитные и сорбитовые стали.

При шлифовании легированных сталей повышается опасность прижогов и образования трещин. Поэтому при шлифовании этих сталей следует применять круги с возможно более открытой структурой, обильное охлаждение и специальные добавки в охлаждающую жидкость, о чем будет сказано ниже.

Шлифование жаропрочных сплавов, например титановых сплавов, лучше вести кругами из карбида кремния зеленого. При применении этих кругов удается повысить удельную производительность до 10—12, против 25—30 у конструкционных сталей.

Магнитные сплавы, содержащие Al_2O_3 , также плохо шлифуются. Их рекомендуется шлифовать крупнозернистыми среднетвердыми (СТ1—СТ3) кругами.

Чугуны имеют большее содержание углерода, поэтому может возникнуть вопрос, почему же их не следует шлифовать электрокорундовыми кругами. Чугуны содержат большое количество кремния, влияние которого сказывается сильнее, чем влияние углерода, поэтому они шлифуются лучше кругами из карбида кремния. Двухкарбидные твердые сплавы лучше шлифуются кругами из зеленого карбида кремния и однокарбидные лучше кругами из черного карбида кремния.

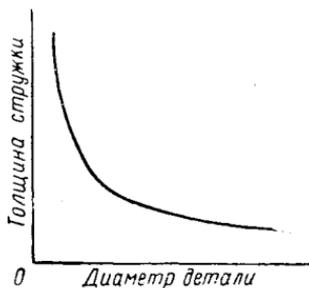
Таким образом, обрабатываемость материалов в сильной степени зависит от их свойств. Опыты, проведенные для определения обрабатываемости различных сплавов и сталей, показали, что при одной и той же твердости и одинаковых условиях шлифования они обрабатываются по-разному.

Под показателем обрабатываемости или коэффициентом шлифуемости понимают отношение съема металла в объемных единицах к износу круга в этих же единицах, что и определяет удельную производительность шлифования. Для разных материалов она колеблется весьма в больших пределах. Так, по данным американской фирмы Нортон К° обычные углеродистые стали имеют показатель обрабатываемости кругами из белого электрокорунда и монокорунда свыше 40, быстрорежущие стали на вольфрамовой основе от 15,0 до 12,0, а жаропрочные сплавы на титановой основе и молибденовые стали от 0,5 до 5 и редко больше.

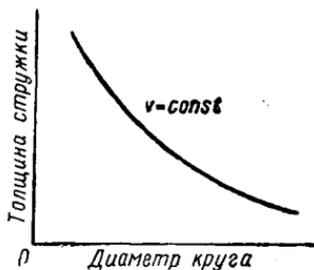
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ДЕТАЛИ И КРУГА

Шлифование деталей, изготовленных из одного и того же материала, но сильно отличающихся диаметром, требует применения кругов разной твердости.

Закон влияния диаметра детали на толщину стружки выражается кривой, имеющей гиперболический характер (фиг. 51). Из рассмотрения этой кривой легко заметить, что при шлифовании деталей больших диаметров толщина стружки увеличивается незаметно. В пределах малых диаметров деталей, наоборот, колебания в диаметре детали сильно влияют на изменение толщины стружки, а следовательно, на износ круга и режим обработки.



Фиг. 51. Влияние диаметра детали на толщину стружки.



Фиг. 52. Влияние диаметра круга и его скорости при $n = \text{const}$. на толщину стружки.

Исходя из этого условия, на практике для шлифования¹ деталей малых диаметров берут обычно круги значительно большей твердости, чем для деталей больших диаметров и производят шлифование с значительно меньшими подачами и скоростями детали.

При шлифовании отверстий малых диаметров также берут более твердые круги. В этом случае выбор более твердого круга диктуется еще и тем обстоятельством, что приходится применять небольшую скорость круга, так как кругами малого диаметра трудно обеспечить нормальную окружную скорость (нужно давать очень высокое число оборотов).

Детали малых диаметров и большой длины требуют при шлифовании применения лунетов, во избежание получения неточной формы и брака.

Полые детали, во избежание прижогов, требуют при шлифовании применения кругов более мягкой твердости, чем такие же сплошные детали, так как условия для отвода тепла при шлифовании тонкостенных деталей сильно ухудшаются.

Шлифование прерывистых поверхностей требует, наоборот, применения более твердых кругов, так как кромки обрабатываемых деталей действуют как правящие инструменты и при применении мягких кругов они будут быстро изнашиваться. Кроме того, при

шлифовании прерывистых деталей более твердыми кругами меньше опасность прижога.

При шлифовании фасонных профилей разные места шлифовального круга работают с несколько отличными скоростями, вследствие чего круг изнашивается неравномерно, вместе с тем от круга требуется, чтобы он сохранял свою форму неизменной. Эти противоречивые условия заставляют применять при шлифовании фасонных поверхностей более твердые круги, чем при шлифовании цилиндрических деталей при всех прочих равных условиях.

В тех случаях, когда кругу приходится шлифовать одновременно двумя своими торцовыми поверхностями, например при шлифовании зубьев колес, условия охлаждения детали и круга обычно затруднены, и возникает опасность прижога зубьев. В таких случаях следует применять двухслойные круги, т. е. круги, у которых одна половина по толщине делается более мягкой, чем другая, или из другого номера зерна. При этом круг устанавливается так, чтобы более мягкая или крупнозернистая его часть соприкасалась с той стороной шлифуемой детали, которая плохо охлаждается.

При шлифовании тонких деталей, например стальных листов, следует применять мягкие круги с открытой структурой, так как даже применение кругов средней твердости может вызвать прижог.

При шлифовании таких фасонных поверхностей, как резьбы, чем меньше шаг резьбы, тем более следует применять мелкозернистые и более твердые круги.

В процессе шлифования, вследствие износа и главным образом в результате правки, диаметр круга систематически уменьшается, что влечет за собой уменьшение его периферической скорости.

Из графика фиг. 52 видно, что при увеличении диаметра круга толщина стружки уменьшается и поэтому выгодно работать по возможности кругами большого диаметра. Чем шире круг, тем выше его производительность. Исследование бесцентрового шлифования кругами шириной 150, 200 и 800 мм показали, что производительность растет почти прямо пропорционально росту ширины кругов.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ТВЕРДОСТЬЮ КРУГА И УСЛОВИЯМИ ЕГО РАБОТЫ

Твердость круга для каждой работы должна быть подобрана так, чтобы абразивные зерна выламывались из тела круга, или обламывались в момент затупления их режущих кромок, уступая место соседним с ними новым зернам или создавая новые режущие кромки у работающих зерен. При этом связка, соединяющая зерна между собой, должна изнашиваться во время работы круга так, чтобы способствовать своевременному выпадению зерен при

повышении сопротивления резанию сверх того, которое является для данной твердости круга нормальным.

В случаях, когда зерна круга вовремя не выпадают и перестают резать, расход мощности на шлифование повышается, и круг начинает засаливаться. Если и после этого, несмотря на вызванное засаливанием увеличение давления резания, зерна не выкрашиваются и не выламываются, то круг еще больше засаливается и в конечном итоге резание настолько ухудшается, что возникает дробление или ожог поверхности. Это говорит о том, что круг выбран несоответствующей условиям работы твердости и необходимо или изменить условия, или заменить круг.

Из рассмотрения формулы (2) толщины стружки видно, что изменение каждой из величин, входящих в нее, влечет за собой уве-



Фиг. 53. Влияние скорости круга на толщину стружки.



Фиг. 54. Влияние скорости детали на толщину стружки.

личение или уменьшение толщины стружки. Так, увеличение скорости круга при прочих постоянных условиях вызывает уменьшение толщины стружки (фиг. 53) и наоборот. Следовательно, изменяя скорость круга, можно изменять условия его работы. Чем меньше, например, скорость круга, тем реже каждое из его режущих зерен будет встречаться с обрабатываемой деталью и врезаться в нее, тем длительнее будет время встречи, тем толще будет стружка, тем с большей нагрузкой будет работать каждое зерно.

Таким образом, условия работы в этом случае будут тяжелее, чем при большей скорости круга, и, следовательно, условия для выкрашивания и выламывания зерен из круга будут лучше, и круг будет вести себя как более мягкий.

Высказываемое мнение, что с увеличением скорости круга производительность тоже увеличивается, не вполне верное. Количество снятой в единицу времени стружки, т. е. производительность, зависит только от установленных подач. Увеличение скорости круга, при сохранении прочих составляющих режима неизменными, влияет на улучшение чистоты поверхности, состояние поверхностного слоя шлифуемой детали, на уменьшение износа круга и очень мало на производительность. Увеличение скорости круга с одновременным увеличением подач обязательно вызывает повышение производительности.

Увеличение скорости детали сопровождается увеличением толщины стружки (фиг. 54). С ростом толщины стружки растут и усилия, испытываемые каждым зерном, поэтому при большой скорости издელიй круг будет быстрее изнашиваться, т. е. вести себя как более мягкий.

Таким образом, регулированием скорости детали можно влиять на работу круга, на его производительность и износ.

Утверждения отдельных исследователей процесса шлифования о том, что скорость детали не влияет на интенсивность процесса шлифования, нельзя считать правильными. Наши опыты и работы других исследователей говорят о том, что с увеличением скорости детали производительность процесса повышается, хотя и не пропорционально увеличению скорости.

Большое значение придается регулированию скорости детали при разработке конструкций шлифовальных станков.

Многие новые круглошлифовальные станки имеют бесступенчатые приводы скорости детали. Скорости стола станка также имеют большие диапазоны, например от 0,1 до 6 м/мин. Станки для внутреннего шлифования также выпускаются с большим числом ступеней оборотов детали.

Наибольшая производительность достигается при работе с средними скоростями детали, когда соотношение скорости круга и скорости детали выражается как 1 : 50 или 1 : 60, и шлифование ведется среднемягкими кругами.

Если при правильно выбранной скорости круга он все же засаливается, то надо увеличить скорость детали, или взять для данной работы более мягкий круг.

С увеличением поперечной подачи толщина стружки увеличивается, и износ круга возрастает, т. е. круг ведет себя как более мягкий. Таким образом, изменяя величину поперечной подачи, можно также влиять на работу круга.

Увеличение поперечной подачи влечет за собой ухудшение чистоты обработки и вызывает опасность прижогов детали.

Следует отметить, что твердость круга и твердость зерен не являются синонимами. Можно из весьма твердых абразивных материалов изготовить весьма мягкий круг и наоборот. Чем тверже круг, тем дольше при одних и тех же условиях работы абразивные зерна остаются в его теле, тем дольше они работают до полного их затупления. Чем меньше степень твердости круга, тем скорее его зерна выпадают, часто оставаясь еще совсем острыми. Особенно это явление наблюдается у карборундовых кругов.

Руководствуясь этим явлением, многие заводы применяют во всех случаях твердые круги, считая, что такие круги в виду их малого износа наиболее выгодны. Более глубокий анализ показывает, что это не всегда так. Применение твердых кругов часто оказывается невыгодным, так как стойкость их бывает часто ниже, чем у более мягких, правиться они должны чаще, а следовательно, расход их больше, и если при этом производительность их не выше,

а остается одинаковой, то ясно, что экономика говорит не в пользу их применения.

Как показывает опыт, экономически выгоднее применять круги средней твердости. Они хотя и изнашиваются быстрее, но зато имеют большую стойкость и дают более высокую производительность.

Практика шлифования выработала целый ряд правил, которых следует придерживаться при выборе характеристики круга. Эти правила следующие:

1. При обдирочном шлифовании следует выбирать среднетвердые и даже твердые круги.

2. При шлифовании твердых металлов и твердых сплавов следует применять мягкие и среднемягкие круги.

3. При шлифовании вязких металлов и сплавов следует применять круги средней и среднетвердой степени твердости.

4. При выборе характеристики круга следует помнить, что чем мельче зернистость круга, тем он себя ведет как более твердый. Поэтому при применении мелкозернистых кругов следует выбирать более мягкие круги, чем при работе крупнозернистыми кругами.

5. При работе на автоматических станках следует брать более мягкие круги (на одну-две степени), чем при такой же работе на станках с ручными подачами.

6. Чем тяжелее и устойчивее шлифовальный станок, тем спокойнее будет работа круга и тем больше возможность пользоваться мягкими кругами.

7. При применении кругов из монокорунда взамен белого электрокорунда надо выбирать их на одну-две степени тверже.

8. При шлифовании на повышенных скоростях круга (50 м/сек) следует брать круг той же твердости, как и при шлифовании на обычных скоростях (35 м/сек), но не тверже, как утверждают некоторые авторы. Лишь при скоростном врезном шлифовании следует применять круги на одну степень тверже и то в случае применения таких режимов, которые обеспечивают сечение стружки одинаковым с шлифованием на обычной скорости.

9. С увеличением размера зерен в круге при одной и той же степени твердости круг ведет себя, как более мягкий.

10. С увеличением удельного давления степень твердости применяемых абразивных инструментов повышается, например при хонинговании.

11. При применении кругов из белого электрокорунда, вместо нормального, твердость их надо брать на одну степень тверже.

12. Круги на керамической связке одной и той же степени твердости с кругами на бакелитовой связке ведут себя, как более твердые, что следует учитывать при замене. Круги на бакелитовой связке следует брать на одну — три степени тверже, чем керамические.

13. При внутреннем шлифовании обычно выбирают круги средней степени твердости.

14. При плоском шлифовании предпочтительнее применять более мягкие круги. Вообще же чем больше контакт между кругом и деталью, тем мягче должен быть круг. Поэтому при торцовом плоском шлифовании берут более мягкие круги, чем при плоском шлифовании периферией круга.

15. Шлифование тонкостенных деталей требует выбора более мягких кругов.

16. Шлифование прерывистых поверхностей требует применения более твердых кругов.

17. При шлифовании фасонных поверхностей выбирают круги с повышенной твердостью, так как при этом виде шлифования необходимо сохранить требуемый профиль круга.

18. Шлифование всухую требует применения более мягких кругов, чем шлифование с охлаждением.

19. Чем выше режим шлифования, тем более твердый должен быть круг.

20. При заточке режущих инструментов предпочтительно, во избежание прижогов, применять мягкие и среднемягкие круги.

Эти правила, конечно, далеко не являются сколь-либо всеобъемлющими. В каждом отдельном случае необходимо правильно взвесить и оценить все условия шлифования и только после этого выбрать требуемую характеристику и, в частности, твердость круга.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ЗЕРНИСТОСТЬЮ И УСЛОВИЯМИ РАБОТЫ

Выбор зернистости при установлении требуемой характеристики круга зависит главным образом от вида шлифования, величины снимаемого припуска, необходимой точности и чистоты обработки, а также от количества подвергаемых шлифованию деталей.

Для обдирочного шлифования, например, при зачистке чугунового литья и стальных болванок применяют круги зернистостью № 12—16, при обдирочном плоском торцовом шлифовании — круги зернистостью № 24—36, при предварительном круглом наружном, внутреннем бесцентровом и плоском шлифовании — круги зернистостью № 36—46, при окончательном чистовом шлифовании — круги зернистостью № 60—100, для хонингования — бруски зернистостью № 120—M20, при суперфинише — бруски зернистостью M28 и мельче, для заточки — круги зернистостью № 46—80 и для доводки после заточки — круги зернистостью № 120 и мельче.

Применение указанных степеней зернистости при данных видах шлифования относится главным образом к кругам и брускам на керамической связке. При применении абразивных инструментов, изготовленных на других видах связок, их поведение в работе изменяется. Так, например, при применении для хонингования брусков на бакелито-идитоловой связке можно применять с получением тех же результатов по чистоте поверхности бруски, имеющие зернистость № 180—M40 вместо 280—M20, и при этом получать более высокую производительность.

Относительно крупнозернистым кругом можно получить при соответствующих режимах работы так же чисто отделанную поверхность, как и при более мелкозернистых кругах. Крупнозернистыми кругами лучше пользоваться при больших припусках, когда шлифование разделено на операции предварительного и окончательного шлифования, а также в тех случаях, когда шлифование происходит с большим контактом круга с обрабатываемой деталью, как например, при плоском шлифовании. Тогда уменьшается опасность засаливания кругов и прижога деталей.

Вообще чем больший припуск оставлен на предварительное шлифование, тем крупнее может быть выбрана зернистость круга, особенно если шлифованию подвергаются детали из вязких и мягких материалов.

Наиболее распространено применение кругов средней зернистости (46—80), которые, помимо чистой отделки шлифуемой поверхности, обеспечивают высокую производительность по съему металла.

Круги из карбида кремния изнашиваются тем скорее, чем крупнее их зернистость при одинаково производительных режимах шлифования, так как крупные зерна карбида кремния хуже удерживаются связкой, чем мелкие.

Круги зернистостью 100 и мельче следует применять для проведения чистовых операций шлифования и в случаях, когда нужно выдержать кромку круга острой в течение длительного времени. Надо иметь в виду, что при применении мелкозернистых кругов не следует получать такой же съем металла, как при крупнозернистых кругах.

Чем выше требуется чистота поверхности и чем меньше припуск на шлифование, тем мельче может быть выбранная степень зернистости абразивного инструмента.

Чем более открытая структура у выбранного для данной операции шлифования круга, тем меньшее число зерен будет расположено на его рабочей поверхности, т. е. при выборе зернистости круга нельзя забывать о ее связи со структурой.

Чем мельче зерна по своей величине, тем меньшей хрупкостью они обладают, тем меньше их износ. Поэтому в тех случаях, когда нужно, чтобы круг держал длительное время размер, следует применять более мелкозернистые круги. Вместе с тем практика показывает, что наиболее производительными для массового шлифования с чистой поверхностью по 7—8-му классу являются шлифовальные круги зернистостью № 46—80.

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Производительность шлифования, качество шлифуемой поверхности и поверхностного слоя в значительной степени зависят от температурных условий, в которых протекает процесс шлифования. Ожоги, трещины, структурные изменения поверхностного слоя являются результатом высоких температур, возникающих на поверхности шлифуемой детали.

Поэтому изучение теплообразования в этих условиях имеет большое значение.

Процессы шлифования очень близки к процессам трения и износа — тем, что они проходят в условиях сильного тепловыделения от упругих и остаточных деформаций в результате той большой работы, которая совершается абразивными зернами, отделяющимися от шлифуемого металла, благодаря высокой скорости, громадное число стружек при значительных удельных давлениях.

Общее число стружек, снимаемых периферией круга за один проход, равно

$$n = \frac{\pi D H n_k i_p L}{s n_{\partial}},$$

где L — шлифуемая длина в мм;

s — продольная подача детали в мм/об;

n_k и n_{∂} — числа оборотов круга и детали в минуту;

D — диаметр круга, H — его высота;

i_p — число зерен на 1 мм ширины круга S .

Для случая шлифования при $D = 500$ мм, $H = 50$ мм, $n_k = 1400$ об/мин; $n_{\partial} = 140$ об/мин; $L = 500$ мм, $s = 20$ мм/об; $i_p = 3$

$$n = \frac{3,14 \cdot 1400 \cdot 500 \cdot 50 \cdot 3}{140 \cdot 20} = 58\,875\,000 \text{ стружек.}$$

Время, за которое каждое из зерен круга, расположенных в один ряд по ширине на его периферии, снимет стружку, равно

$$t_p = \frac{60}{n_k \pi D i_p} \text{ сек.}$$

Так, для круга диаметром 500 мм зернистостью 60, т. е. при $i_p = 3$, работающего со скоростью 35 м/сек, т. е. при 1400 об/мин,

$$t_p = \frac{60}{500 \cdot 1400 \cdot 3 \cdot 3,14} = 0,0000009 \text{ сек.}$$

В этом кроется одна из трудностей изучения процесса шлифования.

Скорость нагрева $V_t = \frac{T}{t_p}$ град/сек., где T — температура шлифуемой поверхности. При $T = 1000^\circ$, $V_t = 1,11 \cdot 10^9$ град/сек.

При снятии стружки с такой большой скоростью производится деформация (уплотнение) шлифуемой поверхности, сопровождаемая большой работой трения, и возникает очень высокая температура. Так как каждая отделяемая стружка имеет чрезвычайно маленький объем, измеряемый сотыми и тысячными долями кубического миллиметра, а время, за которое выделяемое при шлифовании тепло поглощается стружкой, ничтожно мало, стружка зачастую нагревается до температуры, близкой к температуре плавления стали ($1100\text{—}1200^\circ$), и частично сгорает.

Сгорание стружки происходит за счет интенсивного окисления содержащегося в металле углерода кислородом воздуха. При этом часть стружки распадается на отдельные частицы — искры. Различные примеси, содержащиеся в металле, определяют интенсивность окисления и нагрева стружки и изменяют форму пучка искр, что позволяет таким методом контролировать марку шлифуемого металла. Так, например, при шлифовании углеродистых сталей получаются пучки искр светло-желтого цвета со звездочками, количество которых тем больше, чем больше содержится в стали углерода. При шлифовании быстрорежущей стали получают пучки искр темно-красного цвета с редкими звездочками на концах.

При шлифовании хромоникелевой стали цвет искр желтый с большим числом звездочек, но искрение менее интенсивное.

Имеется ряд специальных сплавов, при шлифовании которых искрения совсем не наблюдается. Такие сплавы очень плохо шлифуются электрокорундовыми кругами и несколько лучше мягкими кругами из карбида кремния. Следует вспомнить, что у большинства металлов теплопроводность с возрастанием температуры ухудшается. Только у алюминия и некоторых жаропрочных сплавов коэффициент теплопроводности с повышением температуры возрастает. При шлифовании с малой скоростью, например 0,5 м/сек (практически совершенно неприменяемой), время отделения стружки увеличивается, и отделяемая стружка не накаляется до красного каления и не сгорает, поэтому при шлифовании с такой скоростью искрообразования не происходит. Таким образом, в повышении температуры главную роль играет скорость резания.

При скорости 1 м/сек при прочих равных условиях шлифования стружка накаляется, и часть ее отделяется в виде искр. В то же время при точении со скоростью 60 м/мин стружка не нагревается до такой температуры, что является результатом большего

объема снимаемой стружки и лучшего, вследствие этого, теплообмена.

Таким образом, вторым фактором, определяющим величину теплообразования и среднюю температуру стружки, является ее масса.

По данным Я. Г. Усачева, при точении в стружку уходит от 60 до 80% тепла, образующегося в процессе резания, причем с повышением скорости этот процент растет. Остальная часть тепла уходит в режущий инструмент (15—20%), обрабатываемую деталь (4—5%) и в окружающую среду (1%).

При шлифовании, т. е. в условиях работы с высокими скоростями (30—50 м/сек), когда основная работа затрачивается на преодоление сил трения, пока еще не установлено, какая доля общей теплоты, возникающей при шлифовании, уходит в стружку, абразивный инструмент, деталь и окружающую среду.

Однако можно предполагать, что при шлифовании в деталь и в окружающую среду уходит тепла больше, а в абразивный инструмент и в стружку меньше, чем при точении.

Теплопроводность λ абразивных инструментов в десятки раз ниже, чем у металла. Так, например: у наиболее ходовых, средней зернистости и средней твердости (46СМ), абразивных инструментов из электрокорунда она равна 1,7 ккал/м·час·град, у таких же инструментов из карбида кремния 3,35 ккал/м·час·град, у конструкционной стали 50 ккал/м·час·град, у чугуна 40 ккал/м·час·град. Поэтому абразивный инструмент нагревается значительно меньше, чем шлифуемая деталь.

Такая низкая теплопроводность абразивных инструментов объясняется наличием в них пор, заполненных воздухом, который, как известно, имеет теплопроводность 0,02 ккал/м·час·град. Поэтому λ падает прямо пропорционально расходу пористости кругов. В зависимости от характеристики кругов и температуры шлифования λ электрокорундовых кругов находится в пределах 0,2—0,3 ккал/м·час·град, λ кругов из карбида кремния находится в пределах 0,3—8,0 ккал/м·час·град.

Теплопроводность аустенитовых сталей хуже, чем мартенситовых, а последних хуже, чем трооститовых.

Жаропрочные сплавы, имеющие малую теплопроводность, так же как аустенитовые стали, плохо шлифуются, и круги имеют низкую удельную производительность.

Отсюда следует вывод, что между теплопроводностью и обрабатываемостью существует зависимость: чем ниже теплопроводность, тем хуже обрабатываемость. Это положение нуждается в дальнейшей проверке.

На температуру поверхности детали оказывают влияние все факторы процесса шлифования: характеристика и размеры абразивного инструмента, режим работы, свойства обрабатываемого материала, размеры шлифуемой детали, охлаждающая жидкость, время шлифования и др. Комплексным фактором теплообразования является трение абразивных зерен и деформация сжатия металла.

С увеличением глубины и времени шлифования температура шлифуемой детали, как показали опыты д-ра техн. наук Е. Н. Маслова, возрастает.

С увеличением скорости шлифовального круга температура поверхности шлифуемой детали уменьшается, о чем свидетельствует опыт скоростного шлифования. Это падение температуры вызвано тем, что с увеличением скоростей резания увеличиваются количество и скорость истечения охлаждающей жидкости. Таким образом, влияние скорости отделения стружки в данном случае локализуется этими факторами.

С увеличением твердости, уменьшением номера структуры и величины абразивных зерен в круге температура возрастает, так как при таких условиях шлифования в единицу времени снимается большее количество стружек, т. е. затрачивается большая работа, а на удаление затупившихся зерен твердого круга также необходимо затрачивать больше усилий.

Увеличение размеров и скорости шлифуемой детали способствует более интенсивному отводу тепла. Детали, имеющие меньшую массу, и особенно тонкие и полые, хуже отводят тепло и по этому поверхности их больше подвергнуты опасности прижога и образованию трещин, а следовательно, и структурным изменениям поверхностного слоя.

Трещины и ожоги могут привести к увеличению хрупкости, к потере ударной вязкости и усталостному разрушению.

Причиной образования прижогов и трещин при шлифовании может явиться неправильная термическая обработка стали. Такие случаи наблюдались при обработке жаропрочных сплавов (ЖИ-6). Внутренние напряжения в термически обработанной стали требуют осторожного ее шлифования. При несоблюдении этого условия возможно возникновение трещин.

Как показывает опыт шлифования, ожоги и трещины возникают главным образом на закаленных стальных деталях, имеющих высокую твердость и прочность, а также на деталях, изготовленных из металлов, имеющих низкую теплопроводность. Так, например, шлифование жаропрочных сплавов, имеющих в отличие от других металлов низкую теплопроводность, происходит в условиях образования высокой температуры и плохого отвода тепла, вследствие чего и возникает опасность появления прижогов и трещин. Шлифование быстрорежущих сталей, имеющих меньшую теплопроводность по сравнению с углеродистыми, требует по этим же причинам большей осторожности и умения.

Ожоги, как правило, сопровождаются понижением твердости и износостойкости поверхностного слоя, т. е. влекут значительное ухудшение качества деталей и потому совершенно недопустимы. При ожогах температура поверхностного слоя бывает настолько высокой, что образуется вторично закаленный слой. Глубина этого слоя обычно не превосходит сотых долей миллиметра и зависит от условий и режима шлифования, характеристики круга и свойств обрабатываемого материала.

Чем больше нагрев поверхности и чем резче происходит ее охлаждение, тем выше напряженность поверхностного слоя, тем больше опасность появления трещин.

Как показали исследования, особенно сильное влияние на глубину измененного поверхностного слоя оказывает скорость детали. Чем она меньше, тем выше опасность прижога и глубина измененного слоя, и наоборот. Поэтому при появлении в процессе шлифования ожогов и трещин прежде всего следует увеличить скорость детали.

Увеличение поперечной подачи, особенно внезапное, что иногда наблюдается при неисправных механизмах подачи, также способствует появлению прижогов и трещин. Увеличение скорости круга снижает глубину деформируемого поверхностного слоя.

Появление прижогов иногда вызывается разновысотностью расположения зерен, особенно в тех случаях, когда эта разновысотность неравномерна, вследствие чего происходит то большой, то малый сьем металла. Опасность прижогов возрастает также с увеличением интенсивности съема металла и уменьшения диаметра шлифуемой детали.

Увеличение степени твердости круга, уменьшение размера зерен и номера структуры помогают образованию прижога и трещин.

Шлифование всухую и недостаточное охлаждение способствуют появлению ожогов.

Весьма чувствительны к нагреву и ожогам, и потому требуют весьма интенсивного охлаждения, стали с высоким содержанием углерода и хрома.

При недостаточном охлаждении трещины возникают даже чаще, чем при шлифовании всухую.

Имеют место случаи образования трещин и вследствие резкого охлаждения детали.

Увеличение ширины круга и продольной подачи вызывает рост теплообразования пропорционально количеству работающих зерен. Поэтому при работе широкими кругами не следует применять те же режимы, что и при шлифовании узкими кругами. При прочих равных условиях в этих случаях круги должны быть мягче.

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В последнее время сухое шлифование все более вытесняется шлифованием с охлаждением. Лишь в работах на обдирочно-подвесных шлифовальных станках, при плоском шлифовании на торце-шлифовальных станках с вертикальным шпинделем, при заточке некоторых режущих инструментов, когда охлаждение мешает наблюдению, при отрезке и в некоторых других случаях применяется сухое шлифование.

Во всех прочих случаях шлифование производится с охлаждением, так как снятие стружки при шлифовании сопровождается большим местным тепловыделением и нагреванием детали, вызы-

вающим высокие температурные местные напряжения, сильным измельчением стружки и забиванием пор круга, значительным пылевыведением, вследствие износа круга, и большим трением зерен круга и связки об обрабатываемый металл.

Применяемые при шлифовании смазочно-охлаждающие жидкости должны обладать хорошими охлаждающими свойствами, позволяющими быстро поглощать тепло и снижать температуру поверхностного слоя детали; должны быть наделены смазочными свойствами для уменьшения трения при резании и снижении износа круга, для сохранения на более длительное время режущей способности круга и получения чистой поверхности изделий; должны способствовать удалению из пор круга стружки и абразивной пыли, удалению налипаний снятого металла с зерен круга и уменьшению его засаливаемости. Охлаждающие жидкости могут также обладать свойствами, повышающими производительность шлифования.

Таким образом, охлаждающие жидкости выполняют не только функции охлаждения, но и другие, чрезвычайно важные для успешного шлифования.

Смазочно-охлаждающие жидкости не должны затруднять наблюдения за работой. Поэтому при чистовом шлифовании применяют обычно прозрачные жидкости, а при черновом — эмульсии.

Применяемые жидкости не должны разъедать и корродировать детали станка и шлифуемые изделия, не должны содержать вредных для здоровья работающих компонентов, не должны быстро портиться, загустевать и содержать выпадающих в виде осадков веществ, не должны загораться под действием искр, а также сильно вспениваться и нагреваться. Чем холоднее жидкость, тем лучше ее охлаждающее действие.

Однако не всегда достаточно для применения жидкости знать, что она обладает низкой температурой. Так, например, неправильное применение для охлаждения углекислоты, создающей очень низкую температуру, вызывает в процессе шлифования большие перепады температур, вследствие чего зерна шлифовального круга больше растрескиваются и выкрашиваются, что влечет за собой ухудшение чистоты отшлифованной поверхности, хотя и уменьшает при этом опасность ее прижога.

Хорошее охлаждение достигается только при подаче определенного количества углекислоты, которое следует устанавливать в каждом отдельном случае проведением соответствующих опытов. При охлаждении углекислотой на поверхности детали оседает твердый налет, имеющий очень низкую температуру (-79°), который, поглощая тепло, образующееся при шлифовании, испаряется. Применение углекислоты в связи с ее высокой стоимостью должно ограничиваться только случаями действительной необходимости.

Обилие смазывающих веществ в жидкости может повлечь за собой закупоривание пор круга и его засаливание, а следовательно, уменьшение стойкости и преждевременную правку круга.

Охлаждающее и смазывающее действие у разных жидкостей различное. Оно тем выше, чем выше ее теплопроводность и теплоемкость. Так, у водного раствора хлористого натрия оно в несколько раз выше, чем у других водных растворов и у масел. Однако применение этого раствора нельзя рекомендовать из-за его корродирующего действия.

Вследствие своей значительной теплоемкости и прозрачности хорошей охлаждающей жидкостью должна бы была быть вода. Однако в чистом виде ее нельзя рекомендовать для охлаждения, так как она плохо смывает абразивную пыль и вызывает коррозию на шлифуемых деталях и частях станка.

Наиболее распространенными жидкостями, служащими для целей охлаждения, являются водные растворы, содержащие небольшое количество кальцинированной соды, мыла и пр.

Так, при круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании стальных деталей применяется 1,5—3%-ный раствор эмульсола, или соды с добавкой мыла. Хорошими охлаждающими жидкостями являются также водные растворы, содержащие 0,8% кальцинированной соды и 0,25% нитрита натрия, или водные растворы с добавкой 0,5—0,8% тринатрийфосфата и 0,25% нитрита натрия. Эти добавки даются для уменьшения поверхностного натяжения воды и тем самым повышения ее охлаждающих свойств. Недостатками этих жидкостей являются их ничтожное смазочное действие, вследствие отсутствия у соды этих свойств, а при применении мыла еще и вспенивание.

Повышение концентрации раствора не улучшает его охлаждающего действия и поэтому не рекомендуется.

При шлифовании кругами на бакелитовой смазке содержание соды в растворе снижается до 0,5—1%, так как более крепкий содовый раствор понижает прочность бакелитовых кругов.

Содовые растворы разрушающе действуют на окраску станков и оставляют белый налет на деталях. Поэтому вместо соды часто применяют триэтаноламин, или тринатрийфосфат, обладающие антикоррозийными свойствами и хорошей смывающей способностью.

В целях повышения стойкости режущей кромки круга и улучшения чистоты шлифуемой поверхности, например при резьбошлифовании, в качестве смазочно-охлаждающей жидкости применяют сульфозфрезол, представляющий собой осерненное масло и обладающий хорошими смазочными свойствами и пониженными, по сравнению с водными растворами, охлаждающими свойствами.

Практика показывает, что применение сульфозфрезола В при резьбошлифовании повышает стойкость круга до 1,5 раза.

Теплопроводность сульфозфрезола в 15 раз меньше, чем воды, вследствие чего шлифуемая деталь нагревается больше, чем при охлаждении водными растворами. При добавке в сульфозфрезол 10%-ного дизельного топлива нагревание значительно уменьшается. При применении такой смеси для охлаждения при шлифовании жаропрочных сплавов типа ЭИ437 износ круга резко уменьшается и удельная производительность возрастает до 20—35.

Смазочное действие жидкости проявляется в том, что на шлифуемой поверхности металла и абразивных зерен образуется пленка этой жидкости, препятствующая засаливанию круга (налипанию) и уменьшающая трение между кругом и деталью, а следовательно, снижающая величину сил, возникающих при шлифовании. К таким жидкостям, помимо названных выше, относится керосин, широко применяемый при шлифовании шариков подшипников, хонинговании и суперфинише разных деталей.

Недостатком таких жидкостей, как керосин, является их вредное воздействие на кожу и неприятный запах, а также способность загораться, особенно при шлифовании со скоростью выше 35 м/сек.

При хонинговании в качестве охлаждающей жидкости применяется также 5%-ная эмульсия с добавкой 0,2% тринатрийфосфата. В процессах хонингования и суперфиниширования также широко применяется смесь керосина с 10—20% веретенного или осерненного масла. Вообще добавка масла применяется к жидкости в тех случаях, когда необходимо достигнуть высокой чистоты поверхности.

При шлифовании основная роль смазочно-охлаждающей жидкости заключается в удалении из пор круга попадающей в них стружки и обломков зерен и в недопущении налипания стружки, а не в охлаждении круга.

Абразивные зерна, как известно, имеют высокую теплостойкость и поэтому не нуждаются в охлаждении, тем более, что они успевают хорошо охлаждаться за время выхода их из контакта с шлифуемой деталью.

В зависимости от характеристики и толщины круга, вида шлифования, формы и размеров шлифуемой детали изменяется интенсивность подачи охлаждающей жидкости. При внутреннем шлифовании она в 1,2—1,3 раза выше, чем при круглом наружном шлифовании и в 2 раза больше при плоском торцовом шлифовании. Чем больше толщина круга, тем обильнее должно быть охлаждение: охлаждающей жидкости расходуется приблизительно 5—8 л/мин на 10 мм толщины круга. Чем плотнее структура круга и чем выше его твердость, тем лучше должно быть охлаждение. При шлифовании тонких и полых деталей охлаждение должно быть особенно обильным.

Удаление стружки из пор круга особенно важно при работе с мелкозернистым абразивным инструментом и при шлифовании с большим контактом, например, при хонинговании, суперфинишировании, внутреннем и плоском шлифовании. В этих случаях рекомендуется применять осерненную эмульсию, причем струя смазочно-охлаждающей жидкости должна быть особенно обильной (не менее 30 л в минуту) и сильной и захватывать всю ширину круга. Известно, что чем больше скорость истечения охлаждающей жидкости, тем лучше теплопередача, тем лучше охлаждающее действие.

Однако при шлифовании во избежание разбрызгивания подачу охлаждающей жидкости ведут с умеренной скоростью, в пределах 15—20 л/мин.

В последнее время некоторые фирмы стали выпускать шлифовальные станки с весьма мощными насосами. Так, фирмой Экселло выпущены станки для шлифования лопаток, позволяющие подавать 70—110 л охлаждающей жидкости в минуту.

Для уменьшения слипания стружки и их налипания на абразивные зерна, помимо введения в жидкость указанных выше добавок, применяют очистку жидкости от стружки путем установки в баки с охлаждающей жидкостью магнитных сепараторов.

Очистку жидкости следует производить и потому, что загрязненная жидкость порождает на шлифуемой поверхности мельчайшие царапины.

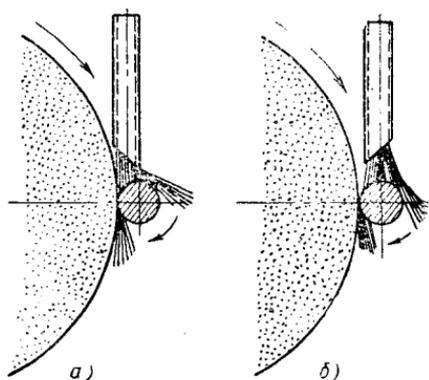
Предполагается, что снимаемая в процессе шлифования стружка закаливается под действием охлаждающей жидкости и в результате, попадая вместе с жидкостью на шлифуемое изделие, вызывает царапины.

При шлифовании алюминиевых и жаропрочных сплавов особенно часто наблюдается явление слипания и налипания стружки на зерно, ввиду плохой смачиваемости стружки. Для борьбы с этим явлением, в этих случаях прибегают к введению в состав жидкостей различных специальных смачивателей, а также добавок, препятствующих реакции между абразивным и обрабатываемым материалом. Так, при обработке титаносодержащих сплавов, особенно склонных к химической реакции с Al_2O_3 зерен электрокорунда, в охлаждающую жидкость вводят такие пассивирующие добавки (тринатрийфосфат, нитрит бария и др.), которые препятствуют этой реакции, создавая на зернах и поверхности металла прочные пленки. Очевидно по этой причине керосин, применяемый в качестве охлаждающей жидкости, при шлифовании титаносодержащих сплавов значительно повышает стойкость круга.

Жаропрочные сплавы в отличие от других металлов имеют низкую теплопроводность, повышающуюся с повышением температуры, т. е. отвод тепла у них плохой, а поэтому нахождение условий наилучшего охлаждения их в процессе шлифования имеет особенно важное значение.

При шлифовании нержавеющей сталей аустенитового класса рекомендуется применение концентрированных растворов охлаждающей жидкости.

Во всех случаях шлифования охлаждающая жидкость должна подаваться в место соприкосновения круга с деталью так, как это показано на фиг. 55, а, а не так, как это изображено на фиг. 55, б.



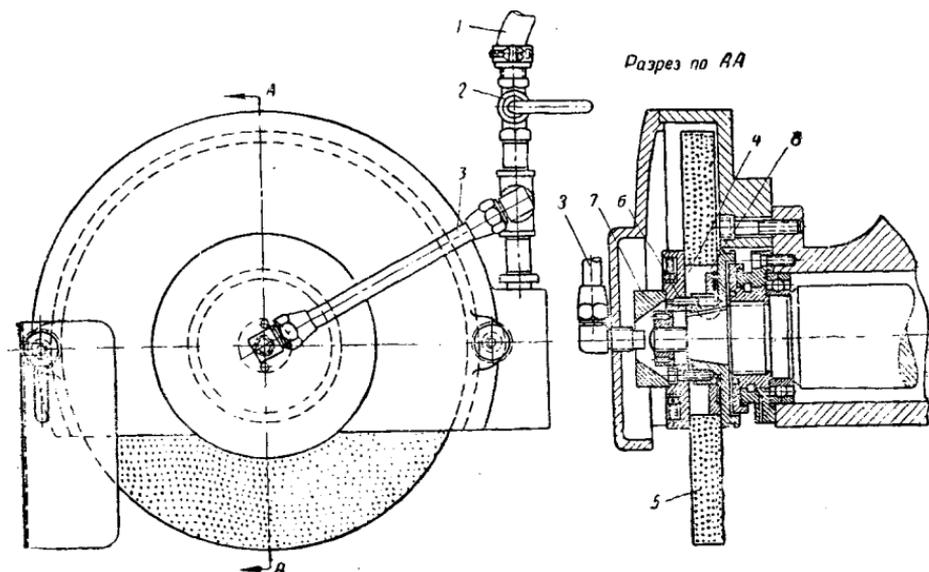
Фиг. 55. Подача охлаждающей жидкости:

а — правильная; — неправильная.

При бесцентровом шлифовании охлаждающую жидкость следует подавать в место контакта рабочего круга с деталью, а не регулирующего круга.

В последнее время, в поисках улучшения охлаждения, предлагается метод охлаждения круга через его отверстие. При этом способе охлаждающая жидкость подается через фланцы в отверстие круга (фиг. 56) и через отверстие круга, благодаря центробежной силе, на его периферию.

Жидкость, подаваемая таким способом, больше стремится, в связи с направлением ее действия удалять стружку из пор круга,



Фиг. 56. Устройство для подачи охлаждающей жидкости через отверстие шлифовального круга:

1 — резиновый шланг; 2 — кран; 3 — трубка; 4 — полость; 5 — шлифовальный круг; 6 — распределительные трубки; 7 — фланец; 8 — прорезь.

чем жидкость, подаваемая обычным путем, поэтому этот способ применяется при внутреннем и плоском шлифовании, когда имеет место большой контакт соприкосновения между кругом и деталью, для кругов толщиной до 50 мм. Вместе с тем следует отметить, что основная масса подаваемой таким путем охлаждающей жидкости попадает в среднюю часть ширины круга и меньшая в крайние его части, так как часть жидкости вытекает через торцовые поверхности круга. Иногда для лучшего распределения жидкости, особенно при кругах шире 40 мм, ее подают через специальную перфорированную втулку, вставленную в отверстие круга. Вообще этот способ подачи жидкости не обеспечивает равномерного охлаждения, так как количество вытекающей жидкости в каждой части ширины круга зависит от расположения пор в теле круга, а оно, как известно, носит беспорядочный характер. Поэтому подачу жидкости через центральную часть круга следует производить, как до-

полнительную, для повышения действия охлаждающей жидкости, подаваемой обычным способом в место контакта круга с деталью.

Другим недостатком подачи охлаждающей жидкости через отверстие круга является засорение пор круга примесями, которые несет с собой охлаждающая жидкость, и иногда в силу этого увеличение дисбаланса круга. Эти примеси жидкость содержит в себе и обогащается ими за счет пыли от износа круга и снимаемой стружки. Круг в данном случае является фильтром, задерживающим в себе примеси и очищающим жидкость. Поэтому при применении этого способа охлаждения следует устанавливать в бак, в который стекает охлаждающая жидкость, магнитный сепаратор для очищения жидкости от стружки, а также фильтр для очистки ее от загрязнений.

Этот способ охлаждения как дополнительный рекомендуется применять при шлифовании деталей из некоторых жаропрочных сплавов, например ЖС-6, и сталей в тех случаях, когда имеется опасность возникновения прижога и трещин, а также в тех случаях, когда поры круга забиваются стружкой и абразивной пылью, но при неуклонном соблюдении указанных выше условий. В частности полезно применять этот дополнительный вид охлаждения при плоском и внутреннем шлифовании, шлифовании полых деталей и т. п.

Как показывает опыт станкостроительного завода им. Я. М. Свердлова, внедрение охлаждения через поры круга на внутришлифовальных работах позволяет увеличить поперечную подачу и повысить на 10—20% производительность труда. По сведениям завода при этом также улучшается чистота поверхности (до одного класса) и на 20% уменьшается число правок и расход круга.

Применение этого способа охлаждения позволяет несколько повысить стойкость круга.

При применении таких вязких охлаждающих жидкостей, как например, сульфофрезол и масло, истечение их через поры круга происходит медленнее, чем водных растворов.

Вместе с тем подача жидкости через отверстие круга несколько улучшает качество поверхностного слоя детали и уменьшает величину поверхностных натяжений.

При шлифовании незакаленных сталей и обычном методе охлаждения твердость поверхностного слоя детали возрастает несколько больше и быстрее, чем при подаче жидкости через центр круга.

В литературе встречаются также рекомендации по применению для охлаждения одновременно двух разных жидкостей, например через отверстие круга — масла и снаружи — эмульсии. Утверждают, что при таком способе охлаждения снижается износ круга на 25% и настолько же улучшается чистота поверхности. Стойкость круга при этом повышается до 2 раз.

При подаче охлаждающей жидкости на группу шлифовальных станков через центральную систему, а не путем установки индиви-

дуальных насосов, необходимо особенно тщательно очищать жидкость от грязи и стружки.

В тех же случаях, когда в этой группе станков находятся и станки, призванные обеспечить шлифуемым деталям чистоту поверхности 9-го и более высоких классов, следует устанавливать перед подачей жидкости на эти станки дополнительные очистительные устройства или применять индивидуальные насосы и бачки.

В настоящее время пытаются в целях уменьшения прижогов, особенно при внутреннем шлифовании, производить охлаждение струей сжатого воздуха.

В поисках лучшего охлаждения было проверено много различных составов жидкостей и даже газов. Многие из них приведены в книге Р. И. Ошер «Изготовление и применение смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при обработке металлов резанием», Гостоптехиздат, 1942 г.

СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ИХ СВЯЗЬ С ПРОЦЕССОМ ШЛИФОВАНИЯ

Хотя при шлифовании снимаются мельчайшие стружки, образование их, так же как и при точении, возможно только тогда, когда к абразивному инструменту приложены силы, способные преодолеть прочность шлифуемого материала. Чем больше сечения одновременно снимаемых стружек и их количество, т. е. чем тяжелее режим обработки, чем прочнее обрабатываемый материал, тем больше силы резания, возникающие в процессе шлифования.

Величина сил резания, приходящихся на каждое зерно, зависит также от характеристики и размеров абразивного инструмента, от метода правки круга, вида правящего инструмента и т. п.

Максимально возможные силы резания при шлифовании лимитируются главным образом прочностью абразивных зерен, а также степенью твердости абразивных инструментов. В

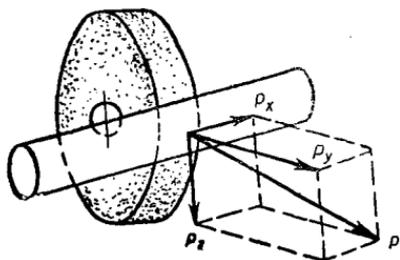
большинстве случаев фактически возникающие силы резания не превосходят прочности зерен и особенно прочности их закрепления в круге, вследствие чего и возникает необходимость его правки.

Обычно абсолютные значения величин сил, возникающих при круглом шлифовании, находятся в пределах 10—50 кг и редко их превышают. С ростом сил резания величина эффективной мощности, затрачиваемой на шлифование, возрастает.

Развивающуюся при шлифовании силу P можно разложить на три силы: тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x (фиг. 57).

В результате ряда исследований установлено, что $P_y > P_z > P_x$ и что отношение $P_y : P_z$ меняется в пределах 1,5:1 до 3:1 в зависимости от затупления круга.

Пределом увеличения P_y является прочность круга и его зерен. Анализ уравнений силы P_z , выведенных разными исследовате-



Фиг. 57. Схема сил резания.

лями, показывает, что для каждого конкретного случая шлифования влияние отдельных факторов шлифования будет сказываться различно. Для разных случаев круглого наружного шлифования с продольной подачей выведены следующие уравнения силы P_z :

а) для закаленной стали:

$$P_z = 2,1v_\theta^{0,7}s^{0,7}t^{0,6} \text{ кг (Маслов Е. Н.),}$$

$$P_z = 2,4v_\theta^{0,75}s^{0,6}t^{0,6} \text{ кг (Бабчиницер М. И.),}$$

$$P_z = v_\theta^{0,8}s^{0,95}t^{0,95} \text{ кг (Попов С. А.);}$$

б) для закаленной стали:

$$P_z = 2,2v_\theta^{0,7}s^{0,7}t^{0,6} \text{ кг (Маслов Е. Н.),}$$

$$P_z = 8,4v_\theta^{0,4}s^{0,37}t^{0,6} \text{ кг (Арцимович А. И.),}$$

$$P_z = v_\theta^{0,5}s^{0,6}t^{0,95} \text{ кг (Попов С. А.),}$$

$$P_z = C_p v_\theta^{0,72}s^{0,6}t^{0,8} \text{ кг (Шальнов В. А.),}$$

$$P_z = 3,8v_\theta^{0,4}s^{0,36}t^{0,55} \text{ кг (Рахмарова М. С.).}$$

В уравнениях других авторов показатели степени колеблются в еще больших пределах, особенно для v и s . Вместе с тем из этих уравнений следует, что с увеличением v_θ , s , t и B силы резания увеличиваются.

Известно, что величина фактической толщины стружки зависит от величины отжатия системы, которое в свою очередь зависит от величины радиальной составляющей силы резания. Таким образом, фактическая толщина стружек, снимаемых при шлифовании, зависит от величины силы резания и от пропорциональной величины отжатия.

Приведенные уравнения получены для определенных условий шлифования. При других условиях их значения будут также другие. Несмотря на это, проведенные работы по изучению сил резания позволяют сделать ряд общих выводов для всех случаев шлифования. В частности, можно утверждать, что с увеличением v_θ тангенциальная составляющая силы резания несколько (незначительно — на 10%) увеличивается, в то время как радиальная составляющая возрастает почти прямо пропорционально.

При работе с охлаждением сила резания меньше, чем при работе всухую.

С уменьшением зернистости круга сила резания, приходящаяся на одно зерно, уменьшается, но вместе с тем суммарная сила резания при работе мелкозернистым кругом увеличивается, так как число зерен на единицу длины увеличивается пропорционально уменьшению степени зернистости.

Радиальное давление, приходящееся на зерна, никогда не бывает постоянным, так как число одновременно режущих зерен все время меняется так же, как и поверхность, занимаемая ими в единице площади. При малом радиальном давлении круг работает в условиях постепенного затупления, вследствие чего режущая способность его постепенно снижается, и сьем металла умень-

шается. При большом радиальном давлении увеличивается износ круга за счет вырывания зерен.

Шлифование более твердыми кругами протекает обычно с большими силами резания.

С увеличением расстояний между зернами, т. е. с увеличением номера структуры, наблюдается обратное явление — сила резания, приходящаяся на одно зерно, увеличивается, а суммарная сила резания несколько падает.

Установлено, что при работе карборундовыми кругами силы резания больше, чем при шлифовании электрокорундовыми кругами, что объясняется различной формой и остротой зерен карбида кремния и электрокорунда, с одной стороны, и большим количеством связки и, следовательно, повышением силы трения у кругов из карбида кремния, с другой стороны. Зерна карбида кремния одинаковой степени зернистости при подобных режимах снимают более широкие стружки, чем зерна электрокорунда, что также вызывает рост силы резания.

Чем тверже и прочнее обрабатываемый материал, тем больше силы резания, возникающие при его шлифовании. Так, при шлифовании металлокерамических сплавов, содержащих кремний, наблюдалось, что силы резания на 35—40% превосходят силы резания, возникающие при шлифовании стали марки 30ХГСА.

Очень большие силы резания возникают при накатке шлифовальных кругов для резбошлифования. Особенно большие силы требуются при накатке кругов на бакелитовой и вулканитовой связках. Поэтому эти круги не рекомендуется применять для многоиточного резбошлифования. Возникновение больших сил в этом случае объясняется высокой прочностью этих кругов на сжатие — до 1500 кг/см^2 и способностью этих связок до известных пределов деформироваться без разрушения. При шлифовании кругами на органических связках возникают большие силы резания, чем при шлифовании подобными керамическими кругами.

Силы резания возрастают с затуплением зерен круга и с засаливанием круга. В течение одного и того же процесса шлифования, при постоянных режимах, силы резания меняются. В начале процесса шлифования, когда вследствие упругих деформаций и отжатия системы фактическая глубина резания увеличивается, силы резания пропорционально растут. Затем при установившемся процессе силы резания некоторое время становятся более постоянными. При проходах «выхаживания» силы резания падают и постепенно с уменьшением отжатия уменьшаются до нуля, т. е. до прекращения резания.

На изменение силы резания оказывает большое влияние метод и режим правки, при помощи которой, как известно, создается та или иная геометрия поверхности круга и его режущая способность.

Оказывает влияние на силу резания и состояние шлифовального станка. Таким образом, величина сил резания, возникающих при шлифовании, зависит от всех элементов режима резания и от всех факторов шлифования.

ГЛАВА VIII

ПРАВКА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

При всех процессах абразивной обработки (шлифовании, заточке, хонинговании и т. п.) одновременно со снятием стружки с обрабатываемой детали происходит износ абразивного инструмента. В зависимости от условий абразивной обработки и ее интенсивности изменяется величина износа абразивного инструмента, его самозатачиваемость и стойкость.

Износ абразивного инструмента в различных условиях шлифования происходит по-разному. Например, при обдирке он весьма интенсивен, а при хонинговании — мал. Почти во всех случаях шлифования износ кромок абразивного инструмента значительно больше, чем другой его рабочей части. Так, например, при наружном, внутреннем и плоском шлифовании особенно большому износу подвергается передняя (направленная в сторону подачи) кромка круга, при резьбошлифовании больше всего изнашивается центральная кромка круга, при шлифовании шеек коленчатых валов обе кромки и т. д.

Износ кромок кругов (брусков, сегментов) определяет степень искажения их первоначальной формы и несоответствия с требованиями обработки. Превышение степени износа сверх допустимого вызывает необходимость правки.

Необходимость правки вызывается также затуплением и «засаливанием» режущей поверхности кругов, брусков и сегментов. Затупление ведет к возникновению вибраций и характерному шуму, по которому шлифовщики определяют необходимость правки.

Таким образом, целью правки является восстановление режущей поверхности и необходимой геометрической формы абразивного инструмента.

Кроме того, правка применяется для придания шлифовальному кругу такой рабочей поверхности и такой режущей способности, которая позволяет получить при шлифовании высокую чистоту поверхности.

Частота правки определяет стойкость абразивного инструмента и его к. п. д. Чем выше стойкость, тем выше коэффициент использования абразивного инструмента. Практика показывает, что для разных случаев и условий шлифования износ рабочей части круга

на правку составляет от 50 до 95%, т. е. коэффициент использования круга очень низок и равен 0,05—0,5.

Коэффициент использования абразивного инструмента так же, как и его абразивная способность, и качество шлифуемой поверхности в значительной степени зависят от метода правки и вида правящего инструмента. В зависимости от вида последнего правка подразделяется на алмазную и базалмазную.

Работами во ВНИИАШе и опытом установлено, что для всех видов шлифования и при всех видах правки для восстановления режущей способности круга достаточно снять с него слой 0,05—0,08 мм. Поэтому в целях повышения использования круга и улучшения экономики процесса шлифования следует стремиться к минимальному износу круга за счет правки.

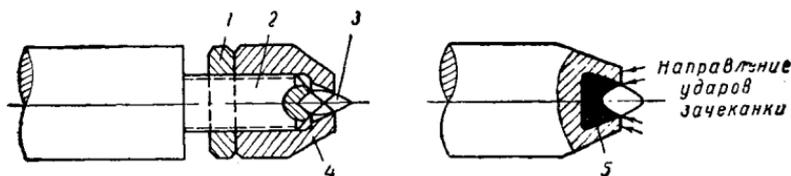
Часто спрашивают, что считать критерием затупления круга. При точении этим критерием является величина износа резца по задней поверхности. При шлифовании таких численных значений не установлено, вследствие чего шлифовщик устанавливает его по таким признакам, как изменение шума при шлифовании, изменение радиуса кромки круга и т. п.

Перейдем к рассмотрению различных способов правки.

ПРАВКА АЛМАЗАМИ

Раньше считали, что только правка алмазом может обеспечить такую режущую поверхность круга, которая нужна для достижения требуемой от шлифования точности и чистоты поверхности шлифуемой детали.

Теперь алмазная правка производится только при шлифовании деталей с точностью 1-го класса и чистотой поверхности 9—10-го



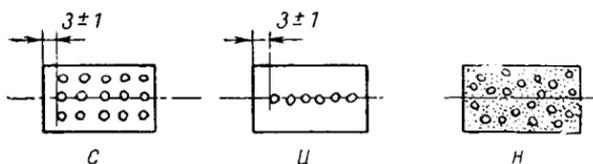
Фиг. 58. Методы крепления алмазов:

1 — контргайка; 2 — головка; 3 — алмаз; 4 — колпачок; 5 — свинцовая полушка.

класса и выше, при внутреннем шлифовании длинных отверстий малых диаметров, при профильном и фасонном шлифовании с допуском 20 мк и точнее и в некоторых других случаях (см. приложение). В остальных случаях шлифования применяется безалмазная правка. Несомненно, что с увеличением добычи алмазов применение их для правки будет расширяться. Однако высокая стоимость алмазов, относительно небольшая стойкость кругов и отсюда частая их правка значительно увеличивают стоимость процесса шлифования.

В качестве правящего инструмента при алмазной правке применяются алмазные карандаши и цельные алмазы, закрепленные в специальные оправки (фиг. 58) запайкой и зачеканкой.

В зависимости от диаметра, толщины, характеристики и назначения кругов обычно применяют алмазы от 0,25 до 2 карат. Алмазные карандаши изготавливаются на металлической (вольфрамовой) связке из осколков алмазов размерами 0,3—0,003 карат по ГОСТу 607-56 трех типов (фиг. 59), отличающихся расположением алмазных осколков. В каждом карандаше находится от 0,5 до 2

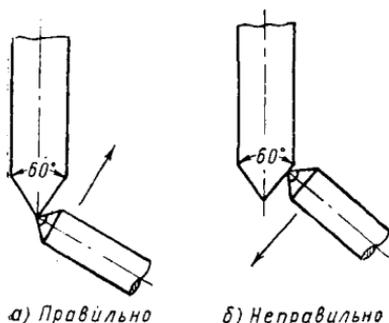


Фиг. 59. Алмазные карандаши.

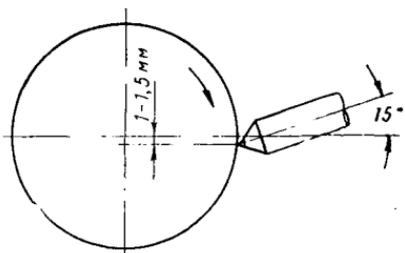
карат алмазов. Размеры карандашей следующие: $d = 10$ мм при $l = 12 \div 18$ мм.

Кроме того, для правки резбошлифовальных кругов выпускаются и используются алмазы весом 0,25—2,0 карата, закрепленные в стальные оправки (алмазные иглы) диаметром 8—9,5 мм и длиной 35—50 мм.

Правку однониточных резбошлифовальных кругов, во избежание облома кромки, следует вести так, чтобы алмаз имел направление подачи, показанное на фиг. 60, а, а не такое, как показано на фиг. 60, б.



Фиг. 60. Правка резбошлифовальных кругов.



Фиг. 61. Установка алмазов и алмазных карандашей.

При правке кругов алмазами и алмазными карандашами на круглошлифовальном станке последние закрепляются на задней бабке станка и получают заданную поперечную и продольную подачи, а шлифовальный круг вращается с рабочей скоростью. Алмазы и карандаши, в целях улучшения качества правки, уменьшения износа и во избежание дрожаний и подхватывания его кругом, устанавливаются под углом 10—15° к режущему кругу и иногда на 1—1,5 мм ниже оси круга (фиг. 61).

В результате правки на рабочей поверхности круга создается винтовой профиль с шагом $t = \frac{s}{n_k}$ мм/об; где s — подача в мм/мин; n_k — число оборотов круга в минуту.

Увеличение или уменьшение скорости круга при правке производить не рекомендуется во избежание изменения формы круга и деформаций круга и станка.

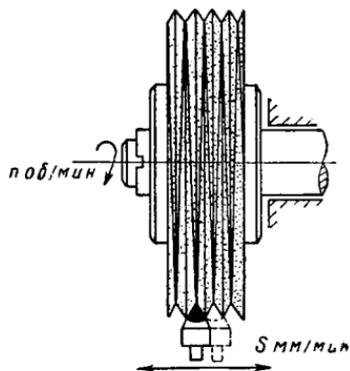
Правка производится с обильным охлаждением, которое должно включаться до начала правки во избежание резкого охлаждения и растрескивания алмаза.

Рядом работ, в том числе проведенными в ЭНИМСе, установлено, что чистота поверхности шлифованных деталей определяется не только зернистостью круга, но и неровностями, которые образуются на поверхности шлифовального круга в процессе его правки в зависимости от шага правки.

На фиг. 62 приведена поверхность круга, на которой видны следы правки алмазом, производившейся с большой продольной и поперечной подачами. Такая правка приводит к большим и глубоким неровностям шлифованной поверхности.

Чем меньше продольная подача, тем меньше шаг правки, тем меньше неровности поверхности круга и детали.

При правке круга алмазным инструментом круг испытывает значительно меньшее давление, чем при безалмазной правке. Кроме того, уменьшение продольной подачи создает



Фиг. 62. Следы грубой правки с большой продольной подачей.

большее число встреч круга с алмазом. Эти факторы и обеспечивают более точно выправленную поверхность круга с меньшей степенью разновысотности зерен.

Опытами было установлено, что даже при шлифовании кругами зернистости 46—60, если они подвергнуты точной правке, можно получить детали 1-го класса точности и 10—12-го класса чистоты поверхности.

Такие показатели достигаются не на всех станках. Для их получения необходимо тщательно отбалансировать круг, проверить и, если требуется, отремонтировать станок, особенно узел подшипников, во избежание зазоров и вибраций шпинделя и круга, проверить исправность узла продольной подачи для обеспечения ее плавности при правке.

При шлифовании длинных и при этом небольших диаметров деталей необходимо пользоваться люнетами, тщательно шлифовать центра и центровые отверстия.

При несоблюдении этих условий необходимого повышения чистоты поверхности при шлифовании не достигается.

Обычно правка алмазным инструментом при круглом наружном окончательном шлифовании производится при поперечной подаче 0,015—0,04 мм и продольной 0,1—0,3 мм/об круга.

При алмазной правке в силу весьма малых подач возникают небольшие силы, порядка 5—10 кг, что и способствует обеспечению более точной правки круга, чем при безалмазной правке.

Этой силы оказывается достаточно для скалывания частиц с зерен круга и образования необходимых режущих граней. Исследование микростереоснимков показало, что режущие грани зерен расположены под разными углами и имеют обычно весьма различные профили, расположенные на неодинаковой высоте от поверхности.

При правке шлифовальных кругов из карбида кремния силы резания почти в 3 раза больше, чем при правке кругов из электрокорунда, что объясняется более высокой твердостью карбида кремния. Следует отметить, что при безалмазной правке этого явления не наблюдается вследствие другого принципа правки (работа на вырывание зерен).

Алмазы весьма чувствительны к ударной нагрузке, которая в процессе правки кругов проявляется весьма резко и, как известно, возрастает пропорционально $\frac{mv^2}{2}$. Поэтому во избежание опасности разрушения алмаза и ухудшения качества правки указанные выше режимы правки увеличивать не рекомендуется.

В этих же целях алмазный инструмент должен быть прочно закреплен на станке. Непрочное закрепление приводит к дрожаниям и вибрациям алмазного инструмента, в результате чего качество поверхности круга и отшлифованной детали получается неудовлетворительным.

Такая же поверхность со следами дрожания получается и при шлифовании плохо отбалансированным или очень твердым кругом, при неудовлетворительно отшлифованных центрах и центровых отверстиях, при очень большом зазоре в подшипниках шпинделя бабки круга и вследствие других причин, вызывающих дрожание.

БЕЗАЛМАЗНАЯ ПРАВКА

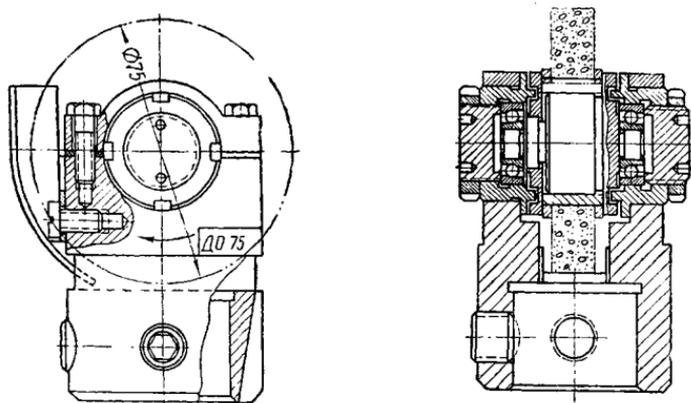
Основная масса шлифовальных кругов применяется в процессах шлифования, обеспечивающих чистоту поверхности по 7—9-му классам.

Поэтому для целей правки этих кругов употребляются различные виды правящих неалмазных инструментов, носящих общее название алмазозамениителей. К их числу принадлежат: круги и бруски из карбида кремния, твердосплавные диски, диски из термоборунда, стальные и чугунные шарошки и звездочки, стальные ролики и др.

Правящие инструменты крепятся в специальных державках, от конструкции, точности и жесткости которых зависит степень точности формы выправляемого круга. В связи с этим особенно большое внимание в конструкциях державок должно быть обращено на узлы подшипников оси, на которой крепится правящий инструмент. В настоящее время разработано много конструкций державок, в значительной степени отвечающих этим условиям. К их

числу относятся державки, разработанные Оргалмазом, типов Д075 и Д040 (фиг. 63).

Безалмазная правка требует большей затраты сил, чем алмазная, что является результатом большей поверхности контакта между правящим инструментом и выправляемым кругом и другого способа воздействия правящего инструмента на шлифовальный круг. При безалмазной правке происходит не только скалывание, но и в значительной степени раздавливание и вырывание зерен. Чем меньше величины поперечной и продольной подачи, тем более заглаженной получается поверхность выправляемого круга, тем



Фиг. 63. Державка для безалмазной правки.

лучше чистота поверхности отшлифованной детали и меньше стойкость круга.

Чем мельче зернистость шлифовального круга, тем меньше должна быть поперечная подача, тем меньшее число проходов требуется для правки круга, тем меньшие усилия возникают при правке.

Величина сил, возникающих при безалмазной правке в зависимости от вида правящего инструмента, равна 12—30 кг и больше.

Большие усилия и меньшая по сравнению с алмазом твердость алмазозаменителей вызывают их больший износ в процессе правки и отсюда меньшую точность формы выправляемых кругов.

Чем тверже выправляемый круг, тем больше износ правящего инструмента, тем больше усилия при правке.

Охлаждение при безалмазной правке должно быть обильным для того, чтобы смыть раздробленные частицы зерен и связки с поверхности и пор круга и не допускать попадания абразивной пыли в подшипники державки.

ПРАВКА КРУГАМИ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Этот тип правящего инструмента является наиболее широко применяемым при всех видах шлифования. Для правки обычно применяются в соответствии с ГОСТом 6565-53 круги на керамической

связке из черного карбида кремния диаметром 60—150 мм, зернистостью № 16—36, твердостью Т1-Т2. Зернистость правящих кругов обычно берется на три-пять степеней крупнее, чем у выправляемых кругов, и твердость на пять-шесть степеней выше.

Чем более открытую структуру имеет выправляемый круг, тем меньшая может быть разница в зернистости между ним и правящим кругом.

Правка кругами производится способом обкатки или шлифования. И тем и другим способом правятся главным образом крупнозернистые и среднезернистые круги от 16 до 80 номера зернистости, твердостью от МЗ до Т1.

При правке методом обкатки шлифовальный круг вращается с обычной рабочей скоростью, а правящий круг получает вращение при соприкосновении с шлифовальным кругом за счет сцепления и возникающих при этом сил трения, вследствие чего скорость правящего круга несколько меньше, чем скорость шлифовального круга.

Правящий круг устанавливается под углом 5—8° и ниже оси шпинделя шлифовального круга.

При правке на бесцентровошлифовальных станках правящий круг устанавливают под углом 10—15°.

Установка державки с правящим кругом ниже осевой линии производится в целях уменьшения вибраций при правке, именно поэтому державку рекомендуется устанавливать так, чтобы ось правящего круга была возможно ниже оси шпинделя шлифовального круга. При таком расположении правящего круга обеспечивается хорошее качество правки и меньший износ правящего круга.

При увеличении угла наклона износ правящего круга увеличивается, так как расклинивающие силы увеличиваются, и вырывание и облом зерен возрастают.

Качество и чистота правки зависят от ее режима, характеристики и размеров правящего круга, конструкции державки и т. п.

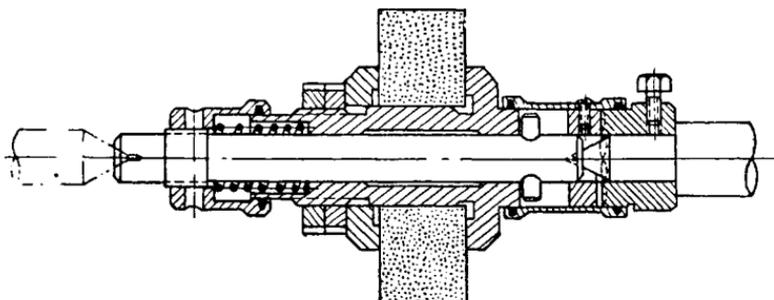
Так же как и при правке алмазным инструментом, точность правки прежде всего зависит от совершенства конструкции державки, отсутствия зазоров, жесткости ее крепления.

Стойкость круга, а также чистота поверхности прежде всего зависят от режима правки и, главным образом, от величины продольной подачи. Чем она меньше, тем чище получается поверхность шлифованной детали, тем меньше стойкость круга, тем чаще необходимо править круг.

При круглом обдирочном и плоском шлифовании торцом круга правку ведут с продольной подачей 1—1,5 м/мин и поперечной подачей 0,03—0,05 мм. При круглом и плоском шлифовании периферией круга правку ведут за 3—5 проходов с продольной подачей 0,5—0,9 м/мин и поперечной — 0,01—0,03 мм, при этом чистовые (последние) проходы ведут с уменьшенной продольной подачей до 0,4—0,5 м/мин, поперечной же подачи не дают совсем.

При дальнейшем уменьшении продольной подачи шлифовальный круг слишком заглаживается.

В результате правки с такими режимами при шлифовании достигается чистота поверхности по 7—9-му классам. Автор получал чистоту поверхности отшлифованных деталей по 9-му классу при проведении правки методом обкатки правящим кругом, установленным в специальном разработанном им приспособлении, показанном на фиг. 64. В этом приспособлении правящий круг получает не только вращение и движение подачи, но еще и несколько (5—7) колебательных движений за один оборот круга с небольшой (2—2,5 мм) амплитудой колебаний, что позволяет лучше выровнять поверхность шлифовального круга.



Фиг. 64. Приспособление для безалмазной правки с осциллирующим движением.

Правка кругами методом шлифования представляет собой обычный процесс круглого наружного шлифования, в котором роль детали играет правящий круг. Так как правящий круг всегда тверже и крупнозернистее, чем шлифовальный круг, такое шлифование сопровождается большим износом последнего. В этом и заключается принципиальное отличие этого метода правки от метода обкатки.

При правке методом шлифования шлифовальный круг вращается с обычной своей рабочей скоростью, а правящему кругу дают скорость шлифуемых деталей.

В результате такой правки происходит вырывание и частично раскалывание зерен круга.

Правка методом шлифования осуществляется теми же кругами, что и правка методом обкатки, обязательно при обильном охлаждении и примерно при тех же режимах.

При правке этим методом, при шлифовании коротких деталей правящий круг крепится на специальной оправке центрами станка и при шлифовании длинных деталей в приспособлении, устанавливаемом на столе станка, в котором круг получает вращение от специального электромотора или от привода передней бабки. В целях получения высокой точности и чистоты поверхности шлифованных деталей при правке кругом, установленным между центрами, необходимо, чтобы длина оправки, на которой крепится правящий круг, была равна длине шлифуемых деталей. В этом слу-

чае заднюю бабку не придется передвигать, что помимо повышения точности сократит расход времени на правку.

В целях уменьшения износа правку кругами ведут так, что правящий и шлифовальный круги при изменении направления прохода не выводятся полностью из контакта. Износ правящих кругов при правке методом шлифования меньше, чем при правке методом обкатки, в 2 раза и более.

Правка кругов твердосплавными дисками производится только методом обкатки. Для правки применяются пресованные монолитные диски, или диски из дробленого твердого сплава.

Твердосплавные диски широко применяются для правки кругов для получения шлифованной поверхности 7—9-го и реже 10-го класса.

Диски изготавливаются диаметром 18—75 мм из сплавов различных марок.

Твердосплавные диски, в отличие от правящих кругов, делаются обычно небольшой толщины: монолитные от 2,5 до 4 мм и из дробленых зерен до 12 мм. Такая небольшая толщина дисков берется потому, что они работают главным образом своими кромками, в то время как правящие круги при обкатке работают не только кромками, но и всей периферией круга. В этом и заключается принципиальное отличие правки твердосплавными роликами.

Твердосплавные монолитные диски имеют в несколько раз более высокую прочность на изгиб, чем правящие круги (около 110 кг/мм² у твердых сплавов и около 15 кг/мм² у карбида кремния), что и позволяет их делать небольшой толщины.

Небольшие размеры твердосплавных дисков позволяют применять для их крепления державки значительно меньших размеров, чем при правке кругами, что создает в ряде случаев удобство установки их на станок. Наиболее широко применяются державки конструкции Оргалмаза типа Д075 и Д040. Чем точнее выполнены державки, чем меньше их биение, тем выше точность правки и шлифования.

При правке дисками из зерен твердых сплавов, установленными в эти державки, кругов зернистостью 46—60, твердости СМ1—СТ2 в процессе шлифования обеспечивается 7—8-й класс чистоты поверхности, а точность 2—3-го класса.

При правке державка устанавливается так, чтобы ось диска была параллельна оси выправляемого круга.

Правка производится обычно в семь-восемь проходов, причем первые два-три прохода делаются с продольной подачей 0,4—0,6 м/мин и поперечной 0,02—0,04 мм, чистовые два-три прохода делаются с продольной подачей 0,2—0,4 м/мин и поперечной 0,01—0,02 мм и даже без нее.

При продольной подаче 0,1—0,2 м/мин достигается чистота поверхности шлифованных деталей по 9-му классу.

При правке твердосплавными дисками достигается большая точность, чем при правке кругами методом обкатки, так как износ

дисков в процессе правки в 10—15 раз меньше, чем износ правящих кругов. Поэтому в процессах шлифования, при которых применяется правка твердосплавными роликами, возможно получение точности с допуском 6—8 *мк*, в то время как при правке кругами достигаемая точность не выше 10—12 *мк*, хотя чистота поверхности получается выше.

Наиболее износостойкими твердыми сплавами являются сплавы ВК-3А и ВК-6А.

Усилия, возникающие при правке твердосплавными роликами, примерно такие же, как и при правке кругами методом обкатки, что вызывает такие же требования к конструкции державок. По сравнению с правкой кругами методом шлифования при правке твердосплавными дисками радиальные силы в 3—4 раза меньше.

Правка дисками из термокорунда, так называются диски из спрессованного и спеченного при температуре 1700—1800° глинозема, применяется, так же как и правка шлифовальными кругами, для достижения чистоты поверхности до 9-го класса и точности до 8—10 *мк*.

Термокорундовые диски имеют в 2—3 раза бóльшую прочность на изгиб (до 35 *кг/мм²*), чем правящие шлифовальные круги, но меньшую, чем твердосплавные диски, поэтому они изготавливаются толщиной 6 *мм* и диаметром 32—80 *мм*.

При правке термокорундовые диски устанавливаются в державки обычно совместно со стальным диском толщиной 1—1,5 *мм* для повышения прочности, улучшения правки и уменьшения износа.

Правка производится только методом обкатки при тех же режимах, что и дисками из твердых сплавов.

Правка кругов металлическими дисками и шарошками производится в тех случаях, когда при шлифовании требуется получить точность 12—15 *мк* при чистоте поверхности не выше 7-го класса. Металлические — стальные и чугунные, диски и шарошки изготавливаются диаметром 35—75 *мм*, толщиной 1,5—6 *мм*.

Правка металлическими дисками производится с продольной подачей 0,4—0,6 *м/мин* и поперечной 0,03—0,05 *мм*.

ГЛАВА IX

УРАВНОВЕШЕННОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Качество шлифования в связи с высокими скоростями резания в значительной мере зависит от степени уравновешенности шлифовальных кругов, т. е. от совпадения центра тяжести круга с его геометрическим центром. Чем больше неуравновешенность круга, тем хуже получается качество шлифованной поверхности (дробление, вибрации), тем меньше точность шлифования, тем больше износ круга и опасность его разрыва, тем чаще необходима его правка. Неуравновешенность кругов, кроме того, разрушающе действует на шлифовальные станки, особенно на подшипники, увеличивая их износ. Поэтому в производстве шлифовальных кругов совершенно обязательными операциями являются проверка уравновешенности всех кругов диаметром 250 мм и выше и исправление дисбаланса, если он превышает допустимый ГОСТом 3060-55.

Мерой статического дисбаланса служит вес груза, который будучи сосредоточен в точке периферии круга, противоположной его центру тяжести, перемещает последний на ось вращения круга. За единицу статического дисбаланса принимается величина E , устраняющая неуравновешенность, вызванную смещением центра тяжести от геометрического центра круга на $\xi = 0,01$ см:

$$E = \frac{G}{R} \xi = \frac{\pi(D^2 - d^2)H\gamma\xi}{4R} = \frac{0,0377(D^2 - d^2)H}{D} \gamma,$$

где γ — объемный вес круга принят равным 2,4 г/см³;

D — наружный диаметр круга в см;

d — диаметр отверстия круга в см;

H — высота круга в см.

ГОСТом 3060-55 установлены четыре класса дисбаланса в зависимости от высоты, зернистости и типа связки круга (табл. 17).

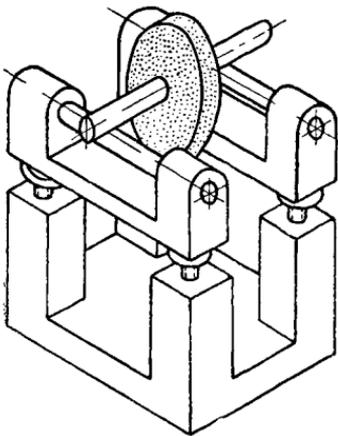
Для каждого из этих классов в зависимости от диаметра и толщины круга установлены предельно допустимые величины дисбаланса (табл. 18). Из таблицы видно, что чем меньше вес круга, т. е. его толщина и диаметр, тем меньший допускается дисбаланс.

Из сравнения весов кругов и величин допустимых дисбалансов можно установить, что у кругов первого класса величина дисбаланса, как правило, не превышает 0,2% и у кругов второго класса 0,3%.

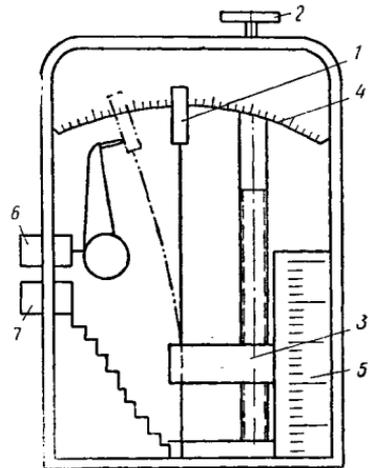
Классы дисбаланса

Наименование связки кругов	№ зернистости	Высота круга в мм					
		до 13	свыше 13 до 75	свыше 75 до 100	свыше 100 до 125	свыше 125 до 150	свыше 150
Вулканитовая	120 и мельче	1	2	2	3	3	3
	80—100	2	2	2	3	3	3
	60 и крупнее	3	3	3	4	4	3
Керамическая и бакелитовая	120 и мельче	2	2	2	3	3	3
	60—100	2	2	2	3	3	3
	36—46	3	3	3	4	4	3
	24 и крупнее	4	4	4	4	—	—

Измерение величины статического дисбаланса рекомендуется производить на приборе (фиг. 65), представляющем собою два ци-



Фиг. 65. Прибор для статической балансировки кругов.



Фиг. 66. Виброметр:

1 — индикатор; 2 — маятник; 3 — шкала для настройки индикатора в резонанс колебаниям; 4 — шкала для измерения амплитуды колебаний индикатора; 5 — шкала для определения частоты колебаний индикатора; 6 — гнездо штепселя подвижного контакта; 7 — гнездо штепселя индикатора.

линдрических валика одного диаметра, имеющих чистоту поверхности не ниже 9-го класса. Этим прибором пользуются как в производстве шлифовальных кругов, так и при их эксплуатации. Следует помнить, что указанные в табл. 18 величины дисбаланса нельзя рассматривать как допустимые при установке круга на станок и на этом основании не производить уравнивания круга. Величина дисбаланса при установке круга на фланцы или на шпиндель будет за счет неправильностей центрирования всегда другой. Это

Допустимый предельный дисбаланс в г

Высота круга <i>H</i> в мм	Классы дисба- ланса	Наружный диаметр в мм										
		250	300	350	400	450	500	600	650	750	900	1100
		Предельный дисбаланс <i>B</i> в г										
До 13	1	5	5	10	10	10	10	—	—	—	—	—
	2	10	10	15	15	15	15	—	—	—	—	—
	3	15	15	20	20	25	25	—	—	—	—	—
	4	25	30	30	35	40	45	—	—	—	—	—
Свыше 13	1	10	10	15	15	20	20	20	20	—	—	—
	2	15	20	20	25	30	30	30	35	—	—	—
	3	25	30	35	40	45	45	45	55	—	—	—
	4	40	50	55	60	70	70	75	85	—	—	—
Свыше 25	1	15	20	20	25	30	30	30	35	40	50	65
	2	25	30	35	40	45	45	45	55	65	80	105
	3	35	45	50	65	65	70	75	85	105	125	155
	4	60	70	80	90	100	110	120	135	165	195	250
Свыше 50 до 75	1	15	20	25	25	30	30	30	35	45	55	70
	2	30	30	35	40	45	50	50	55	70	90	115
	3	40	50	55	65	75	75	80	90	110	140	180
	4	65	80	90	100	115	120	125	140	175	225	285
Свыше 75 до 100	1	20	25	25	30	30	35	35	40	45	60	75
	2	30	35	40	45	50	55	55	65	80	100	125
	3	50	55	60	70	80	85	85	100	125	160	200
	4	75	90	100	115	130	135	140	160	200	260	325
Свыше 100 до 125	1	25	30	30	35	40	40	40	50	60	75	—
	2	40	45	50	60	65	65	70	80	100	125	—
	3	50	60	70	80	90	100	110	125	150	180	—
	4	80	100	115	130	145	165	180	205	250	295	—
Свыше 125 до 150	1	30	30	35	40	45	45	50	50	60	—	—
	2	40	50	55	60	70	75	80	90	105	—	—
	3	55	70	80	90	100	110	125	140	170	—	—
	4	90	110	120	140	160	180	200	230	250	—	—
Свыше 150	1	35	40	45	50	55	55	60	70	—	—	—
	2	45	55	60	70	80	90	95	105	—	—	—
	3	60	75	85	100	115	130	150	160	—	—	—
	4	100	120	140	160	180	200	235	260	—	—	—

вызывается тем, что отверстие круга всегда имеет несколько больший диаметр, чем посадочное место. Центробежные силы, возникающие при шлифовании неуравновешенным кругом, достигают значительной величины, 200 кг и больше. Величина центробежной силы F может быть подсчитана по формуле

$$F = \frac{Ev^2}{gR} = \frac{Gv^2c}{gR} = \frac{Bv^2}{gR},$$

где B — величина предельного дисбаланса;

c — смещение центра тяжести.

Таким образом, величина центробежной силы пропорциональна квадрату скорости и дисбалансу круга и обратно пропорциональна его диаметру.

Исходя из такого влияния центробежной силы, следует каждый круг перед установкой его на станок уравновесить. Это следует делать после первой правки, а также в процессе шлифования, так как по мере износа круга, вследствие его неравномерной плотности и структуры, происходит его разбалансировка. Кроме того, разбалансировка происходит и вследствие потери кругом своей строго цилиндрической формы из-за неравномерности износа, а также в связи с неравномерным осаждением в порах круга заносимой охлаждающей жидкостью абразивной пыли и мельчайшей стружки. Оседание примесей происходит особенно при остановках круга. Устранение дисбаланса производится обычно передвижением сухариков во фланцах, на которые надевается круг. При этом следует учесть, что совершенно необходимо тщательно сцентрировать круг при его установке на фланцы для того, чтобы не создать добавочного дисбаланса.

Разбалансировка круга вызывает вибрации всего станка и вызывает ухудшение качества и точности шлифования. Установление момента разбалансировки и величины дисбаланса, а также уравнивание круга, не снимая его со станка, может быть проведено при помощи виброскопа, предложенного инж. Н. В. Колесник. Этот прибор, основанный на принципе механических резонансных колебаний, состоит из виброметра (фиг. 66), селенового выпрямителя для преобразования переменного тока в постоянный и безынерционной стробоскопической лампы.

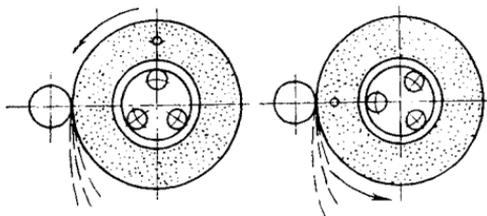
При помощи этого прибора определяют амплитуду и частоту вибраций, устанавливают местонахождение и величину неуравновешенной массы.

Эти приборы выпускаются Ленинградским инструментальным заводом. Подробное описание их и работы с ними приведено в прилагаемой к ним инструкции.

В последнее время шлифовальные станки все чаще оснащаются приспособлениями для автоматической балансировки кругов. На фиг. 67 приведено приспособление для автоматической балансировки кругов в процессе шлифования. В планшайбе шлифовального круга расположены три шарика, которые при балансировке круга автоматически самоустанавливаются, так что дисбаланс

устраняется. Затем при помощи специального замка они зажимаются в планшайбе.

Оригинальный механизм для балансировки кругов, не снимая их со станка, был предложен инж. К. Скриживан в Чехословацком исследовательском институте металлорежущих станков и обработки металлов резанием и модернизирован ЭНИМСом. На ряде заводов, в частности, на заводе «Станкоконструкция» этот механизм нашел некоторое применение на круглошлифовальных станках. Принцип действия этого механизма основан на совместном передвижении двух грузов

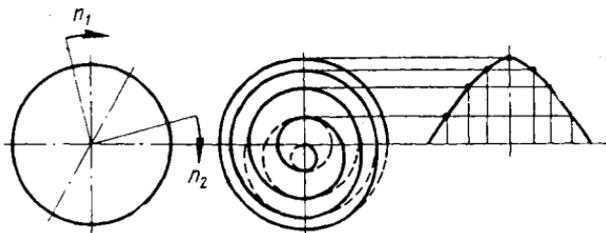


Фиг. 67. Приспособление для автоматической балансировки кругов.

n_1 и n_2 относительно шлифовального круга по какой-либо спирали, т. е. с одновременным смещением грузов один относительно другого. При движении по синусоидальной спирали общий центр тяжести грузов (фиг. 68) вращается с угловой скоростью

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \frac{\pi}{60} (n_1 + n_2)$$

и при этом одновременно перемещается в радиальном направлении, за счет чего и достигается уравнивание дисбаланса.



Фиг. 68. Схема движения центра тяжести балансирующих грузов.

На фиг. 69 показан балансирующий механизм, укрепленный на планшайбе шлифовального круга.

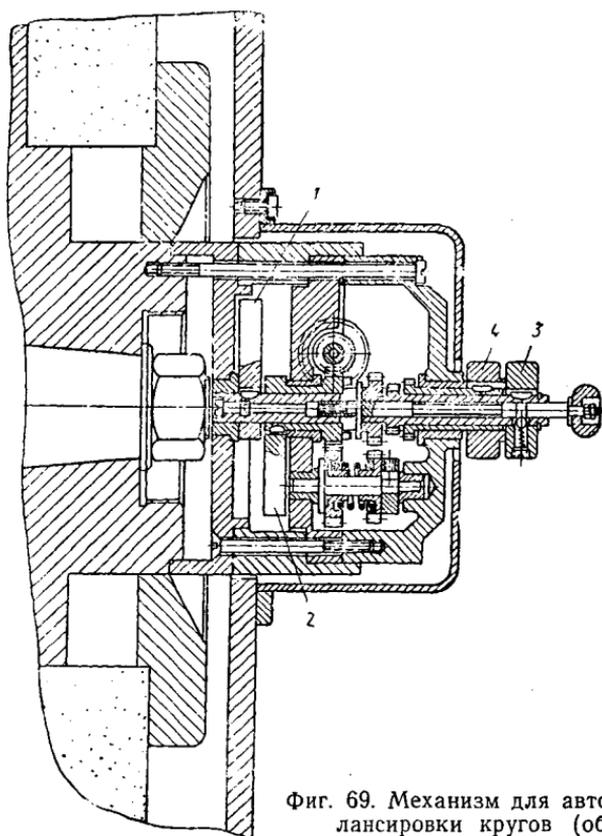
Балансирующие грузы, представляющие собой два сектора 1 и 2, для устранения дисбаланса шлифовального круга поворачиваются относительно оси круга в том или другом направлении, в зависимости от того, которая из двух рукояток 3 и 4, связанных при помощи шпонок с системой зубчатых колес, остановлена.

При остановке рукоятки 4 грузы поворачиваются в 2 раза быстрее, чем при остановке рукоятки 3 за счет разного передаточного отношения системы колес, приводящей грузы во вращение.

При балансировке шлифовщик, останавливая то одну, то другую рукоятку, наблюдает за перемещением грузов, которое вызывает при этом увеличение или уменьшение амплитуды колебаний

станка. Эти колебания замеряются при помощи виброметра, устанавливаемого на шлифовальную бабку станка, или посредством индикатора, устанавливаемого на столе станка и соприкасающегося наконечником с бабкой.

Круг считается отбалансированным тогда, когда амплитуда колебаний получается наименьшей



Фиг. 69. Механизм для автоматической балансировки кругов (общий вид).

Точность балансировки, достигаемая при помощи этих приспособлений, обеспечивает надлежащее качество и точность шлифования, а также лучшую сохранность станка.

В настоящее время ЭНИМС располагает чертежами на четыре типоразмера этих балансировочных механизмов для балансировки кругов диаметром от 300 до 750 мм и толщиной от 32 до 150 мм. Однако эти механизмы вследствие недостаточной защиты их от попадания пыли и сложности устройства не нашли применения на таких станках, как бесцентровошлифовальные, и других, работающих кругами больших диаметров, вследствие чего задача балансировки кругов в процессе шлифования по-прежнему ожидает своего решения.

ГЛАВА X

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Абразивной обработкой достигается высокое качество обрабатываемой поверхности, которое нельзя достигнуть никаким другим способом механической обработки. Это объясняется тем, что при абразивной обработке снимается громадное число мельчайших стружек, что позволяет удалять тончайшие слои металла.

Высокое качество поверхности в современном машиностроении вызывается все растущими требованиями к скоростям резания и долговечности работы машин и механизмов, все повышающимися требованиями к точности деталей и их износостойкости.

Качество поверхности и поверхностного слоя определяет сопротивление деталей износу и в известной степени и их прочность.

В связи с этим достижению высокого качества поверхности в машиностроении уделяется весьма серьезное внимание.

При оценке качества поверхности прежде всего обращают внимание на ее чистоту, понимая под ней степень шероховатости. При определении чистоты поверхности обычно измеряют величину поперечной шероховатости, перпендикулярную направлению движения резания. Чем меньше высота микронеровностей, тем выше чистота поверхности.

При определении качества поверхностного слоя рассматривают, какие качественные физические изменения претерпел поверхностный слой. В производстве качество поверхностного слоя контролируется главным образом по отсутствию прижогов и трещин микротвердости и реже по структурным изменениям.

Качество поверхности и поверхностного слоя есть результат механического и физического воздействия на обрабатываемую поверхность целого ряда факторов.

В частности, чистота поверхности и качество поверхностного слоя зависят от характеристики и режущей способности абразивного инструмента, от методов шлифования и всех параметров режима шлифования, от состава и количества охлаждающей жидкости, от состояния и конструкции шлифовального станка, от свойств обрабатываемого материала, от режима, методов и частоты правки, т. е. от всех факторов процесса шлифования.

ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТИ

В соответствии с ГОСТом 2789-51 чистота поверхности, которая может быть получена разными способами обработки, делится на 14 классов, и с 6-го класса каждый класс разделяется еще на 3 ряда.

В табл. 19 даны значения $H_{ск}$ и $H_{ср}$ для каждого из классов.

Известно, что точением можно достичь 4—7-го классов чистоты, фрезерованием 5—7-го классов, строганием 3—6-го классов, развёртыванием 6—8-го классов, алмазной расточкой 8—9-го классов, а разными методами абразивной обработки 6—12-го и даже 14-го класса.

Чистота поверхности при шлифовании измеряется или путем сравнения с рабочими образцами и эталонами (до 14-го класса включительно), или путем непосредственного замера величин микронеровностей (для 7—14-го классов). При определении чистоты поверхности эталонным способом, сравниваемая деталь и эталоны располагаются рядом и наблюдаются через 10-кратную лупу при одинаковом освещении. Установление чистоты поверхности методом непосредственного измерения производится обычно шуповым профилометром конструкции Киселева КВ-7, или, реже, при помощи двойного микроскопа МИС-11 или другими специально предназначенными для этой цели приборами, например: профилометром Аммона, микроинтерферометрами МИИ-1, МИИ-5 и т. п.

Выбор типа прибора зависит от конфигурации и размеров проверяемых деталей, от степени чистоты поверхности и точности контроля. Так, микроинтерферометры МИИ-1 и МИИ-5 применяются для деталей, имеющих 10—14-й класс чистоты, МИС-11 для деталей 3—9-го класса чистоты, КВ-7 и П4-2 для деталей 5—12-го классов чистоты.

Оценка чистоты берется обычно как среднее трех измерений разных мест поверхности. Профилометр КВ-7, действие которого основано на принципе электромагнитной индукции, позволяет с хорошей точностью определять чистоту поверхности до 12-го класса.

Чистота поверхности как в продольном, так и в поперечном сечении, как сказано выше, зависит от характеристики абразивного инструмента, свойств обрабатываемого материала, режима и метода обработки, способа и режима правки шлифовального круга. Большое число проведенных опытов по установлению влияния этих факторов на микрогеометрию поверхности позволяет вывести ряд зависимостей.

Чистота поверхности 7—8-го классов достигается при применении кругов зернистости № 46—80, а при шлифовании с выхаживанием эта чистота достигается и кругами более крупной зернистости. Вместе с тем установлено, что чем мельче зернистость круга, тем меньше получаются значения $H_{ск}$, тем выше класс чистоты поверхности. Это явление объясняется тем, что с уменьшением степени зернистости с обрабатываемой поверхности при шлифовании снимается большее число стружек, вследствие чего число рисков возрастает. Так как шлифование мелкозернистыми кругами обычно

Классы и разряды чистоты поверхности

Классы чистоты	Среднее квадратичное отклонение микронеровностей $H_{ск}$ в мк	Средняя высота микронеровностей $H_{ср}$ в мк	Разряды чистоты	Среднее квадратичное отклонение микронеровностей $H_{ск}$ в мк	Средняя высота микронеровностей $H_{ср}$ в мк
1	—	Свыше 125 до 200	—	—	—
2	—	Свыше 63 до 125	—	—	—
3	—	Свыше 40 до 63	—	—	—
4	—	Свыше 20 до 40	—	—	—
5	Свыше 3,2 до 6,3	Свыше 10 до 20	—	—	—
6	Свыше 1,6 до 3,2	Свыше 6,3 до 10	6а	Свыше 2,5 до 3,2	—
			6б	Свыше 2,0 до 2,5	
			6в	Свыше 1,6 до 2,0	
7	Свыше 0,8 до 1,6	Свыше 3,2 до 6,3	7а	Свыше 1,25 до 1,6	—
			7б	Свыше 1,0 до 1,25	
			7в	Свыше 0,8 до 1,0	
8	Свыше 0,4 до 0,8	Свыше 1,6 до 3,2	8а	Свыше 0,63 до 0,8	—
			8б	Свыше 0,5 до 0,63	
			8в	Свыше 0,4 до 0,5	
9	Свыше 0,2 до 0,4	Свыше 0,8 до 1,6	9а	Свыше 0,32 до 0,4	—
			9б	Свыше 0,25 до 0,32	
			9в	Свыше 0,2 до 0,25	
10	Свыше 0,1 до 0,2	Свыше 0,5 до 0,8	10а	Свыше 0,16 до 0,2	—
			10б	Свыше 0,125 до 0,16	
			10в	Свыше 0,1 до 0,125	

Классы чистоты	Среднее квадратичное отклонение микронеровностей $H_{ск}$ в мк	Средняя высота микронеровностей $H_{ср}$ в мк	Разряды чистоты	Среднее квадратичное отклонение микронеровностей $H_{ск}$ в мк	Средняя высота микронеровностей $H_{ср}$ в мк
11	Свыше 0,05 до 0,1	Свыше 0,25 до 0,5	11а 11б 11в	Свыше 0,08 до 0,1 Свыше 0,063 до 0,08 Свыше 0,05 до 0,063	—
12	Свыше 0,025 до 0,05	Свыше 0,12 до 0,25	12а 12б 12в	Свыше 0,04 до 0,05 Свыше 0,032 до 0,04 Свыше 0,025 до 0,032	—
13	—	Свыше 0,06 до 0,12	13а 13б 13в	— — —	Свыше 0,1 до 0,12 Свыше 0,08 до 0,1 Свыше 0,06 до 0,08
14	—	До 0,06	14а 14б	—	Свыше 0,03 до 0,06 До 0,03

ведется с меньшей глубиной резания, то глубина рисок при этом уменьшается. Сочетание этих явлений приводит к тому, что мелкозернистыми кругами сошлифовывается объем металла, больше приближающийся к теоретически возможному. Последним мы считаем такой объем, при снятии которого на единицу глубины обработанная поверхность будет абсолютно гладкой. Чем ближе отношение снятого объема металла к теоретически возможно приближается к единице $\frac{W_{\phi}}{W_m} \rightarrow 1$, тем выше класс чистоты обработанной поверхности. При исчислении теоретически возможного объема следует учитывать состояние поверхности до начала шлифования.

Чем выше твердость круга, чем плотнее его структура, тем легче получить более высокую чистоту поверхности. Мягкие круги и открытые структуры кругов скорее изнашиваются, вследствие чего зерна на режущей поверхности расположены реже и чаще обновляются, что и способствует получению более шероховатой поверхности.

Шлифовальные круги из карбида кремния, при прочих равных условиях, позволяют получать более чисто обработанную поверхность, чем круги из электрокорунда, что объясняется несколько большей шириной зерен карбида кремния одного и того же номера

зернистости. Известно, что острота лезвия в инструменте предопределяет минимальную толщину снимаемой стружки, т. е. чем меньше радиус закругления, тем меньше может быть достигнута толщина стружки. Так как зерна карбида кремния имеют меньшие радиусы закругления, это также способствует получению лучшей чистоты поверхности при работе кругами из этого материала. На кругах большой твердости при шлифовании чаще образуется налипание (нарос) металла. Твердость нароста может быть значительно больше твердости обрабатываемого металла, что вызывает появление глубоких царапин на шлифуемой поверхности при общей высокой ее чистоте.

Влияет на чистоту поверхности и вид связки шлифовальных кругов. Так, при шлифовании кругами на вулканитовой связке чистота поверхности получается выше, чем при шлифовании кругами керамической и бакелитовой связки. Круги на бакелитовой связке дают худшую чистоту, чем круги на керамической связке. Однако специальные бакелитовые связки, как например, с графитовым наполнителем, или с добавкой идитола, обеспечивают получение более высокой чистоты поверхности, чем при шлифовании кругами на керамической и вулканитовой связках. Так, бакелитовые корундовые круги зернистостью М20 с графитовым наполнителем обеспечивают получение чистоты поверхности 11—13-го классов с обычными режимами шлифования: $v_k = 25 \div 35$ м/сек, $v_d = 10 \div 35$ м/мин, $t = 0,005 \div 0,01$ мм, $s = 0,5 \div 1$ м/мин, охлаждение — вода или эмульсия 3—5 %-ного содового раствора. Однако вследствие большой мягкости эти круги при шлифовании прецизионных деталей не обеспечивают сохранения размерности, достигнутой при предыдущей операции (в пределах десятых долей микрона).

Чем тверже обрабатываемый материал, тем лучше чистота получаемой поверхности. С увеличением в стали содержания углерода, чистота поверхности при шлифовании улучшается.

Д-р техн. наук Н. И. Волский установил, что при шлифовании сталей, имеющих мартенситовую структуру, достигаются меньшие значения $H_{ск}$, чем при шлифовании сталей с трооститовой или сорбитовой структурой. Легированные стали при шлифовании получают меньшие микронеровности, чем нелегированные, так же как закаленные стали, меньше, чем незакаленные. При шлифовании незакаленных сталей в равных условиях с закаленными чистота поверхности получается на два разряда — 1 класс хуже.

При шлифовании вязких металлов и сплавов, в частности жаропрочных, труднее получить такую высокую чистоту поверхности, как при обработке машиноподелочных сталей.

При шлифовании цветных металлов наименьшие значения $H_{ск}$ дают круги на бакелитовой связке, причем чистота поверхности при шлифовании цветных металлов всегда получается хуже, чем у черных металлов при одинаковых условиях шлифования.

Чистота поверхности улучшается с увеличением скорости шлифовального круга и уменьшением величины подач. Она также улучшается при увеличении диаметра и ширины шлифовального круга.

С увеличением скорости детали при неизменных продольной и поперечной подачах, чистота поверхности несколько ухудшается. При одновременном увеличении подач она резко ухудшается.

Увеличение глубины шлифования вызывает рост толщины стружки, в связи с чем чистота поверхности ухудшается. Особенно это ухудшение заметно в зоне малых глубин шлифования (0,005—0,015 мм).

Степень влияния того или другого фактора режима на чистоту в разных случаях шлифования различная и, как мы видели, зависит от весьма многих переменных. Поэтому мы не приводим уравнений, выражающих эту зависимость. Именно по этой причине разные исследователи приходят не всегда к одинаковым выводам. Так, по данным д-ра техн. наук Е. Н. Маслова увеличение глубины шлифования влияет на ухудшение чистоты поверхности в меньшей степени, чем увеличение скорости детали, а по данным канд. техн. наук Д. М. Тарасенко — наоборот.

Шлифование с охлаждением высокоуглеродистых сталей приводит к ухудшению чистоты поверхности по сравнению с сухим шлифованием, но вместе с тем снижает опасность прижога.

Весьма заметно изменение чистоты поверхности шлифуемых деталей при изменении способа и режима правки. При правке с медленной продольной и малой поперечной подачей, при обязательных последних проходах без подачи чистота поверхности значительно повышается, т. е. чем меньше разновысотность зерен, а следовательно, чем больше их число, тем выше чистота поверхности. Также повышается чистота поверхности при выхаживании, т. е. при осуществлении шлифования на последних проходах без поперечной подачи.

В процессе выхаживания улучшается не только чистота поверхности, но и исправляются такие погрешности, как овальность, биение и т. п.

Так как процесс выхаживания, повышая чистоту поверхности, вместе с тем снижает производительность, проф. Г. Б. Лурье предложил метод ускоренного выхаживания за счет принудительного отвода бабки круга на величину, несколько меньшую величины упругого отжатия. Этот метод позволяет сократить время выхаживания на 20—30%, без ухудшения чистоты поверхности. Отсюда возникает вопрос, нужно ли производить выхаживание до исчезновения искр, как это принято обычно в практике. Решать этот вопрос следует в каждом отдельном случае шлифования.

На чистоту поверхности влияет вид и метод абразивной обработки. Так, шлифование методом врезания обеспечивает меньшую чистоту, чем шлифование методом продольной подачи. Хонингование позволяет обеспечить более высокую чистоту, чем внутреннее шлифование и т. д. При суперфинише достигается чистота поверхности 12—13-го класса.

Для повышения чистоты поверхности в суперфинишных станках абразивному инструменту (брускам) придано возвратно-поступательное движение с большим числом колебаний и малой ампли-

тудой. Для этой же цели в станках для врезного шлифования применяется осциллирование круга. Установлено, что осциллирование обрабатываемой детали с определенной частотой при небольшой амплитуде позволяет улучшить чистоту поверхности и уменьшить опасность появления прижогов за счет снижения температуры шлифования. Такие опыты были проведены в Мичиганском университете (США) в условиях плоского шлифования. По результатам этих опытов установлено, что величина напряжений у деталей, подвергнутых шлифованию с осциллированием высокой частотой, значительно меньше, чем при обычном шлифовании. Опыты также показали, что износ абразивного инструмента при этом виде шлифования значительно больше.

НАКЛЕП

Под влиянием сил резания и вызываемого ими давления зерен шлифовального круга, в процессе шлифования происходит пластическая деформация металла, сопровождающаяся упрочнением поверхностного слоя шлифуемой детали и искажением его кристаллической решетки.

Глубина деформируемого слоя при чистовом шлифовании, по данным д-ра техн. наук Н. И. Волского, у незакаленных аустенитовых сталей достигает 0,1—0,25 мм, и у закаленных сталей доходит до 0,2—0,35 мм, причем глубина наклепа получается больше при шлифовании кругами из карбида кремния, чем электрокорундовыми, что объясняется, по-видимому, большим числом зерен и снимаемых стружек при работе этими кругами. Таким образом, увеличение сил резания способствует упрочнению, вызывая увеличение глубины наклепа. Очевидно, этим объясняется тот факт, что глубина наклепа при шлифовании получается в 2—3 раза меньше, чем при фрезеровании и точении. В процессе полирования наклеп получается еще меньше, чем при шлифовании.

Аустенитовые стали более склонны к наклепу, чем другие, и к изменению при этом микроструктуры поверхностного слоя. Увеличение подачи и особенно глубины резания вызывает усиление пластических деформаций и увеличение наклепа. Этому способствует также увеличение числа зерен, принимающих участие в шлифовании, и усиление охлаждения.

Таким образом, при шлифовании мелкозернистыми и тонкозернистыми кругами возрастает не только чистота поверхности, но и глубина наклепа, а отсюда и износоустойчивость.

С увеличением скорости шлифования степень упрочнения поверхностного слоя повышается, что объясняется тем обстоятельством, что одновременно с увеличением скорости шлифовального круга обязательно увеличивается скорость детали и подачи. Если при шлифовании происходит только увеличение скорости шлифовального круга, то глубина наклепа уменьшается, что вызывается уменьшением толщины стружки и сил резания.

При увеличении скорости детали глубина наклепа несколько увеличивается.

При шлифовании одновременно с условиями, вызывающими упрочнение, действуют и условия разупрочнения, мешающие искажению кристаллической решетки металла. В частности, разупрочнение усиливается с увеличением контактной температуры шлифования, что, как известно, нежелательно из-за опасности прижогов, с увеличением степени твердости круга и т. п.

Упрочнение поверхностного слоя сопровождается определенным увеличением его твердости и износоустойчивости. Таким образом, улучшение чистоты поверхности и упрочнение поверхностного слоя в процессе шлифования часто приводят к повышению износоустойчивости деталей.

Вместе с тем при шлифовании закаленных сталей, особенно при тяжелых режимах, в поверхностном слое происходят структурные изменения, связанные с отпуском металла.

Чем выше режимы, тем больше глубина отпущенного слоя, достигающего 0,2 мм, и степень отпуска.

Упрочнение поверхностного слоя и происходящие в процессе шлифования пластические деформации вызывают увеличение удельного объема поверхностного слоя, этому изменению препятствуют нижележащие слои, в результате чего в поверхностном слое возникают сжимающие, а в нижележащем слое растягивающие остаточные напряжения.

Как показали опыты канд. техн. наук Н. А. Подосеновой, возникающие в поверхностном слое остаточные напряжения достигают 40—100 кг/мм² и распространяются на глубину до 0,03 мм. В процессе шлифования поверхности детали все время подвергаются резким изменениям температуры, в результате чего в поверхностном слое возникают то сжимающие (при нагретом состоянии поверхности), то растягивающие (при остывании) напряжения. Знак остаточных напряжений зависит от их разности.

Резкое нагревание поверхностного слоя приводит также к фазовым изменениям его структуры.

ГЛАВА XI

СКОРОСТНОЕ КРУГЛОЕ И ПЛОСКОЕ ШЛИФОВАНИЕ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Скоростным шлифованием условно принято называть обработку металлов со скоростью около 50 м/сек и выше.

Достижение такой скорости обработки стало возможным после того, когда были найдены способы значительного повышения прочности шлифовальных кругов. Повышение прочности шлифовальных кругов было необходимо для обеспечения безопасной работы в условиях резкого увеличения их скорости и ужесточения всего режима шлифования в целом.

При исследовании прочности шлифовальных кругов было установлено, что прочность их возрастает с увеличением степени твердости и уменьшением размеров зерен. Она также зависит от вида связки. В частности, прочность бакелитовых кругов значительно превышает прочность керамических.

Для использования этих свойств кругов первыми были созданы станки для скоростной отрезки металлов бакелитовыми кругами. Затем появились станки для скоростного обдирочного шлифования стальных и чугуновых отливок, зачистки поковок и разных деталей.

Вслед за ними были выпущены станки для скоростного шлифования резьбы, что позволило улучшить стойкость режущей кромки кругов и облегчило решение задачи нарезки и шлифования резьбы малых шагов. На станках для шлифования резьбы допускается работа со скоростью до 65 м/сек, а на отрезных станках — со скоростью до 80 м/сек.

Лишь в последние годы после решения ВНИИАШем и абразивными заводами задачи повышения прочности ряда типоразмеров и характеристик кругов, скоростное шлифование у нас в СССР получило развитие на круглошлифовальных, внутришлифовальных, бесцентровошлифовальных, плоскошлифовальных, шлицешлифовальных и других станках, работающих периферией круга.

Проведенные рядом институтов и заводов (ВНИИАШ, НИАТ, ЭНИИП, автозавод имени Лихачева, завод Калибр, завод имени Свердлова, ГПЗ и др.) экспериментально-исследовательские работы и внедрение скоростного шлифования показали его большую эффективность. Установлено, что применение скоростного шлифования позволяет повысить производительность в 1,2—2 раза и

больше, улучшить чистоту поверхности на два разряда и выше, увеличить стойкость круга между правками в 1,5—3 раза и снизить их расход до 2 раз. Для достижения таких показателей обычно необходимо произвести модернизацию станка, правильно выбрать требующуюся характеристику круга, установить оптимальный режим шлифования и принять необходимые меры для обеспечения безопасности работы.

При увеличении скорости круга возрастает работа по снятию стружек за счет их значительно большего числа, и повышается работа — трение круга о деталь, вследствие чего расходуется больше электроэнергии и возникает большее количество тепла. Однако на каждую стружку приходится меньшее количество тепла и энергии, в результате чего процесс шлифования протекает успешнее. За счет повышения скорости динамическая твердость круга как бы возрастает, уменьшая его износ и сокращая время контакта, что позволяет меньше опасаться прижогов и изменения поверхностного слоя шлифуемой детали.

НОМЕНКЛАТУРА КРУГОВ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Для шлифования со скоростью 45—50 м/сек выпускаются шлифовальные круги диаметром 30—900 мм, разной толщины, на специальных керамических связках, твердостью СМ1 и тверже, зернистостью 46 и мельче из нормального электрокорунда, а из белого электрокорунда зернистостью 36 и мельче, этих же твердостей.

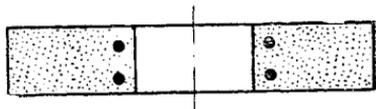
Для скоростного обдирочного и предварительного шлифования изготавливаются круги зернистостью 16—46 и мельче, твердостью С1 и выше на бакелитовой связке из нормального и белого электрокорунда. На этой же и на вулканитовой связках производятся круги для предварительного и окончательного шлифования различных деталей, особенно подшипников, зернистостью 60 и мельче, твердостью СТ и выше, диаметром 80—600 мм.

Из кругов других профилей для скоростного шлифования резьбы, долбяков и т. п. изготавливаются мелкозернистые круги форм 2П и 4П из белого электрокорунда.

Существующая технология и прочность, которую обеспечивают найденные композиции новых связок, не обеспечивают изготовления кругов для скоростного шлифования из карбида кремния, более крупнозернистых и мягких, чем выше указано, а также фасонных профилей, в частности кругов с выточками, хотя прочность этих связок до 60% выше применяемых для обычных кругов. Эта задача стоит еще на разрешении. Вместе с тем следует отметить, что круги из карбида кремния главным образом применяются при заточке твердых сплавов, при которой, как известно, наивыгоднейшей скоростью круга является 12—15 м/сек. Таким образом, для этих кругов задача дальнейшего повышения их прочности не является актуальной. Вместе с тем она является весьма актуальной для электрокорундовых кругов твердостью М2—М3, так как круги этих твердостей довольно широко применяются.

Для отрезных и зачистных работ, которые производятся со скоростями круга до 80 м/сек , в последнее время изготавливаются круги на бакелитовой связке с заформованными внутри них 2—3 и более прокладками из прочной ткани, например нейлона, капрона и т. п., что резко повышает их прочность

В обдирочные круги для скоростного шлифования на бакелитовой связке в целях увеличения степени безопасности, в случае разрыва их, часто заформовываются один или два железных кольца (фиг. 70). Назначение этих колец заключается в удерживании кусков круга от разлета в случае его разрыва. Механическая прочность круга, как показывает расчет, при наличии в нем железного кольца остается такой же, а не увеличивается за счет этого, как предполагают некоторые потребители кругов.



Фиг. 70. Обдирочный круг с предохранительными кольцами.

В связи с тем, что круги для скоростного шлифования должны обладать механической прочностью, более чем в 1,5 раза превосходящей прочность кругов, применяемых для шлифования при обычных скоростях, к их производству предъявляются более жесткие требования. В частности, предельно-допустимый дисбаланс для этих кругов должен быть не более третьего класса. Эти круги не должны иметь непараллельности плоскостей и эксцентриситета отверстия сверх допустимых величин, меньших чем для обычных кругов.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧ НА ПОКАЗАТЕЛИ СКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Вопросами выяснения зависимостей, существующих между скоростью резания и подачами процесса шлифования, с одной стороны, и производительностью, износом и чистотой шлифуемой поверхности, с другой стороны, занималось много исследователей. В результате этих работ было установлено, что при работе круга со скоростью до 35 м/сек :

а) с увеличением скорости круга удельная производительность возрастает за счет уменьшения износа круга, чистота шлифуемой поверхности улучшается, расход энергии возрастает;

б) с увеличением глубины резания удельная производительность уменьшается за счет увеличения износа круга, чистота поверхности ухудшается, расход энергии уменьшается.

За годы пятой пятилетки ряд советских исследователей (Карташев А. М., Кузнецов И. П., Маслов Е. Н., Лурье Г. Б., Наерман М. С., Шальнов В. А., Ящерицын П. И. и др.) расширили изучение этих зависимостей, что позволило установить их для разных процессов шлифования при скоростях резания до 50 и даже до 75 м/сек .

Анализ этих работ и заводского опыта скоростного шлифования позволяет сделать ряд выводов, знание которых необходимо для внедрения скоростного шлифования.

Увеличение скорости круга при неизменных прочих параметрах режима шлифования вызывает улучшение чистоты поверхности, как минимум, на два разряда, уменьшает износ круга (на 10—20%) и повышает его стойкость, и за счет этого повышает удельную производительность.

Удельный расход энергии, затрачиваемой на шлифование, при этом возрастает, так как число снимаемых стружек увеличивается пропорционально увеличению скорости круга.

Вместе с тем при этом несколько увеличивается (на 5—20%) и производительность шлифования, т. е. съем металла в единицу времени. Это явление объясняется тем, что с увеличением скорости круга величина отжатия системы: станок — круг — деталь уменьшается в связи с уменьшением сил резания, возникающих при скоростном шлифовании.

С увеличением скорости круга при одновременном увеличении скорости детали и неизменной s мм/об производительность возрастает, причем степень этого роста увеличивается при шлифовании с большей глубиной резания. Износ круга и удельный расход энергии с повышением скорости детали также возрастает. Чистота поверхности с увеличением скорости детали ухудшается, однако в меньшей степени, чем она улучшается за счет увеличения скорости круга. Так, увеличение скорости детали в 2 раза ухудшает чистоту поверхности на один разряд, в то время как увеличение скорости круга повышает ее на два разряда. При этом опасность прижога меньше, чем при увеличении других подач.

Ухудшение чистоты поверхности с увеличением скорости детали объясняется следующими факторами. С увеличением скорости круга кинетическая энергия возрастает, вследствие чего круг и деталь испытывают увеличивающееся действие упругих деформаций.

С увеличением скорости детали сила удара, а вместе с тем и толщина стружки, еще более возрастают, вследствие чего каждое зерно круга скорее изнашивается и обламывается, увеличивая износ круга и ухудшая чистоту поверхности. В этом заключается основное влияние увеличения скорости детали.

При увеличении скорости круга с одновременным увеличением глубины резания t в мм/дв. ход и при неизменной продольной подаче s мм/об производительность и износ круга заметно возрастают. Удельная производительность при небольших подачах на глубину растет, а затем при больших подачах на глубину, в связи с резким увеличением износа круга, падает. Чистота поверхности с увеличением скорости круга, несмотря на отрицательное воздействие роста подачи на глубину, несколько улучшается. Удельный расход энергии уменьшается.

С увеличением продольной подачи чистота поверхности ухудшается, а производительность повышается.

Увеличение скорости круга вызывает уменьшение степени упрочнения поверхностного слоя шлифуемой детали. Вместе с тем при одновременном увеличении скорости круга и скорости детали степень упрочнения повышается и даже превосходит получаемую при шлифовании на обычных скоростях. При этом глубина структурных изменений поверхностного слоя при скоростном шлифовании меньше, чем при обычном.

Таким образом, при скоростном шлифовании имеют место те же зависимости, что и при шлифовании на обычных скоростях. Это позволяет утверждать, что при дальнейшем повышении скорости круга будут иметь место те же зависимости.

ОПЫТ СКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

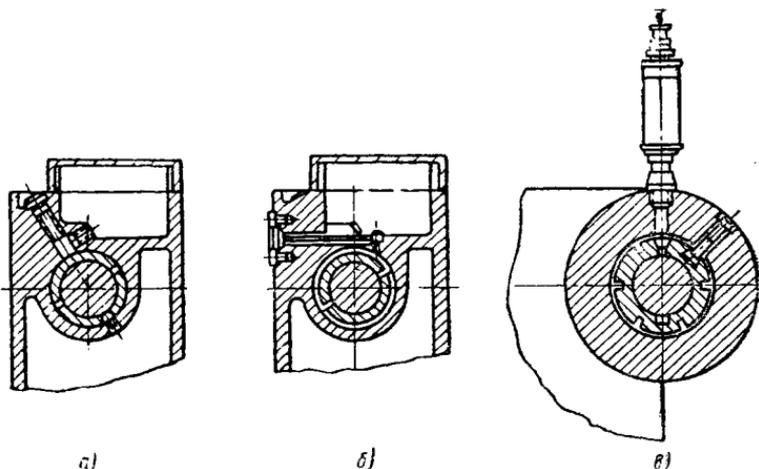
Для внедрения скоростного шлифования прежде всего необходимо несколько модернизировать шлифовальный станок, так как существующие конструкции станков часто не позволяют повысить скорость круга до необходимой, имеют недостаточную мощность привода и большей частью требуют ее увеличения, часто требуют усиления конструкции кожуха и устройства приспособлений, предохраняющих от разбрызгивания охлаждающей жидкости. Необходимо также проверить расчетом на удельное давление, допускают ли подшипники шпинделя станка повышение числа его оборотов, и установить потребный вид смазки. Необходимо также установить: достаточность и, если надо, увеличить число оборотов шлифуемой детали, достаточность количества подаваемой охлаждающей жидкости, жесткость конструкции станка и отбалансированность планшайбы и шлифовального круга.

Повышение скоростей круга в большинстве конструкций станков может быть достигнуто заменой шкивов, а повышение мощности шлифовальной бабки заменой электродвигателя другим, настолько более мощным, насколько повышается скорость круга, обычно в 1,5 раза. Увеличение числа оборотов деталей в необходимых пределах почти на всех шлифовальных станках достигается без модернизации коробки скоростей. Должна быть проверена и обеспечена возможность увеличения продольной подачи соответственно увеличению скорости детали.

Существующие конструкции механизмов поперечной подачи, как правило, на всех типах шлифовальных станков обеспечивают ее увеличение в больших пределах, и поэтому модернизацию этого узла производить не требуется.

Обязательным условием при переводе шлифовальных станков на скоростное шлифование является наличие принудительной обильной смазки подшипников. В целях уменьшения нагрева и сохранения минимально возможных зазоров в подшипниках (0,1—0,03 мм) при скоростном шлифовании следует применять низковязкую смазку с добавкой керосина до 50%, уменьшающую количество тепла, выделяемого в подшипниках. Нормальной температурой корпуса подшипников считается 50—60°.

Для обеспечения минимального зазора, сплошного слоя смазки и нормальной температуры необходимо тщательно отшлифовать шейки шпинделя шлифовального круга, довести их и пришабрить подшипники. Завод им. С. Орджоникидзе при переходе на скоростное шлифование добивался, чтобы эллипсность и биение шеек шпинделя и соосность подшипников не превышали 0,005 мм. У шлифовальных станков, не имеющих циркуляционной смазки, подшипники и система смазки должны быть модернизированы. При этом следует учесть рекомендацию проф. А. К. Зайцева и опыт станкостроительного завода им. С. Орджоникидзе по расположе-



Фиг. 71. Подшипники:

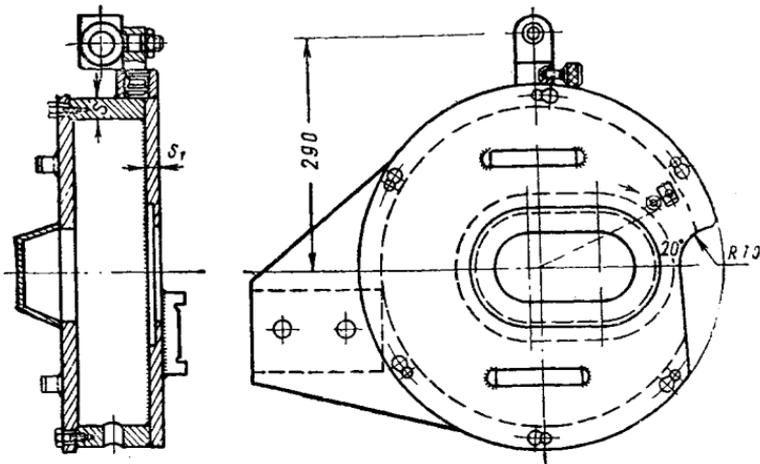
а и *б* — разрезы подшипника круглошлифовального станка мод. 3151, *в* — то же круглошлифовального станка мод. 3Г12.

нию смазочных канавок. На фиг. 71 приведена конструкция подшипников круглошлифовальных станков мод. 3151 и 3Г12 с циркуляционной и капельной смазкой, широко применяющихся в промышленности. Для скоростного внутреннего шлифования рекомендуется применять электрошпиндели, позволяющие достичь необходимое число оборотов.

Так как с увеличением скорости круга растет опасность его разрыва и увеличивается энергия удара, кожухи станков, переводимых на скоростное шлифование, как правило, должны заменяться более прочными, способными выдержать без разрушения удары осколков круга в случае его разрыва. При выполнении кожухов из листовой стали ЭНИМС рекомендовал брать толщину периферийных стенок S на 40—50% больше, чем это рекомендовано ГОСТом для кругов, работающих со скоростью 35 м/сек (фиг. 72). Толщина боковых стенок кожухов S_1 при этом остается неизменной. Эти рекомендации не соответствуют указаниям ГОСТа 3881-53 о том, что «для кругов, работающих с окружной скоростью более 35 м/сек, толщина стенок защитного кожуха должна быть увеличена по расчету». В последующем эти предложения были изменены, и ис-

пытания прочности кожухов подтвердили их приемлемость. В приложении № 5 приведены таблицы минимально допустимых толщин стенок кожухов станков, работающих со скоростью до 50 м/сек. Кожух должен быть максимально закрытым во избежание вылета осколков за его пределы. В связи с износом круга в процессе работы и правки конструкция кожуха должна быть подвижной, чтобы обеспечивать минимально возможное расстояние (1,0—2,0 мм) между периферией круга и кожухом.

Крепление кожуха к станку должно быть усилено. Круг должен тщательно балансироваться как перед установкой на станок,



Фиг. 72. Кожух шлифовального станка с малым углом раскрытия.

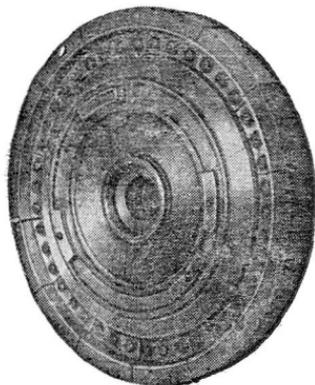
так и во время работы, так как с увеличением скорости вибрации возрастают, что затрудняет внедрение скоростного шлифования, особенно на станках с кругами больших диаметров (750 мм и выше).

При скоростном шлифовании, несмотря на лучшую вентиляруемость и охлаждение круга и детали, во избежание прижогов количество подаваемой охлаждающей жидкости увеличивается до 25—50 л/мин, для чего, в случае необходимости, насос заменяется более производительным. При этом вследствие повышения скорости круга охлаждающая жидкость подвергается большему разбрызгиванию, чем при обычном шлифовании. В целях уменьшения разбрызгивания и лучшего направления струи охлаждающей жидкости в место контакта круга с деталью, а также для предохранения рабочего от его воздействия на кожух круга и на стол станка устанавливаются специальные козырьки и щитки. В этих же целях в кожухе с задней его стороны делается отверстие, через которое удаляется часть жидкости и воздуха.

Для регулирования струи охлаждающей жидкости сопло делается шарнирным, причем ширина его делается равной ширине круга.

При выборе вида охлаждающей жидкости для скоростного шлифования следует учитывать, что при увеличении скорости обработки развивается большое количество тепла, поэтому жидкость должна прежде всего обладать высокими охлаждающими свойствами, для чего в эмульсии должно содержаться не более 2% минерального масла.

ЭНИИПП, проводя опыты по скоростному шлифованию колец подшипников из стали ШХ15, нашел, что лучшей охлаждающей жидкостью является жидкость, состоящая из 5—7 г/л триэталонамила и 2,5 г/л нитрита натрия.



Фиг. 73. Шлифовальный круг с приклеенными сегментами.

При выборе характеристики круга для скоростного шлифования следует руководствоваться теми же правилами, что и для обычного шлифования, т. е. сохранять ту же характеристику кругов или брать их на одну степень мягче.

Хорошие результаты при скоростном шлифовании дают круги с открытой структурой. Однако в связи с меньшей прочностью, чем у кругов средних структур, и возможными разрывами, применение их для скоростного шлифования не рекомендуется. Также не следует применять для скоростного шлифования сегментные круги (фиг. 73), в связи с возможностью отрыва сегментов и меньшей

однородностью таких кругов по сравнению с цельными. При плоском скоростном шлифовании, во избежание прижогов, твердость круга обязательно надо брать на одну степень меньше.

При определении режимов шлифования следует исходить из указанных выше зависимостей.

В большинстве случаев при скоростном шлифовании методом продольной подачи пропорционально скорости круга увеличивают скорость детали, при сохранении постоянной продольной подачи на оборот. При шлифовании методом врезания вместе со скоростью круга и детали увеличивают глубину шлифования.

При увеличении глубины шлифования увеличивается склонность круга к большому износу за счет увеличивающихся сил шлифования, кроме того, возникает большая опасность прижога, в то время как увеличение скорости детали, наоборот, благоприятно действует на процесс шлифования.

Большое повышение скорости детали могут вызвать вибрации. Поэтому режимы скоростного шлифования следует устанавливать для каждого случая, исходя из фактических условий и возможностей, даваемых станком.

Правку кругов при скоростном шлифовании ведут теми же правящими инструментами и при тех же режимах, сокращая на один-два числа проходов. Скорость правящего круга при правке методом шлифования должна быть равна скорости шлифуемой

детали. Скорость выправляемого шлифовального круга должна соответствовать его рабочей скорости.

Опыт внедрения скоростного шлифования на плоскошлифовальной станке МСЗ 372 на заводе Калибр показал, что получение той же и даже более высокой на 1—2 класса чистоты поверхности может быть достигнуто шлифовальными кругами более крупной зернистости по сравнению с теми же характеристиками, которые применялись при обычном шлифовании. Так, при шлифовании рамок штангенциркулей при нормальной скорости 25 м/сек, когда применялись круги ЭБ 46 С1 К, достигалась чистота поверхности класса 7а при стойкости круга между правками 120—180 деталей. При шлифовании этих же деталей со скоростью 50 м/сек кругами Э 24 СМ2К была достигнута чистота поверхности класса 8а—8б при стойкости 180—240 деталей, а при шлифовании кругами Э 24 С1 Б была получена чистота класса 8б—9а при стойкости 180—240 деталей. Вместе с тем была установлена необходимость более быстрой замены подшипников шпинделя круга (после 20 смен работы станка).

Переход плоскошлифовальных станков на скоростное шлифование осложняется, как правило, необходимостью перемотки статора электродвигателя.

Переход на скоростное обдирочное шлифование на станках маятникового типа и других позволяет повысить производительность до 20% и настолько же снизить расход кругов.

При скоростном внутреннем шлифовании также имеет место повышение производительности и стойкости кругов. Однако перевод внутришлифовальных станков на более высокие скорости сдерживается недостатком числа оборотов выпускаемых электрошпинделей.

При скоростном бесцентровом шлифовании также достигается высокий эффект. Так, при переводе роликов на скоростное шлифование на I ГПЗ производительность увеличилась на 60% и стойкость круга в 2—3 раза.

При переводе на скоростное (круглое, бесцентровое и сферическое) шлифование ряда тракторных деталей на Челябинском тракторном заводе производительность повысилась на 30—35% и стойкость в 1,3—2 раза.

В тех случаях, когда при скоростном шлифовании стремятся достигнуть более высокой чистоты поверхности, чем при обычном шлифовании, величину подач можно увеличивать не пропорционально увеличению скорости круга, а в 1,5 раза больше, что на столько же увеличивает производительность.

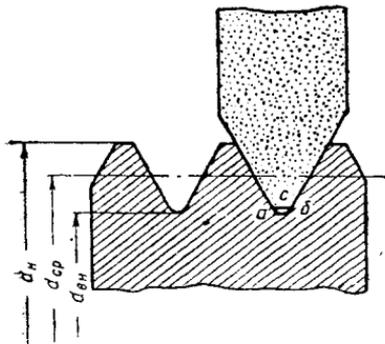
Опыт скоростного шлифования показывает, что эффективность от его применения тем выше, чем меньше отношение вспомогательного времени к машинному, т. е. так же, как и при обычном шлифовании.

Как правило, резьбовой инструмент и резьбовые детали подвергаются термической обработке, в процессе которой резьба получает некоторое искажение своего профиля. Поэтому все резьбовые детали и инструменты после термической обработки подвергаются шлифованию.

В настоящее время резьбошлифование осуществляется однониточными и многониточными кругами. Очень часто на резьбошлифовальных станках резьба не только шлифуется, но и нарезается целиком.

По сравнению с большинством других видов шлифования при резьбошлифовании шлифовальный круг находится особенно в трудных условиях.

Эти условия определяются прежде всего характером самой шлифовальной операции и отсюда профилем круга, характером шлифуемой детали и ее профилем, высокими требованиями к точности и качеству поверхностного слоя — полное отсутствие прижогов при чистоте поверхности не менее 8-го класса — наличием большого контакта соприкосновения между кругом и деталью, плохим теплоотводом из-за малых размеров деталей и трудными возможностями для проникновения охлаждающей жидкости в контакт между кругом и деталью.



Фиг. 74. Шлифование метрической резьбы.

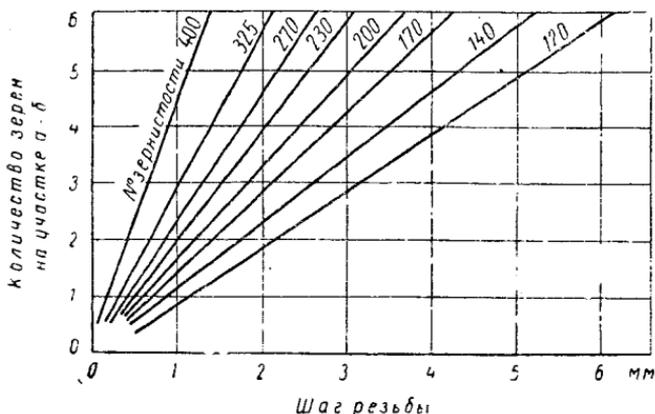
При резьбошлифовании применяются обычно круги диаметром 350—500 мм. Толщина резьбошлифовальных однониточных кругов этих диаметров обычно равна 8—10 мм. Фактически все однониточные круги работают со значительно меньшей толщиной. Чем меньше шаг шлифуемой резьбы, тем меньше толщина и высота профиля круга, используемые для шлифования. Приблизительно максимальная толщина и высота профиля круга, производящие работу шлифования, соответственно равны величине шага s и глубине нарезки $\frac{d_n - d_{вн}}{2} = t_1$ (фиг. 74). Радиус закругления при вершине нарезки резьбы зависит от ее шага, у метрических резьб он, как известно, равен $r = 0,0631 s$. Для обеспечения такого радиуса на детали круг должен иметь вершину, заостренную под соответствующий радиус, измеряемый сотыми или десятными долями миллиметра.

Таким образом, в резьбошлифовании участвует относительно небольшое и во много раз меньшее, чем при других видах шлифования, число зерен, что и является его особенностью.

Условия работы зерен, расположенных на скошенных под углом 55—60° торцах круга и его периферийной части, различные.

Зерна, находящиеся на скошенной части, в силу своего расположения лучше закреплены в связке и меньше нагружены, чем зерна, расположенные на периферийной части, поэтому они больше изнашиваются.

Исследуя процесс резбошлифования, В. Д. Глясс (ВНИИАШ) пришел к выводу, что для придания вершине круга нужного профиля необходимо, чтобы на отрезке *аб* (фиг. 74) находилось несколько зерен, и приводит график (фиг. 75) числа зерен, находящихся на этом участке у кругов разной зернистости в зависимости от шага резбьы. Из этого графика видно, что даже при применении для шлифования резбьы с шагом 0,5 мм круга зернистостью



Фиг. 75. График зависимости числа зерен на участке *аб* от степени зернистости круга.

M28 на участке *аб* будет максимум два зерна, что явно недостаточно для обеспечения стойкости кромки круга. При таком числе зерен они скреплены друг с другом хуже, чем при большем числе. Из фиг. 74 видно, что зерно *с* закреплено лучше, чем зерна *а* и *б*. Поэтому минимальное число зерен на участке *аб* для обеспечения стойкости вершины круга должно быть не менее трех. В этих же целях стремятся к увеличению диаметра шлифовального круга и, таким образом, к увеличению числа зерен, принимающих участие в резании, и к сохранению стойкости кромки на возможно большем протяжении по периферии круга. Стойкость круга зависит от диаметра круга, шага резбьы и характеристики круга.

Увеличить стойкость круга можно было бы за счет увеличения его твердости. Однако опасность прижога, особенно вершин резбьы, не позволяет идти по этому пути. Увеличение твердости вместе с тем вызывает и некоторое снижение производительности. Исходя из этого, для шлифования резбьы с малым шагом, наряду с кругами на керамической связке, применяют круги на специальной вулканитовой связке СКН, обеспечивающей лучшее удержание зерен и стойкость кромки, и более твердые круги, чем для шлифования резбьы крупных шагов.

Ниже приведена табл. 20 выбора шлифовальных кругов для одноступенчатого резьбошлифования деталей из углеродистой стали, учитывающая опыт заводов.

Таблица 20

Выбор характеристики шлифовальных кругов для одноступенчатого резьбошлифования

Шаг резьбы	Рекомендуемая характеристика круга		
	для предварительного шлифования	для окончательного шлифования	для шлифования за одну операцию
Свыше 0,25 до 0,5 .	ЭБМ28 СТ2-СТЗК	ЭБМ20 СТ2-СТЗК	КЗ 280-М28 СТ2-Т1 СКН
Свыше 0,5 до 0,7 .	ЭБМ28 С2-СТ1К	ЭБМ28 СТ2-СТЗК	—
Свыше 0,7 до 1,0 .	ЭБМ40 С2-СТ1К	ЭБМ28 СТ1-СТ2К	—
Свыше 1,0 до 1,5 .	ЭБ280 С1-С2К	ЭБМ40 С1-С2К	—
Свыше 1,5 до 2,0 .	—	—	ЭБ280 С1-С2К
Свыше 2,0 до 2,5 .	—	—	ЭБ230 СМ2 С1К
Свыше 2,5 до 4,0 .	—	—	ЭБ230 СМ1-СМ2К
Свыше 4,0 до 5,0 .	—	—	ЭБ180 СМ1К
Свыше 5	—	—	ЭБ150-170 СМ1К

Круги на связке СКН, предназначенные к выполнению той же работы, что и круги на керамической связке, имеют зернистость на одну-две степени крупнее.

Возможность применения кругов более крупной зернистости объясняется технологией их изготовления. Круги на связке из синтетического каучука, как известно, изготавливаются прокаткой, в процессе которой происходит измельчение зерен — наименее прочные зерна раскалываются и располагаются в теле круга по большей своей оси, т. е. параллельно торцовым поверхностям. Такое расположение зерен позволяет разместиться на единице площади их большему числу, что и обеспечивает большую производительность кругов на этой связке.

Радиусы вершин зерен зернистости М40 примерно равны 3,65 мк, а зерен М28 около 2,7 мк, т. е. прочность вершин зерен зернистости М40 больше чем М28, что также способствует более устойчивой работе кругов.

При многоступенчатом шлифовании выбирают круги на 1—2 степени твердости мягче, чем для одноступенчатого шлифования, и на 1—2 степени зернистости мельче. При шлифовании резьбы на деталях из быстрорежущей стали круги берут на одну степень мягче, чем при шлифовании углеродистой стали, и часто применяют круги из карбида кремния зеленого.

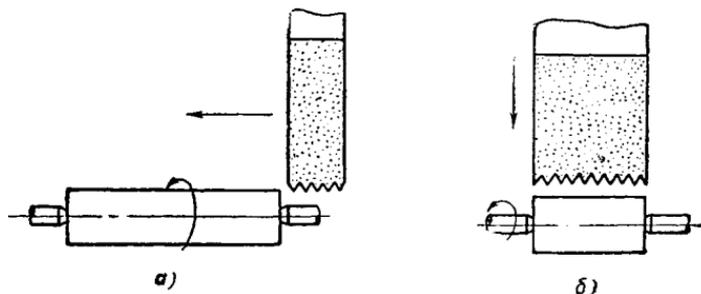
Для нарезки резьбы по целому с шагом больше 2 мм надо применять шлифовальные круги зернистостью крупнее чем М40.

Учитывая указанные выше особенности резьбошлифования и увеличение применения резьб с малыми шагами, выпускаемые в последние годы резьбошлифовальные станки, как наших отечественных заводов, так и иностранных фирм, рассчитывают на ра-

боту с большими скоростями круга 62—67 м/сек, в то время как раньше выпускались станки для работы со скоростью до 35 м/сек.

Процесс одноконтурного резбошлифования следует вести при автоматической поперечной подаче с большой скоростью детали (до 10 м/мин и больше) и с малой глубиной резания, снимая весь припуск за 10—30 проходов. Такой способ шлифования резьбы является менее опасным для образования прижогов, особенно вершин резьбы, где происходит концентрация возникающих тепловых напряжений. Фактически работают при более высоких режимах, что и является главной причиной прижогов.

При ручной поперечной подаче резбошлифование производится обычно с небольшой скоростью детали 0,2—2 м/мин и с боль-



Фиг. 76. Способы многоконтурного шлифования.

шой глубиной резания — за два-три черновых и один чистовой проход. Наибольшая производительность достигается при скорости детали 1—1,5 м/мин, однако этот способ является менее производительным и более опасным для образования прижогов, чем способ автоматической поперечной подачи.

Многоконтурное шлифование осуществляется способом продольной (фиг. 76, а) или радиальной подачи (фиг. 76, б). Способ продольной подачи применяется при шлифовании резьб, длина которых превышает высоту круга.

Многоконтурное шлифование способом продольной подачи до 2 раз и способом радиальной подачи до 10 раз производительнее одноконтурного и в последнее время все шире применяется при шлифовании резьбы с шагом до 2 мм.

Режимы резбошлифования зависят прежде всего от шага резьбы и отсюда от характеристики и стойкости круга. Основным фактором, по которому судят о возможности проведения того или другого режима, является появление прижога.

Режим можно повышать до тех пор, пока достаточна стойкость круга, отсутствуют прижоги и выполняются заданные требования к точности и чистоте шлифуемой поверхности. С увеличением скорости детали опасность прижога снижается, поэтому ее следует увеличивать, но при этом необходимо снижать поперечную подачу, особенно на последних проходах. Вместе с тем скорость детали связана с допуском на шаг. Чем меньше допуск, тем меньше

должна быть скорость детали. Поэтому метчики и калибры следует шлифовать с меньшей скоростью, чем крепежные резьбы. Скорость детали связана также со стойкостью кромки круга. В случаях, когда профиль вершины круга из-за его износа быстро нарушается, необходимо уменьшать скорость детали и увеличивать скорость круга. С уменьшением диаметра круга скорость детали должна снижаться для уменьшения интенсивности съема металла в единицу времени и повышения стойкости круга. С уменьшением диаметра детали режимы шлифования следует снижать.

При шлифовании резьб с большим шагом режим может быть выше, чем при шлифовании резьб с малым шагом. Более низкие режимы (на 30—40%) также должны применяться при шлифовании резьбовых инструментов из быстрорежущих сталей. При многониточном шлифовании методом радиальной подачи весь процесс совершается за 2—4 оборота. Стойкость круга при предварительном однониточном шлифовании обычно равна 10—15 мин. и при чистом шлифовании 5—7 мин. Стойкость кругов для многониточного шлифования доходит до 15—25 мин. Чем выше режим шлифования, тем меньше стойкость круга, тем больше опасность прижога, что совершенно недопустимо для резьбового инструмента. Режим шлифования, стойкость круга, жесткость и точность станка определяют и возможную точность шага резьбы. Точность, достигаемая при однониточном шлифовании, больше, чем при многониточном.

Как показали опыты ВНИИАШ, на точность шага резьбы значительное влияние оказывает также время, прошедшее с момента пуска станка до начала шлифования.

Опытами, проведенными на станке фирмы Экселло, установлено, что в течение 4 час. с момента пуска станка происходит осевое перемещение шпинделя бабки круга за счет постепенного нагрева подшипников. За это время перемещение составило 25 мк. После остановки станка шпиндель вернулся в прежнее положение через такое же время.

Большое значение на точность и чистоту имеют метод и режимы правки. Как правило, перед окончательным шлифованием резьбы круг выправляется алмазом с малой подачей.

Многониточные шлифовальные круги профилируют при помощи накатного ролика из быстрорежущей стали, монтированного на специальном приспособлении, при скорости круга 75—100 об/мин. Накатка производится при определенном давлении ролика на шлифовальный круг, порядка 8—12 кг/см², при непрерывном охлаждении и смывании снимаемого абразива.

На срок службы ролика и качество правки большое влияние оказывает время правки, которое подбирается в зависимости от характеристики круга и шага резьбы, как это видно из приведенных табл. 21 рекомендаций ВНИИАШа.

Круги на бакелитовой и вулканитовой связках накатке роликом не поддаются и потому для многониточного шлифования не применяются.

Режимы накатки многониточных кругов

Наименование операции	Составляющие режима	Шаг резьбы в мм			
		0,75	1,0	1,5	2,0
Предварительная накатка	Глубина врезания ролика в мм за 1 цикл	0,02	0,02	0,02	0,02
	Количество циклов	25	33	49	65
	Время 1 цикла в мин.	4	4	5	5
Окончательная накатка	Глубина врезания ролика в мм за 1 цикл	0,01	0,01	0,01	0,01
	Количество циклов	4	4	8	8
	Время 1 цикла в мин.	3	3	3	3
	Общее время накатки в мин.	112	144	269	349

ГЛАВА XII

ПРОЦЕССЫ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ОТДЕЛКИ

Требования к точности и чистоте поверхности деталей машин непрерывно возрастают, в связи с этим процессы окончательной отделки получают все большее применение.

Широкое распространение получили следующие процессы окончательной отделки: хонингование, доводка, суперфиниш, жидкостное полирование, ленточное полирование и полирование, полирование гибкими, фетровыми и другими кругами.

Первые два процесса применяются для достижения необходимой точности и чистоты поверхности, остальные главным образом для улучшения внешнего вида и чистоты поверхности.

При назначении высокого класса чистоты поверхности всегда следует помнить, что ее достижение увеличивает себестоимость машины, поэтому назначение того или другого класса следует тщательно взвесить.

ХОНИНГОВАНИЕ

Хонингование является чистовой абразивной операцией, посредством которой может быть достигнута высокая точность обрабатываемой детали и высокая чистота поверхности.

Характерным отличием хонингования является большая площадь контакта абразивного инструмента с обрабатываемой деталью.

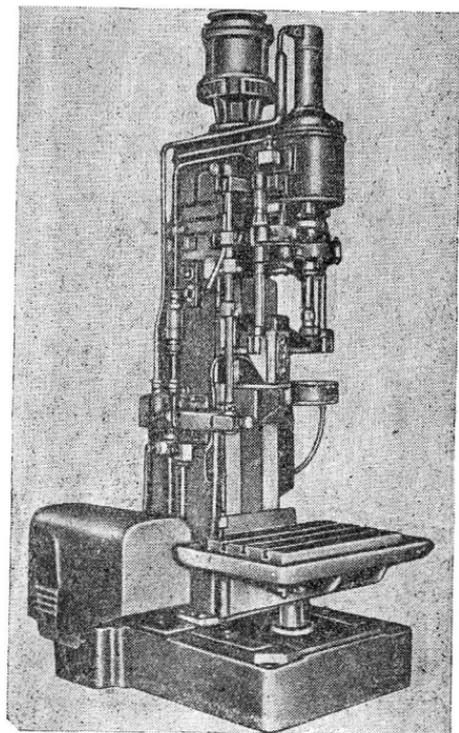
Процесс хонингования осуществляется на вертикальных и горизонтальных станках мелкозернистыми абразивными брусками, укрепленными в специальной хонинговальной головке. Головка, соединенная шарнирно со шпинделем станка, получает одновременно вращательное и возвратно-поступательное движения; подача на глубину резания осуществляется за счет радиального раздвижения брусков. В процессе этих движений вся хонингуемая поверхность покрывается мельчайшей сеткой следов абразивных зерен (фиг. 77); в результате этого уничтожаются неровности, созданные при предыдущих проходах, что и позволяет при помощи этого процесса добиваться высокой чистоты поверхности до 12-го класса и точности до 2-го класса включительно. Вместе с тем при помощи хонингования может быть снят довольно большой припуск — до 0,5—0,6 мм.

Процесс хонингования применяется для обработки наружных и главным образом внутренних поверхностей отверстий (диаметром от 5 до 1300 мм и длиной до 20 м), различных деталей машин, приборов, аппаратов. Хонингуются детали из стали, чугуна, алюминия, бронзы и т. п.

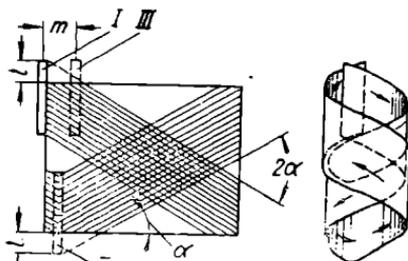
На фиг. 78 показана конструкция одного из современных вертикальных хонинговальных станков, выпускаемых станкостроительным заводом им. В. И. Ленина. Эти станки позволяют обрабатывать детали с диаметрами отверстий от 85 до 160 мм.

Станки имеют хонинговальные головки с пружинными и гидравлическими устройствами для разжимания брусков, которые должны обеспечить равномерный разжим брусков.

На фиг. 79, а, б показаны конструкции хонинговальных головок для глухих и открытых отверстий, в которых корпус является жестким, а на фиг. 80 приведена головка конструк-



Фиг. 78. Общий вид хонинговального станка мод. 383.

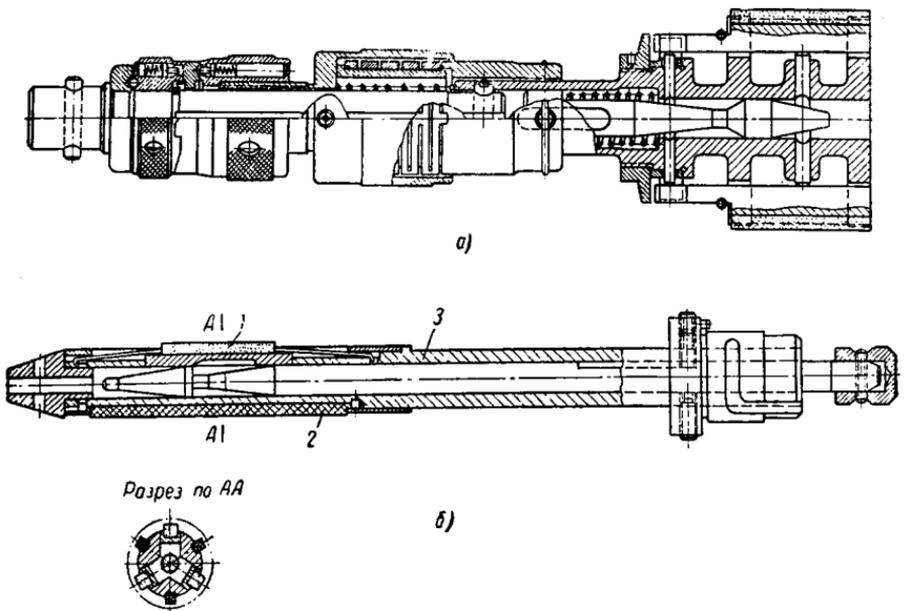


Фиг. 77. Траектория движения бруска в процессе хонингования отверстия:

I — начальное положение бруска; *II* — положение бруска в конце хода вниз; *III* — положение в конце хода вверх; *l* — перебег брусков; *m* — перекрытие; α — угол сетки.

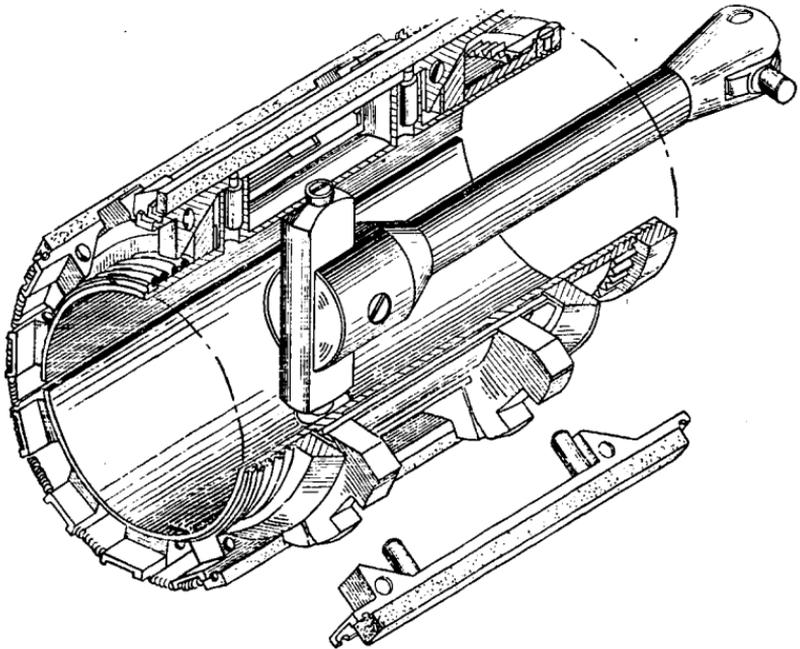
ции Серяева с разрезным корпусом, имеющая два шарнира, благодаря чему они хорошо самоустанавливаются в отверстиях.

Применение головки конструкции Серяева обеспечивает повышение точности хонингуемого отверстия и позволяет применять для получения той же чистоты поверхности бруски с более крупной зернистостью (280—М40 вместо М28—М20). Как показал опыт, хонингование этой головкой цилиндров из стали 30ХГСА и 30ХГСНА требует, за счет более крупной зернистости брусков, значительно меньшего времени (до 3 раз) и обеспечивает получение чистоты 10-го класса при точности по конусности 0,02 мм и эллипсности в 0,01—0,02 мм.



Фиг. 79. Конструкции хонинговальной головки с жестким корпусом для обработки:

а — глухих отверстий; *б* — для открытых ствертей; 1 — бруски абразивные; 2 — бруски направляющие текстолитовые; 3 — стержень для разжима.



Фиг. 80. Конструкция хонинговальной головки с разрезным корпусом.

Число брусков в головке зависит от конструкции хонинговальной головки, диаметра и длины обрабатываемых отверстий. Обычно это число кратно трем и при однорядном расположении в головке равно 3—24 брускам. В вертикально-хонинговальных станках применяют головки с однорядным расположением брусков; в станках горизонтальных для глубоких отверстий с двумя и более рядами.

Сечение и длина брусков зависят от диаметра и длины отверстий. В настоящее время в соответствии с ГОСТом 2424-52 главным образом применяются бруски форм БХ и БХВ сечением от $3,5 \times 3,5$ до 14×14 мм и длиной от 35 до 150 мм на керамической, бакелитовой и бакелито-идитоловой связках из карбида кремния зеленого или из белого электрокорунда.

Крепление брусков в оправках головки производится различными клеями. Хорошим клеем является целлулоидный, состоящий из 25—30% целлулоида и 75—70% (по объему) ацетона, являющегося растворителем целлулоида. После приклейки бруски должны лежать в оправках не менее 3 час.

Следует выбирать такой вид клея, который не изменял бы твердости брусков, что обычно случается при применении в клее большого количества бакелита.

Не рекомендуется применять для крепления брусков цементно-бакелитовые смеси, пластмассы, а также производить закрепление способом заливки свинцом и суриком.

В последнее время применяется крепление брусков в оправках плоскими пружинами, прочно прижимающими бруски, и, таким образом, сокращающими вспомогательное время на приклейку.

При выборе характеристики брусков для хонингования следует учитывать, что с увеличением крупности зерен твердость брусков надо брать выше, чем для брусков более тонкой зернистости. Характеристики брусков выбирают в зависимости от рода и свойств обрабатываемого материала, требуемой чистоты и условий обработки. Чем выше требуется чистота поверхности, тем мельче должна быть зернистость брусков для операции окончательного хонингования.

В последнее время для хонингования стальных деталей помимо брусков на керамической связке широко применяются бруски на бакелитовой и бакелито-идитоловой связках.

Следует отметить, что хонингование деталей из чугуна также успешно ведется брусками на бакелитовой связке. Бруски на бакелитовой связке дают по сравнению с керамическими брусками той же характеристики более высокую производительность, меньший износ и более высокую чистоту поверхности.

Как исключение, при хонинговании стальных деталей часто применяются бруски из карбида кремния зеленого, хотя при других видах шлифования стали применяют абразивные инструменты из электрокорунда.

Для предварительного хонингования стальных деталей применяют бруски КЗ100-200СМ1—С1К или ЭБ80—150СТ2—СТЗ Б 5—7 структуры, что обеспечивает получение чистоты 8—9-го класса.

Для окончательного хонингования стальных деталей применяют бруски ЭБ280—М28С1—СТ2 БИ или КЗМ40—М28СМ1—СМ2 К 8—9 структуры, что обеспечивает получение чистоты 9—11-го класса.

Для предварительного хонингования деталей из чугуна твердостью $H_B = 145 \div 190$ применяют бруски КЗ80—180СТ2—СТ3 Б, что обеспечивает получение поверхности 7—8-го класса чистоты и для окончательного хонингования бруски КЗ280—М40 С1—СМ2 БИ, что обеспечивает получение поверхности 8—9-го класса чистоты. Предварительное хонингование алюминиевых сплавов производится брусками Э 100—120 С2—СТ1 СК.

Качество хонингования в значительной степени зависит от выбранной характеристики кругов, но в еще большей степени от установленного режима работы, величины припуска и прочности обрабатываемого материала.

Припуск на хонингование, в зависимости от метода предшествующей обработки, материала и диаметра обработки, обычно берется в пределах 0,02—0,2 мм, причем для стальных деталей в 2 раза меньше, чем для чугунных деталей, а именно 0,01—0,1 мм. С увеличением диаметра обработки припуск растет в указанных пределах. В тех случаях, когда процесс хонингования ведется в две операции, на долю окончательной операции оставляется не более 0,2—0,3 от общего припуска. В целях снижения величины припуска, оставляемого на хонингование, предшествующими операциями при обработке отверстий являются растачивание или развертывание, а при обработке наружной поверхности — круглое шлифование.

При проведении процесса хонингования за одну операцию предшествующей операцией обычно является шлифование.

Учитывая, что хонингование более дорогая операция обработки, чем растачивание, развертывание и шлифование, следует стремиться к получению максимальной чистоты поверхности на этих операциях — не ниже 6-го класса, чтобы облегчить задачу процесса хонингования.

Деталь, подлежащая хонингованию, должна быть тщательно очищена, промыта и только после этого установлена в приспособление станка.

Проведенные исследования и практика хонингования позволили установить ряд зависимостей между производительностью, износом, чистотой и режимом работы. Установлено решающее влияние на процесс хонингования величины удельного давления. С увеличением удельного давления производительность возрастает, но при этом износ брусков также сильно растет, и чистота поверхности ухудшается. Оптимальным является давление в пределах 4—6 кг/см².

С повышением удельного давления окружные и осевые силы резания увеличиваются, причем величины сил, возникающих при хонинговании карборундовыми брусками, меньше, чем при применении электрокорундовых брусков.

С увеличением твердости брусков удельное давление должно повышаться, но не выше чем до 8 кг/см^2 . Большое влияние на процесс хонингования оказывает скорость резания, равная

$$v = \sqrt{v_{окр}^2 + v_{ос}^2},$$

где $v_{окр}$ — окружная скорость вращения головки;

$v_{ос}$ — скорость возвратно-поступательного движения головки.

При выборе этих скоростей исходят из угла наклона траектории зерен брусков (фиг. 77), угол обычно выбирается в пределах $30\text{—}60^\circ$ и чаще всего $45\text{—}50^\circ$. При большем угле сетки происходит налипание металла на брусках. Из развертки винтовой линии, образующейся на детали в результате движения зерен с указанной выше скоростью резания, следует, что отношение

$$\frac{v_{ос}}{v_{окр}} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad v = \frac{v_{окр}}{\cos \frac{\alpha}{2}}; \quad v = \frac{v_{ос}}{\sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Практически это отношение берется от 1:2,5 до 1:3,5. При хонинговании закаленных сталей $v_{ос}$ берется от 3 до 15 м/мин, а для сырых сталей и чугуна $v_{ос}$ повышается до 20—30 м/мин.

При обработке чугуна $v_{окр}$ берется в пределах 60—75 м/мин, при обработке стали 45—60 м/мин.

Скорость резания при хонинговании мягких и вязких металлов берется в 1,5—2 раза больше, чем при обработке твердых металлов. При обработке латуни, бронзы и алюминия $v_{окр}$ принимается в пределах 70—90 м/мин. С увеличением угла α , $v_{окр}$ и $v_{ос}$ съем металла и износ брусков увеличивается, а чистота поверхности ухудшается. Так, при увеличении $v_{ос}$ с 5 до 15 м/мин при хонинговании брусками на бакелитовой и бакелито-идитоловой связке производительность и износ брусков возрастают в 2—3 раза, а чистота ухудшается на 1 класс. Это ухудшение объясняется увеличением износа брусьев. Поэтому при засаливании брусков следует уменьшить $v_{окр}$ и увеличить $v_{ос}$.

Наибольший съем металла при удельных давлениях 3—6 кг/см² происходит в первые минуты процесса. Чистота поверхности особенно заметно улучшается в первые минуты за счет снятия неровностей, оставшихся от предшествующей обработки. В последующее время съем металла уменьшается, а чистота с течением времени изменяется мало.

При больших удельных давлениях (8—12 кг/см²) съем металла и износ брусков в течение всего процесса остаются значительными.

При хонинговании брусками зернистостью 400 и мельче съем металла остается почти неизменным при всех значениях $v_{окр}$ и $v_{ос}$.

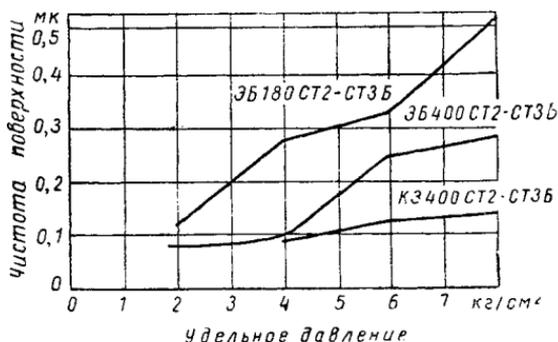
С увеличением прочности металла $v_{окр}$ и $v_{ос}$ следует повышать. При этом твердость применяемых брусков из электрокорунда белого рекомендуется снижать на одну-две степени.

Съем металла при увеличении его прочности затрудняется. Так, при хонинговании стали 30ХГСНА, имеющей прочность

$170 \pm 10 \text{ кг/мм}^2$, был достигнут в 1,5—2 раза меньший съем, чем при обработке стали 30ХГСА, имеющей прочность $120 \pm 10 \text{ кг/мм}^2$.

Чем выше прочность обрабатываемого металла, тем легче достигается высокая чистота поверхности. Степень зернистости брусков в этом случае играет меньшую роль. Брусками зернистостью 280 можно получить ту же чистоту поверхности, что и брусками зернистости М40.

Чистота поверхности улучшается также с увеличением твердости брусков, что особенно заметно при небольших давлениях порядка 4 кг/см^2 .



Фиг. 81. Влияние удельного давления на чистоту хонингуемой поверхности.

На фиг. 81 приведены результаты опытов инж. Г. М. Кошелева при хонинговании цилиндров из стали 30ХГСА при удельных давлениях 1—8 кг/см^2 .

Для достижения лучшей чистоты поверхности $v_{окр}$ и $v_{ос}$ следует несколько снизить.

При обработке деталей из легированных сталей оптимальные скорости во многих случаях, особенно при глубоких отверстиях, находятся в пределах: $v_{окр} = 25 \div 40 \text{ м/мин}$ и $v_{ос} = 10 \div 20 \text{ м/мин}$.

Хотя температура поверхностного слоя при правильно выбранных режимах хонингования и характеристики брусков не превышает 150° и, следовательно, не возникает опасности для его изменения и прижогов, этот процесс все же ведется с охлаждением, обычно керосином с добавкой 10—20% веретенного масла № 2. Охлаждающая жидкость должна подаваться в больших количествах (50—60 л/мин) для того, чтобы своевременно удалить абразивную пыль от износа брусков и снимаемую стружку. При применении в качестве охлаждающей жидкости чистого керосина производительность увеличивается, но чистота поверхности ухудшается. При увеличении в жидкости содержания масла чистота улучшается, а съем металла уменьшается.

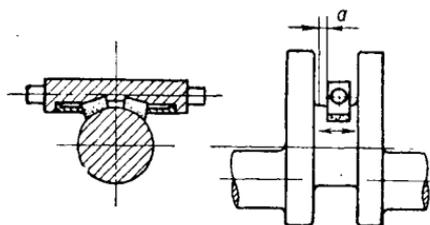
Баки для охлаждающей жидкости должны обязательно снабжаться фильтрами, или отстойниками. Весьма полезным также является установка магнитных сепараторов.

При хонинговании применяются также охлаждающие жидкости на водной основе с добавками тринатрийфосфата и нитрита натрия. По окончании хонингования обработанная деталь должна быть хорошо промыта и высушена.

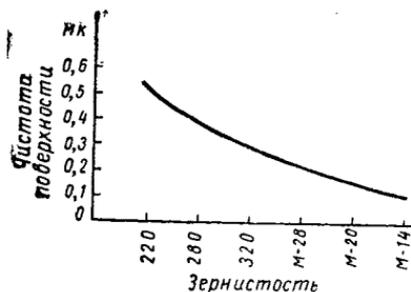
СУПЕРФИНИШ

Отличительной особенностью суперфиниша является ведение процесса при коротких и весьма быстрых колебательных движениях абразивного инструмента при работе брусками такой характеристики, которая обеспечивает сьем металла в начале операции и прекращение съема по мере улучшения чистоты обрабатываемой поверхности. Наиболее решающим фактором, характеризующим брусок, является твердость, которая подбирается в зависимости от твердости обрабатываемого металла.

Суперфинишем снимаются гребешки предыдущей обработки, поэтому макрогеометрия обрабатываемых деталей обычно не из-



Фиг. 82. Схема суперфиниширования шейки коленчатого вала.



Фиг. 83. Влияние степени зернистости на чистоту поверхности стали, подвергнутой суперфинишрованию.

меняется. Достигаемая при суперфинише чистота поверхности лежит в пределах 10—12-го классов.

Как и в процессе хонингования абразивный инструмент при суперфинишировании имеет большую поверхность соприкосновения с обрабатываемой деталью, что делает этот процесс, несмотря на малые скорости его проведения, достаточно быстро проходящим. Суперфиниш применяется для отделки наружных, внутренних, плоских и фасонных поверхностей деталей.

Детали после суперфиниша отличаются высокой износоустойчивостью за счет сохранения исходной структуры металла и высокой чистоты поверхности.

Обработка суперфинишем осуществляется на специальных станках или при помощи приспособлений на токарных и шлифовальных станках.

На фиг. 82 приведена схема суперфиниширования шейки коленчатого вала, которое производится на специальном станке. Станки для суперфиниша выпускаются широкой номенклатуры,

вертикальные и горизонтальные, одношпиндельные и многшпиндельные, работающие брусками и кругами, имеющие два, три и более движений детали и абразивного инструмента.

В зависимости от размеров обрабатываемых деталей осциллирующие головки работают 1—4 брусками, прижимаемыми к обрабатываемой детали пружинами, сжатым воздухом или маслом. В станках, предназначенных для обработки деталей с диаметром до 100 мм, головка обычно имеет один брусок, и для деталей свыше 100 мм — два и редко три-четыре бруска.

Для суперфиниша применяются квадратные и плоские бруски. Размеры брусков выбираются в зависимости от размеров обрабатываемых деталей сечением от 3×3 до 40×40 мм и длиной до 50 мм. Обычно для деталей диаметром до 25 мм выбирают бруски сечением до 20×20 мм, для деталей диаметром до 75 мм сечением 25×25 мм и диаметром выше 75 мм — бруски сечением до 40×40 мм.

Выбор характеристики брусков зависит от тех же факторов, что и при других видах шлифования, а также в значительной степени от исходной и требуемой чистоты поверхности.

Чем грубее исходная поверхность, тем крупнее должна быть выбрана зернистость брусков. Так, при чистоте исходной поверхности 6—7-го классов применяют бруски зернистостью 230—280.

При исходной поверхности 8-го класса и выше применяются бруски зернистостью М40—М20. Применение брусков более тонкозернистых, чем М20, не рекомендуется, так как производительность суперфиниширования при этом снижается, а чистота поверхности изменяется очень мало, в пределах 1—2 разрядов.

На фиг. 83 приведен график влияния степени зернистости на чистоту поверхности.

При выборе вида материала брусков следует исходить из общего правила: для обработки материалов с высоким сопротивлением разрыву применять электрокорунд белый и для материалов с низким сопротивлением разрыву карбид кремния зеленый. При применении таких тонкозернистых абразивных инструментов это общее правило не является столь обязательным. Практика показывает, что с одинаковым успехом в ряде случаев можно применять бруски из белого электрокорунда и зеленого карбида кремния.

Очень часто для суперфиниширования деталей из вязких сталей с успехом применяются бруски из карбида кремния.

При установлении требуемой степени твердости исходят из вида связки применяемых брусков и свойств материала обрабатываемой детали. Для твердых и хрупких материалов выбирают степень твердости в пределах СМ1—С1 для брусков на керамической связке и С1—СТ1 для брусков на бакелитовой связке.

Чем меньше твердость обрабатываемой стали, тем мягче должны быть бруски (М2—СМ1). Для суперфиниширования деталей из цветных металлов, а также вязких сталей лучше применять бруски из карбида кремния на бакелитовой связке.

Перед началом работы рабочей поверхности бруска придают форму, соответствующую кривизне поверхности, подлежащей обработке детали. Исследования этого процесса, проведенные канд. техн. наук С. М. Кедровым и другими, а также практика заводов автомобильной и подшипниковой промышленности позволили установить, что с увеличением твердости брусков и числа их двойных ходов чистота поверхности улучшается. Оптимальным углом α при проведении операции суперфиниша за один переход является угол в $10\text{--}15^\circ$.

Удельное давление в пределах $0,5\text{--}1,5 \text{ кг/см}^2$ не оказывает сколь-либо заметного влияния на чистоту поверхности.

Суперфиниширование стальных и алюминиевых деталей рекомендуется вести при следующих режимах: $v_d = 30 \div 45 \text{ м/мин}$, число двойных ходов бруска $700\text{--}1200$ в минуту, величина хода $3\text{--}6 \text{ мм}$, продольная скорость $0,5 \text{ м/мин}$, удельное давление $0,5\text{--}2,0 \text{ кг/см}^2$ (чаще $1\text{--}1,5 \text{ кг/см}^2$).

Суперфиниширование цветных металлов (бронзы, латуни и т. п.) рекомендуется вести в две операции, причем для предварительной операции выбирать бруски твердостью М2—М3, а для окончательной — бруски твердостью С1—С2 и работать при удельном давлении не более $1,5 \text{ кг/см}^2$, скорости $50\text{--}80 \text{ м/мин}$, числе двойных ходов 1000 в минуту, с амплитудой их колебаний 4 мм .

При обработке подшипниковых колец, отличающихся высокой твердостью, скорость детали повышается до 100 м/мин , при обработке алюминиевых поршней ее повышают до 140 м/мин .

Удельное давление выше 2 кг/см^2 применяется редко — только при обработке очень твердых металлов. Чем тверже обрабатываемый материал, тем меньше толщина снимаемого слоя и тем лучше достигается чистота.

Как и при хонинговании, процесс суперфиниша следует вести с применением смазывающей жидкости — керосина с добавкой $10\text{--}20\%$ веретенного масла. Для улучшения чистоты и повышения производительности в керосин добавляют 3% олеиновой кислоты.

Так как при суперфинишировании снимается очень небольшой припуск (около $5\text{--}10 \text{ мк}$ и редко больше), этот процесс осуществляется быстро — за $30\text{--}60 \text{ сек}$.

Благодаря небольшим удельным давлениям и низким скоростям суперфиниширования качество поверхностного слоя детали не изменяется.

Иногда процесс суперфиниширования ведут с переменной скоростью изделия сначала при низкой скорости вращения детали около 6 м/мин и затем при скорости детали до 30 м/мин .

При таком ведении процесса достигается ускорение удаления следов предшествующей обработки. Для достижения 12-го класса чистоты и выше в последнее время применяются бруски из прокатенного глинозема М28—М10 на бакелитовой связке, подвергнутые специальной термической обработке.

ПОЛИРОВАНИЕ

К полированию в практике относят два принципиально разных процесса: 1) декоративное шлифование, выполняемое мягкими кругами, с наклейкой на круги твердых абразивных материалов; при этом виде обработки преследуется цель осветления поверхности без контроля формы и размеров изделий; 2) полирование мягкими кругами с покрытием их пастами, преимущественно из мягких абразивов. При этом процессе достигаются высокие классы чистоты поверхности.

Академик И. В. Гребенщиков считает, что полирование является не только механическим, но и химическим процессом, во время которого снимается оксидная пленка, образующаяся на обрабатываемом металле под воздействием кислорода воздуха и таких поверхностно активных веществ, как стеариновая кислота, входящая в состав пасты. Пленка срывается полировальником за счет соединения пленки с поверхностью полировальника, покрытого пастой даже такого мягкого материала, как окись хрома.

При полировании металла под влиянием поверхностно активных веществ, входящих в пасту, на поверхности металла также протекают адсорбционные явления, которые значительно облегчают удаление металла. Влияние на съем металла поверхностно активных веществ было установлено академиком П. А. Ребиндером.

В большинстве случаев промышленного полирования имеет место процесс, при котором снимается значительный слой металла (до 0,3 мм и больше), т. е. происходит процесс шлифования. Его применение преследует не только цели отделки, но и часто достижения размеров, близких к требуемым.

Полированием может быть достигнута чистота поверхности до 10—12-го класса, причем за одну операцию чистота поверхности повышается на 1—2 класса.

На время полирования оказывает влияние чистота исходной поверхности, что и надо иметь в виду при назначении технологического процесса.

В настоящее время в практике применяются три вида полирования: кругами, лентами и абразивной жидкостью.

ПОЛИРОВАНИЕ КРУГАМИ

Самым старым и распространенным способом полирования является полирование войлочными кругами с накатанным на периферию абразивным зерном. Накатка зерна производится в два—четыре слоя, причем первый слой обязательно накатывается с применением мездрового клея, а последующие слои могут накатываться и с жидким стеклом. Для накатки первого слоя зерна жидкое стекло не применяется, так как оно плохо соединяется с войлоком, вследствие чего абразивные зерна при работе быстро осыпаются.

Накатка производится в два приема: сперва наносится слой клея, а затем на него слой зерна. Иногда накатку производят абразивной массой, состоящей из смешанных и проваренных вместе абразивных зерен и клея. Соотношение зерна и клея в массе берется в зависимости от желаемой жесткости полировального круга. Для жестких кругов берется больше зерна и меньше клея (6—7 весовых частей зерна и 3—4 весовые части клея). Для более эластичных кругов берется обратное соотношение. Часто первый слой на круг накатывают массой, содержащей меньше зерна 4:6, второй слой 5:5 и третий 6:4. Клей, применяемый для накатки кругов, должен храниться в сухом месте, так как при хранении в сыром месте он впитывает в себя влагу, быстро загнивает и теряет клеящую способность. Лучший клей обладает при склейке дерева сопротивлением разрыву в 100—120 кг/см². Вообще же сила сцепления клея зависит не только от свойств и слоя клея, но от рода материала и вида приклеиваемой поверхности.

В приложении 6 приведены примерные нормы расхода зерна и клея при накатке полировальных кругов.

В зависимости от требуемой чистоты, свойств обрабатываемого металла и оставленного для полирования слоя выбирается зернистость и вид абразивного материала.

Для полирования цветных металлов применяют круги из мягкого войлока. Полирование стальных деталей, предметов из камня, кожи и т. п. производится кругами из жесткого войлока. Полирование алюминиевых деталей ведут кругами из мягкого войлока, накатанными электрокорундом при скорости около 30 м/сек при небольших давлениях. Обычно войлочные круги применяются для достижения чистоты 8—9-го классов. В этих случаях выбирают абразивное зерно № 180—280.

Для достижения чистоты 10—12-го классов фетровые круги шаржируются пастой, изготовленной из зерен 280—M28. Пасты изготавливаются из разных полировальных материалов: микропорошков корунда, карбида кремния, венской извести, крокуса (окси железа), трепела, окиси хрома и др. Связующими веществами обычно являются воск, парафин, сало. В целях усиления полирующего действия в пасту добавляются такие поверхностно активные кислоты, как стеариновая и олеиновая. Так, грубая и средняя пасты ГОИ делаются со стеариновой, а тонкая со стеариновой и олеиновой кислотой.

В связи с высокой стоимостью и дефицитностью войлочных кругов в последнее время все шире применяются полировальные круги из текстильных материалов и бумаги. Текстильные круги делаются из хлопчатобумажной ткани, лучше всего киперной, путем склеивания и спрессовывания отдельных сшитых секций. Киперная ткань лучше сцепляется с клеем, чем обычная, вследствие чего круги, изготовленные из нее, имеют более высокую стойкость. В отличие от войлочных кругов на текстильные первый слой зерна может наклеиваться жидким стеклом, так как ткань хорошо

сцепляется с ним. Текстильные круги той же зернистости, что и войлочные, позволяют получать чистоту поверхности на 1 класс грубее, обычно 7—8-го классов. Высокая стоимость текстильных кругов ограничивает их применение.

Бумажные круги изготавливаются из сшитых и спрессованных вместе листов гладкой или гофрированной бумаги. Накатка зерна на них производится при помощи силиката. Жесткость бумажных кругов позволяет применять их только для получения чистоты поверхности 6—7-го классов. Бумажные круги из гофрированной бумаги обладают большей эластичностью, чем из гладкой бумаги, и дают в силу этого более чистую поверхность.

Стойкость бумажных кругов выше, чем текстильных, а стойкость последних выше войлочных.

Перед нанесением зерна на круг его необходимо тщательно выправить и отбалансировать, чтобы избежать биения и неуравновешенности. Вес бумажных кругов того же размера обычно на 40—50% выше, чем войлочных, поэтому их надо балансировать с большей тщательностью.

Иногда для полирования применяются обитые кожей деревянные круги.

Полированию обычно подвергаются детали, имеющие сложные криволинейные поверхности, вследствие чего в большинстве случаев эта операция производится вручную на простых станках со скоростью вращения круга от 20 до 35 м/сек.

Массовое полирование цилиндрических деталей часто производится на бесцентрово-полировальных станках, на которых вместо шлифовальных кругов ставятся полировальные. На ведущий круг при этом надевается или наклеивается резиновый обод.

Полирование на бесцентровых станках производится со скоростью круга 30—35 м/сек и скоростью детали 20—30 м/мин.

Полирование в связи с нулевой водостойкостью как мездрового клея, так и силиката производится обычно всухую, вследствие чего сопровождается значительным пылевыделением и опасностью прижогов, особенно при снятии больших слоев металла порядка 0,1—0,3 мм. В целях улучшения чистоты поверхности войлочные полировальные круги иногда смазывают солидолом.

В тех случаях, когда полированием снимается с обрабатываемой детали слой толщиной в доли микрона, этот вид декоративной обработки часто называют гляцеванием. Он производится обычно при помощи жестких фетровых или хлопчатобумажных кругов, шаржированных тонкой пастой. В результате гляцевания достигается повышение чистоты поверхности на 1—2 разряда. Исходная поверхность обычно принимается 10—11-го классов. Зеркальная поверхность достигается при полировании пастой из окиси хрома, крокуса или трепела.

Для полирования криволинейных поверхностей, например, канавок, сверл и т. п., в последнее время все шире получают применение так называемые гибкие круги, обладающие свойствами эластичности. Гибкие круги изготавливаются на вулканитовой связ-

ке, в составе которой уменьшается, для придания эластичности, количество серы и увеличивается содержание актинапа. Эти круги изготавливаются четырех степеней эластичности, проверяемой на приборе Джонса путем вдавливания шарика диаметром 1/8" под определенной нагрузкой (1 кг), а именно:

Степень эластичности	Глубина лунки в мм
1ГК	0,18—0,15
2ГК	0,15—0,12
3ГК	0,12—0,08
4ГК	0,08—0,06

Круги 1ГК имеют наиболее высокую эластичность, 2ГК — среднюю эластичность, 3ГК — малую эластичность и 4ГК — являются жесткими. Круги 1ГК и 2ГК изготавливаются обычно из зерна электрокорунда № 80 и применяются в тех случаях, когда надо получить чистоту 9—10-го классов. Круги 3ГК и 4ГК делаются зернистостью 46—60 и применяются для достижения чистоты поверхности 8—9-го классов, и зернистости 36—46 для 7—8-го классов. Гибкие круги выпускаются диаметром 70—500 мм, толщиной 6—75 мм и применяются для полирования различных деталей и инструментов со скоростью 18—20 м/сек.

Как и шлифовальные круги, гибкие круги с увеличением скорости резания улучшают чистоту обрабатываемой ими поверхности. Однако недостаточная механическая прочность не позволяет применять их на скорости выше указанной. Гибкие круги могут работать как всухую, так и с охлаждением.

Благодаря эластичности связки зерна в этих кругах обладают некоторой подвижностью (вместе со связкой), что и обеспечивает достижение высокой чистоты при такой сравнительно крупной зернистости.

При уменьшении зернистости чистота почти не улучшается. С увеличением времени полирования чистота улучшается. Чем выше степень эластичности гибких кругов, тем больший достигается блеск поверхности.

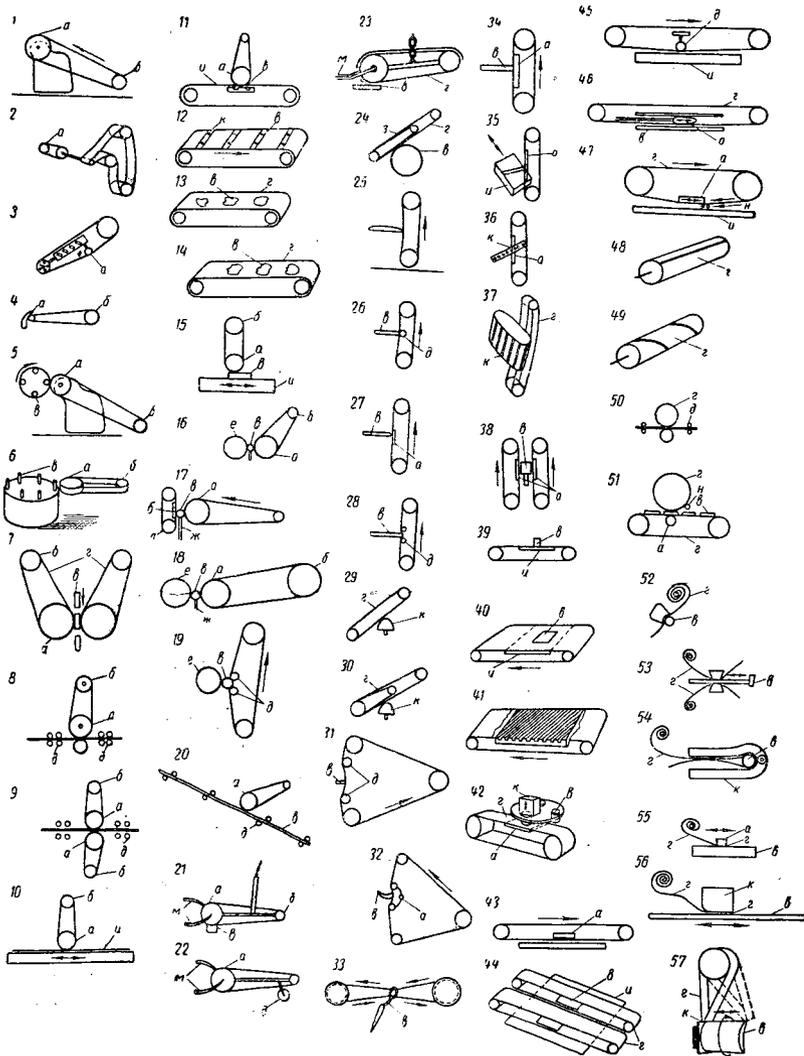
При полировании гибкими кругами обычно снимается небольшой припуск: 0,005—0,015 мм.

В отличие от войлочных кругов полирование гибкими кругами улучшает макрогеометрию поверхности.

Для обработки криволинейных поверхностей применяются также фибровые диски, обычно укрепленные на станке с гибким валом. Как показал опыт, фибровые диски с наклеенной на них шлифовальной шкуркой обладают в 2—3 раза меньшей стойкостью, чем фибровые диски с наклеенным на них непосредственно абразивным зерном.

ЛЕНТОЧНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ И ШЛИФОВАНИЕ

В последние годы весьма заметно расширяется применение ленточного шлифования и полирования. При ленточном шлифовании натянутая между двумя шкивами бесконечная шлифовальная



Фиг. 84. Схемы станков ленточного шлифования и полирования:

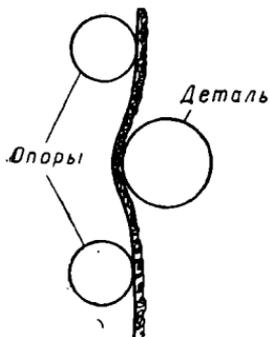
1 — для ручного предварительного и чистового шлифования; 2 — для вогнутых частей деталей; 3 — для ободков турбинных лопаток (с пружинным контактным роликом); 4 — неправильных поверхностей с копирным устройством; 5 — с полуавтоматическим зажимом деталей; 6 — для непрерывной обработки с вращающейся головкой; 7 — для двухстороннего шлифования; 8 — для листов; 9 — для одновременной двухсторонней обработки листов; 10 — для плоского шлифования листов; 11 — для обработки тонких деталей с магнитным патроном и конвейером; 12 — для обработки мелких деталей с ленточным конвейером из эбонита; 13 — для деталей из цветных металлов с ленточным конвейером из мягкой резины; 14 — для грубой обработки деталей; 15 — для инструментальных цехов; 16 — бесцентрового типа; 17 — бесцентрового типа для грубой стделки; 18 — бесцентрового типа для легких работ; 19 — бесцентрового типа для чистовой стделки; 20 — с возвратным ходом; 21 — с качающейся рамой для обработки фасонных поверхностей; 22 — подвесного типа для грубых работ; 23 — с качающейся рамой для удаления сварных швов и т. п.; 24 — со свободной лентой для чистовой обработки роликов; 25 — вертикального типа для стделки автомобильных ветровых щитков; 26 — вертикального типа [с опорным роликом; 27 — вертикального типа для чистовой отделки плоских кромок; 28 — вертикального типа для чистовой стделки закругленных кромок; 29 — поверхностей вращения; 30 — поверхностей вращения с реверсивной подачей; 31 — для удаления заусенцев на штамповках; 32 — лопаток турбин с качающимся контактным роликом; 33 — небольших ствертей, например в ножницах; 34 — прецизионный вертикального типа; 35 — с качающимся рабочим столом; 36 — с автоматической вертикальной подачей стола для обработки шайб, прокладок и т. п.; 37 — с автоматической подачей для обработки электродеталей; 38 — с двумя лентами; 39 — горизонтального типа с узкой лентой для обработки деталей из пластмасс; 40 — с широкой лентой; 41 — горизонтального типа с насеченной лентой; 42 — с автоматической подачей и контролем величины давления для прецизионной обработки; 43 — дюралюминиевых деталей с движущимся столом; 44 — с двумя лентами; 45 — с вращающимся столом для обработки прорезей; 46 — внутренних поверхностей труб; 47 — деталей, требующих больших усилий шлифования; 48 — с зажимным устройством ленты для выравнивания поверхностей фибровых деталей; 49 — тонких деталей с жестким допуском (лента намстана спиралью); 50 — круглошлифовального типа для обработки листов и проволоки; 51 — круглошлифовального типа с ксвейерной подачей; 52 — коленчатых валов; 53 — лопаток турбин (чистовая отделка); 54 — шеек коленчатых; валов (чистовая стделка); 55 — для получения отделки высокой чистоты; 56 — полос; 57 — фасонных поверхностей лопаток с копирным приспособлением.

Обозначения: а — контактный ролик или плита; б — холостой шкив; в — деталь; г — лента; д — подающие и опорные ролики; е — ведущий круг на вулкантовой сцепке; ж — нож; з — поддерживающий ремень; и — стол стенка; к — приспособление для крепления деталей; л — ведущая лента; м — ручки; н — сопло для подачи охлаждающей жидкости.

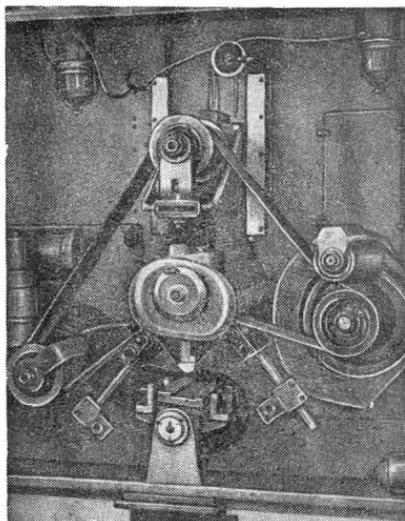
лента движется с большой скоростью, а обрабатываемое изделие в зависимости от вида шлифования получает те или другие движения подачи. В месте контакта с изделием лента поддерживается специальной опорой в виде ролика, плиты, копира и т. п., от конструкции и степени эластичности которых зависит площадь контакта, производительность и чистота обрабатываемой поверхности.

Выпускаются также станки, в которых шлифовальная лента соприкасается с деталью на свободной ветви (фиг. 85). В этом случае получается большой контакт между лентой и деталью за счет большего угла обхвата.

В настоящее время выпускаются ленточно-шлифовальные станки для заточки



Фиг. 85. Схема ленточного шлифования с двумя опорами.



Фиг. 86. Станок для ленточного шлифования лопаток.

инструмента, наружного круглого центрового и бесцентрового полирования, а также специальные для отделки деталей различных конфигураций, например для шлифования лопаток турбинных и реактивных двигателей (фиг. 86), станки для полирования шеек коленчатых валов и кулачковых валиков, станки для полирования беговых дорожек, колец подшипников и т. п. с мощностью привода от 0,5 до 200 квт и выше. На фиг. 84 показаны схемы станков для ленточного шлифования, применяемые в США, а на фиг. 87 — типы опорных роликов¹.

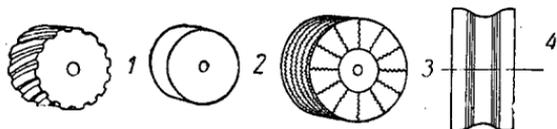
На этих станках осуществляются операции обдирочного и чистового шлифования, а также полирования.

Ленточные станки не требуют высокой квалификации рабочих и позволяют значительно механизировать их труд. Как правило, станки снабжены устройствами для подачи охлаждающей жидкости. Сбегание ленты в последних конструкциях устраняется за счет

¹ См. журнал Crits and Grind № 8 и 10, 1956.

поворота ведущего ролика. Натяжение ленты для устранения сбегания ленты обычно регулируется при помощи натяжных роликов.

Для ленточного полирования и шлифования применяются водостойкие шлифовальные ленты на бумажной и тканевой основах и маслостойкие ленты на ткани разной степени зернистости от 24 до М40 из электрскорунда нормального и белого для обработки деталей из стали, бронзы, ковкого чугуна, магния и из карбида



Фиг. 87. Контактные ролики:

1 — зубчатые (трапециевидные) резиновые для ручного шлифования; 2 — гладкие резиновые для обработки плоскостей и гладкие стальные для чистовой и предварительной обработки стальных деталей; 3 — сборные из ткани (диагонали) для чистовой обработки; 4 — профилированные стальные для фасонного шлифования.

кремния для отделки деталей из алюминия, серого чугуна, меди, латуни, стекла и т. п.

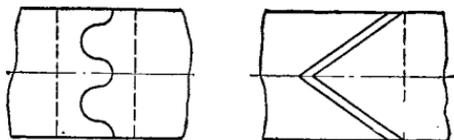
В зависимости от размеров обрабатываемых деталей и конструкций станков применяются ленты шириной от 10 до 3000 мм и длиной от 500 до 7000 мм, т. е. для очень большого диапазона размеров деталей.

Бесконечность ленты достигается за счет склейки ее концов. От метода склейки, толщины слоя, свойств клея и склеиваемых поверхностей зависит прочность ленты в месте склейки. Наиболее рациональным считается склеивать ленту так, как показано на фиг. 88 и указано в приложении 7.

Для склеивания лент с успехом применяют клей БФ, казеиновый и др.

Чем больше толщина ленты в месте склейки по сравнению с толщиной в других ее сечениях, тем скорее будет происходить износ ее в этом месте, тем быстрее возможен ее разрыв. Поэтому надо стремиться склеить ленту так, чтобы ее толщина была в максимальной степени одинаковой по всей ее длине. Толщина ленты вместе с зерном обычно не превышает 2 мм.

Чем крупнее зернистость, тем больше толщина ленты, тем больше неравномерность толщины по длине ленты, что является недостатком, вызывающим нестабильность процесса ленточного шлифования. Величина допустимых отклонений для лент зернистостью до 46 не должна превышать 0,2 мм, для лент зернистостью 60—100 не должна превышать 0,1—0,15 мм.



Фиг. 88. Метод склейки лент.

Прочность ленты на разрыв определяет возможное давление детали на нее в процессе работы, а следовательно и производительность шлифования. Ее прочность на разрыв в месте склейки должна быть не меньше, чем прочность шкурки в любом другом месте, что фактически и имеет место. Обрывы ленты, как правило, происходят не по месту склейки, а рядом с ним. Прочность шкурки выше, чем прочность ткани, из которой она изготовлена, в 1,5—2 раза. Так, прочность лент из шкурки шириной 50 мм на нанке равна 120—130 кг, и лент на сарже № 2 — 140—150 кг. Увеличение прочности шкурки происходит за счет аппретирования ткани и покрытия ее слоем клея, что одновременно с повышением прочности вызывает и увеличение толщины шкурки. Вместе с тем лента должна быть как можно тоньше, чтобы иметь максимальную эластичность, что особенно важно для получения необходимой точности при шлифовании криволинейных поверхностей. Ширина ленты зависит от длины детали. Большей частью она равна длине детали, например, при шлифовании лопаток и цилиндрических деталей. Таким образом, за счет большой эластичности и ширины ленты контакт между деталью и лентой при этом виде обработки получается больше, чем при любом другом виде шлифования и полирования. Чем больше кривизна детали, тем меньше должна быть ширина ленты, чтобы иметь возможность шлифовать труднодоступные места. В частности, шлифование отверстий ведется узкими лентами.

Другой особенностью ленточного полирования, вызываемой большой длиной и шириной ленты, является то, что за один ее оборот в работе участвует, как правило, большее число зерен, чем при других видах шлифования. Так, например, при длине ленты 3500 мм, шлифование ведется как бы кругом диаметром 1100 мм, т. е. ленточная обработка ведется всегда как бы кругом большого диаметра, что, как известно, выгоднее.

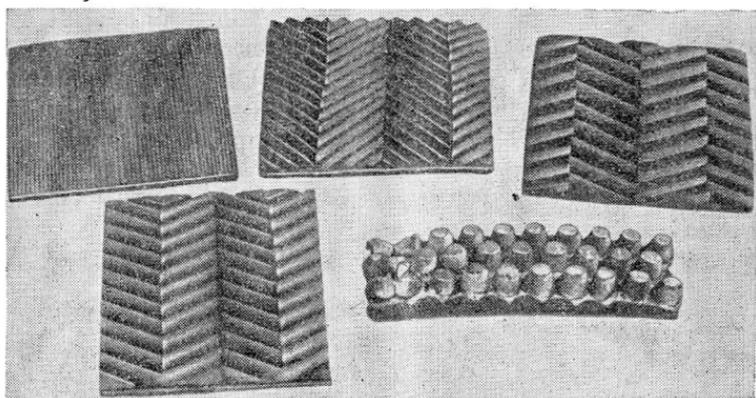
Число режущих зерен, приходящихся на единицу площади ленты, также больше чем у шлифовальных и полировальных кругов за счет их расположения в ленте с меньшей разновысотностью. Лента в процессе шлифования не должна вытягиваться больше, чем на 10—12% ее первоначальной длины, так как ее удлинение в процессе работы ослабляет прочность сцепления зерна с тканью, а также потому, что вытягивание ленты требует регулировки ее натяжения.

Практически, из-за невысокой прочности основы, такого удлинения в процессе шлифования не наблюдается; разрыв ленты происходит при меньшем удлинении, чем при статическом испытании на разрыв. Это объясняется тем, что прочность ленты в процессе работы уменьшается с увеличением времени работы с большим натяжением. В целях меньшего удлинения ленты в работе ткань перед изготовлением шкурки следует подвергать вытяжке.

Ленты обладают мягкостью основы, позволяющей зернам несколько вдавливаясь в нее, а основе сжиматься.

В отличие от шлифовальных кругов абразивные ленты имеют обычно только один слой зерен, что определяет их небольшой срок службы.

В целях увеличения срока службы иногда применяются двух-, трехслойные ленты, т. е. ленты, на которых нанесено два-три слоя абразивных зерен. Такие ленты имеют значительно больший срок службы, так как прочность крепления второго и третьего слоя зерен больше, чем прочность сцепления первого слоя зерен с тканью. В поисках еще большей долговечности иногда применяют ленты, изготавливаемые на более толстой основе из специальной абразивной массы.



Фиг. 89. Толстослойные ленты на вулканитовой связке.

Эти ленты имеют абразивный слой на вулканитовой связке толщиной 3—8 мм, нанесенный на бесконечных ремнях из бельтинга и тому подобной ткани. Поверхность этих лент для увеличения их гибкости и уменьшения шума и свиста, возникающего при работе, делается рифленой (фиг. 89) или точечной. Однако, несмотря на это, вулканитовые ленты имеют значительно меньшую эластичность, чем ленты из шкурки, хотя и более высокую стойкость за счет большей толщины абразивного слоя. Эти ленты изготавливаются из электрокорунда и карбида кремния зернистостью 24—230. Вследствие меньшей эластичности и более высокой стоимости эти ленты находят меньшее применение, чем ленты из шкурки, хотя при том же номере зернистости обеспечивают более высокую чистоту поверхности.

Чрезвычайно большое влияние на производительность шлифования оказывает конструкция и материал контактных роликов.

Контактные ролики делаются из алюминия, или стали и имеют по периферии эластичный обод из войлока, ткани, кожи, текстолита или резины в зависимости от назначения ролика. Для шлифования и полирования плоских поверхностей в качестве опоры применяют стальные плиты, также иногда облицованные резиной. Для чистовых и профильных операций применяют также войлок, фетр

или мягкую резину твердостью по Шору 20—70 и для предварительных операций резину твердостью по Шору 65—90. Чем тверже ролик и чем меньше его диаметр, тем больший достигается съем металла. С этой же целью поверхность ролика делают рифленой под углом 45°. При применении рифленых роликов износ ленты уменьшается за счет разного контакта между лентой и выступами и впадинами, образуемыми рифлением ролика. Угол обхвата контактного ролика лентой равен 110—120°. Вместе с тем рифление способствует уменьшению проскальзывания ленты. Диаметр роликов не должен быть слишком малым (150—400 мм). Толщина обода делается от 3 до 20 мм. Перед установкой на станок ролики должны быть тщательно отбалансированы и центрированы.

Рекомендуется также попеременная работа с разными роликами, а именно: гладкие ролики применять при новой незагупившейся ленте, рифленые использовать после затупления ленты. Шлифование и полирование без помощи контактных роликов и плит чаще всего применяются при внутреннем шлифовании поверхности глубоких отверстий диаметром 15 мм и больше и длиной до 15 м. При этом виде шлифования лента прижимается к шлифуемой поверхности только силой своего натяжения, в результате чего производительность, по сравнению с контактным шлифованием, снижается.

Правка и очистка лент по мере их затупления и забивания снятой стружкой производится во время движения ленты при помощи проволочных цилиндрических щеток, насаженных на ось.

Своевременная очистка лент увеличивает их срок службы и стойкость до 50%. Вообще же работоспособность ленты зависит не только от ее размеров и опорного ролика, но и от свойств металла обрабатываемой детали и, главным образом, от режима обработки, т. е. от величины давления, скорости ленты, глубины шлифования и диаметра детали. Оптимальные величины скорости и давления для разных случаев обработки различные. Так, при обработке плоских или малопрофилированных поверхностей деталей из чугуна, бронзы, твердой стали, стекла рекомендуется работать со скоростью ленты 15—20 м/сек, при цилиндрическом и профильном чистовом шлифовании деталей из стали устанавливать скорость ленты 35—40 м/сек и при предварительном шлифовании 25—35 м/сек. При шлифовании титана наивыгоднейшей скоростью ленты считается 10—15 м/сек, так как при увеличении скорости сильно возрастает износ абразивного слоя ленты.

При шлифовании и полировании легких металлов, наоборот, применяют более высокие скорости резания до 45—50 м/сек. При предварительном шлифовании цветных металлов рекомендуют встречное направление движения ленты по отношению к детали, вместо обычного движения в одном направлении.

Давление детали на ленту при обработке цветных металлов: алюминия, бронзы, меди, латуни — следует брать не более 0,3—0,4 кг/см² и при обработке деталей из стали и чугуна в пре-

делах $0,5—2 \text{ кг/см}^2$. С увеличением диаметра шлифуемой детали площадь контакта с лентой растет, а удельное давление и съем металла уменьшаются.

С увеличением скорости ленты, осевой подачи, глубины шлифования и величины давления производительность по съему металла увеличивается, но одновременно возрастает износ и затупление зерен, что и ограничивает увеличение этих параметров режима.

Затупление зерен увеличивается с увеличением времени работы ленты при неизменных параметрах режима шлифования. Вследствие этого съем металла по мере увеличения времени шлифования уменьшается, что является недостатком этого способа шлифования. Для сохранения величины съема постоянной в процессе шлифования следует по мере затупления зерен изменять параметры режима и подвергать ленту чистке.

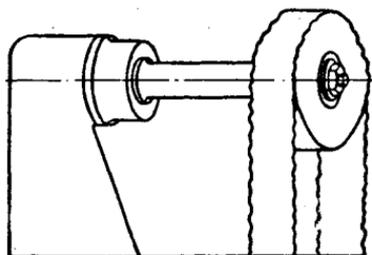
Иногда рекомендуют работать с переменным, увеличивающимся по мере затупления зерен, давлением. Однако этот способ практически трудно осуществить, так как существующие конструкции станков не имеют устройств для автоматического изменения давления по мере затупления ленты.

При шлифовании деталей с буртиками при одновременной обработке галтели с основной поверхностью края ленты вырезают фестонами, как показано на фиг. 90, причем берут ширину ленты больше ширины контактного ролика с тем, чтобы фестоны сходили с края ролика и при соприкосновении с буртом детали сгибались и шлифовали галтель. При увеличении ширины ленты, для сохранения той же интенсивности съема, надо пропорционально ширине увеличить давление.

Для шлифования кромок турбинных лопаток применяют войлочные ленты, на которых непрерывно наносится абразивная паста.

Применяемый при ленточном шлифовании вид охлаждающей жидкости зависит от свойств ленты и вида обрабатываемого металла. При применении водостойких лент и обработке деталей из стали, чугуна, латуни в качестве охлаждающей жидкости обычно применяется эмульсия. При работе лентами, не обладающими водостойкостью, для охлаждения применяют минеральные масла; чем выше их вязкость, тем выше мощность, расходуемая на резание. Как и при других видах шлифования поверхностно активными добавками, повышающими производительность, являются олеиновая кислота и лярдовое масло.

При шлифовании без охлаждения замечено, что стойкость ленты увеличивается, если через 3—5 мин. работы делать перерывы во избежание перегрева ленты, размягчения клея и выпадения зерен.



Фиг. 90. Лента для шлифования деталей с галтелями.

При шлифовании и полировании всухую для достижения лучшей чистоты, стойкости ленты и уменьшения пылевыведения рекомендуют также смазывать ленту тонким слоем масла или пасты.

Этот способ повышения чистоты рационален только для крупнозернистых лент и непригоден для мелкозернистых, так как при этом снижается съем металла. Что же касается пылевыведения, то при ленточном шлифовании оно меньше, и условия для отвода пыли в этом случае лучше, чем при обработке кругами всухую.

С увеличением скорости ленты чистота поверхности улучшается. Вообще же чистота в первую очередь зависит от зернистости абразива; так, при зернистости 220—280 при шлифовании углеродистой стали достигается чистота до 11-го класса, а при применении паст из мягких материалов до 12-го класса.

Высокая стоимость ткани, мездрового клея и лака влекут за собой более высокую стоимость лент по сравнению с шлифовальными кругами.

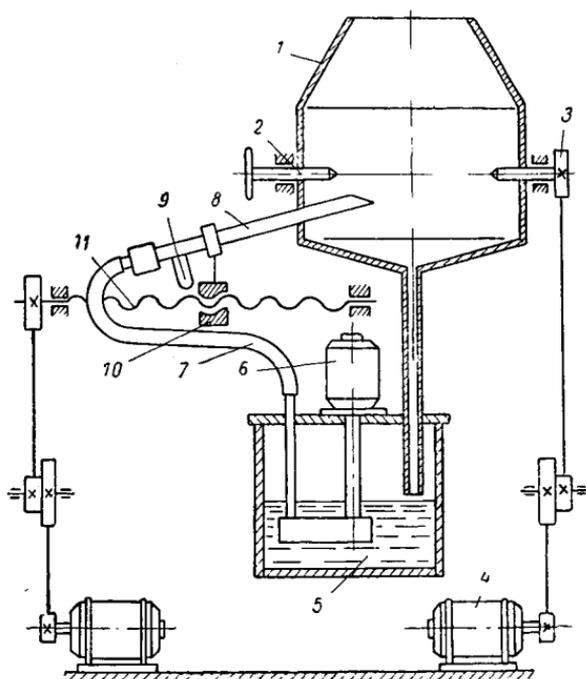
Но как показывает опыт сравнительной обработки лентами и полировальными кругами, полирование лентами является более производительным и поэтому в большинстве случаев и более экономичным процессом, чем полирование кругами.

ЖИДКОСТНОЕ ПОЛИРОВАНИЕ

Жидкостное полирование основано на принципе выбрасывания со скоростью 50 м/сек и выше жидкости, насыщенной абразивом, которая ударяется о гребешки обрабатываемой поверхности и частично снимает их, а частично заваливает и заглаживает, вследствие чего характер профиля первоначальной поверхности резко изменяется. Выброс абразивной струи производится насосом высокого давления, или под давлением сжатого воздуха из установок, напоминающих пескоструйные аппараты.

На фиг. 91 показана схема установки для жидкостного полирования. Установка представляет собой камеру 1, в которой при помощи передней и задней бабок 2 и 3 или другим способом крепится подлежащая обработке деталь, приводимая во вращение при помощи электродвигателя 4. Рабочая жидкость находится в баке 5, из которого при помощи электронасоса 6 и гибкого шланга 7 подается в форсунку 8, в которую же поступает и сжатый воздух по трубе 9. Форсунка приводится в движение при помощи каретки 10 и винта подачи 11 электродвигателем и имеет возможность наклоняться под нужным углом. Такой схемой обычно пользуются при работе с жидкостью, насыщенной микропорошками. При работе с жидкостью, насыщенной более крупными частицами абразивов, бак с жидкостью снабжается смесительным устройством для непрерывного смешивания абразивной жидкости, так как иначе часть абразивных частиц оседает на дно, и состав жидкости получается неравномерно им насыщенным, вследствие чего с обрабатываемой поверхности снимается неодинаковый слой.

Жидкостное полирование, иногда называемое жидкостным хонингованием, особенно часто применяется при обработке деталей, имеющих сложную конфигурацию, для которых трудно или невозможно использовать другие методы чистовой отделки и очистки, например для отделки профильных штампов, форм для литья под давлением, сверл и другого режущего инструмента, а также при подготовке под гальванопокрытие, для очистки отливок и для декоративного полирования.



Фиг. 91. Схема установки для жидкостной абразивной обработки металлов.

Обработка глубоких и особенно профильных отверстий вызывает большие трудности. Методом жидкостного полирования можно обрабатывать отверстия длиной до 15 м и больше и при этом малых диаметров, получая довольно высокую чистоту поверхности (7-го класса и выше).

В зависимости от вида обрабатываемого материала для жидкостной обработки применяются зерно, порошки или микропорошки электрокорунда и карбида кремния.

Для операций очистки обычно применяют абразивное зерно крупностью до № 120 и для полирования зернистостью от № 120 до М5. Иногда для легких металлов применяется гранулированный кварцевый песок. В связи с тем, что твердость и прочность кварцевого песка значительно меньше, чем электрокорунда, его берут для достижения той же чистоты на две-три степени крупнее. Абразивная жидкость обычно составляется из 25—50 весовых ча-

стей абразивного зерна и 75—50 весовых частей содовой эмульсии, так что объемный вес жидкости равняется 2. Содержание в жидкости более 50% абразива допускается для мелких порошков и микропорошков (230—M7), а для более крупных номеров зернистости не рекомендуется. Излишняя концентрация зерен в жидкости вызывает их удары друг о друга, чем мешает их полету в работе. Часто в жидкость добавляют ингибиторы для предотвращения коррозии и уничтожения жира и загрязнений на деталях. Так, для повышения коррозионной устойчивости прибавляют 0,5—1% нитрита натрия, а для улучшения чистоты и придания большего блеска поверхности добавляют тринатрийфосфат.

Производительность жидкостного полирования зависит от: давления воздуха и скорости струи, номера зернистости и концентрации абразива в жидкости, угла и расстояния установки сопла, т. е. направления струи, конструкции соплового устройства, свойств обрабатываемого материала и т. д. Чем больше давление воздуха и скорость, чем крупнее зернистость, тем больше кинетическая энергия удара, тем выше производительность. Установлено, что для каждой зернистости существует оптимальное давление воздуха. Оно колеблется в пределах от 1 до 10 ат. Так, при зернистости абразива в жидкости M28—M20 наиболее выгодным является давление воздуха ~4 ат, при зернистости 100—120 давление 5—8 ат. Давление жидкости не оказывает влияния на чистоту поверхности. Вместе с тем превышение давления сверх указанного может вызвать, особенно при обработке вязких материалов, шаржирование обрабатываемой поверхности абразивным зерном, содержащимся в жидкости.

Оптимальное расстояние от отверстия сопла до обрабатываемой поверхности зависит от давления, конструкции сопла и других параметров и должно устанавливаться в каждом отдельном случае опытом. Обрабатываемая поверхность не должна находиться в непосредственной близости от отверстия сопла, а примерно на расстоянии 50—100 мм. Так, по данным Венгерского института технологии машиностроения наибольший съем металла получается, когда сопло находится на расстоянии 70 мм от обрабатываемой поверхности, при угле падения струи 33° при обработке алюминия и при угле падения струи 40° в случае обработки стали.

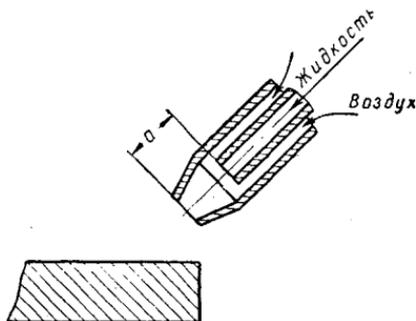
Исследования В. И. Котова показали, что наивысшая производительность получается при расстоянии сопла от поверхности 50 мм, при угле расположения сопла 45° как при обработке алюминия, так и стали. Но так как чистота поверхности при расположении сопла под углом 30° при полировании алюминия получается лучше, то для алюминия рекомендуется этот угол падения струи.

По другим данным оптимальное расстояние при обработке стали равняется 80 мм, а при обработке алюминия 100 мм, причем наиболее выгодным углом направления струи является угол в пределах 15—45° и, в частности, для алюминия угол в 45°.

С увеличением угла выше 45° производительность резко уменьшается в связи с тем, что режущее действие частиц снижается. Также уменьшается съем металла и с увеличением расстояния положения сопла тем больше, чем больше это расстояние, что объясняется увеличением сопротивления и в связи с этим падением скорости струи и силы удара абразивных частиц. Особенно это явление сказывается при применении микропорошков. С увеличением размера зерен, а следовательно и их массы, сила удара возрастает, и производительность съема повышается, так же как с увеличением концентрации зерен в жидкости. Так, при зернистости № 80 величина снимаемого слоя металла в 2—3 раза больше, чем при зернистости № 220. С увеличением твердости и хрупкости абразивных зерен съем металла увеличивается.

Производительность съема зависит также и от вида обрабатываемого материала, так, при обработке алюминия она выше, чем при обработке стали до 2 раз.

Как показали исследования, съем металла с обрабатываемой поверхности значительно выше при таком сопловом устройстве, когда воздух идет по внутренней трубке, а жидкость по наружной.



Фиг. 92. Схема соплового устройства.

Однако с целью повышения износостойкости сопла в практике применяют такие сопловые устройства, в которых рабочая жидкость идет по внутренней трубке, а воздух по наружной, как это показано на фиг. 92. Очень важное значение имеет расстояние a . Как это установлено опытами В. И. Котова, максимальный съем металла получается, когда расстояние $a = 110$ мм.

Большое значение на чистоту поверхности имеет равномерность съема металла по всей обрабатываемой поверхности. Равномерность съема зависит от степени однородности смешения жидкости, от степени одинаковости размеров абразивных частиц, от конструкции соплового устройства и от одинаковости расстояния отверстия сопла от обрабатываемой поверхности.

В связи с этим смешивание жидкости в баке установки должно быть непрерывным и обеспечивающим однородность ее консистенции. Применяемое зерно перед употреблением рекомендуется тщательно просеять, чтобы в него не попали случайно более крупные и более мелкие, чем необходимо, зерна.

Равномерность съема металла повышается при применении таких сопловых устройств, у которых выходные отверстия имеют щелевидные, а не круглые сечения.

Съем металла пропорционален машинному времени работы, однако чистота поверхности от увеличения времени полирования для применяемой на данной операции зернистости абразива не

повышается. Получаемые для данной зернистости чистота и характер поверхности могут быть изменены при последующем полировании жидкостью, содержащей абразивный материал другой зернистости. Чем чище исходная поверхность, тем на меньшую величину она улучшается за одну операцию. Так, при применении зернистости 230—М20 чистота поверхности улучшается на один, максимум два разряда. При более крупной зернистости она изменяется на 1 класс — четыре разряда. Поэтому жидкостное полирование обычно ведут в две и больше операций, применяя на каждой последующей операции в зависимости от требуемой чистоты все более мелкую зернистость. При чистоте исходной поверхности 7-го класса зернистость абразива на первой операции следует брать не крупнее № 180—230.

Так, для жидкостного полирования сверл канд. техн. наук Б. С. Коршунов рекомендует применять электрокорунд зернистостью 120—150 в соотношении 1 часть на 2,5 части рабочей жидкости, работая при давлении не ниже 4 ат. При этом рекомендуется располагать форсунку на расстоянии 75 мм от сверла и под углом к нему 90°. Скорость вращения сверл должна быть 3—4 м/мин.

В целях повышения производительности и улучшения условий труда рабочих, занятых на операциях пескоструйной обработки и ручного полирования сверл и других инструментов, ВНИИ разработал конструкцию установки для очистки этих инструментов и снятия с их поверхности обезуглероженного после обработки слоя, путем жидкостного полирования их. Конструкция представляет собой вращающийся со скоростью 5—10 об/мин барабан, в котором размещены три сопла и может одновременно обрабатываться большое количество инструментов, помещаемых в барабан. Эта конструкция внедрена на инструментальных заводах «Фрезер», Сестрорецком им. Воскова на операции очистки сверл диаметром от 2 до 20 мм, что позволило повысить производительность труда в несколько раз. Работа по полированию ведется жидкостью, содержащей на 2,5 весовых частей жидкости 1 часть зерна электрокорунда № 80—120, подаваемой под давлением 4—6 ат. Угол атаки струи 90°, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности 75 мм. Жидкость представляет собой 1,5—2%-ный содовый раствор с добавкой 1% нитрита натрия. Время обработки 20—40 мин. в зависимости от величины давления.

После обработки сверла во избежание коррозии промываются в горячей жидкости, содержащей 1,5—2% нитрита натрия и 0,3 кальцинированной соды. В результате обработки достигается чистота 6—7-го класса.

Максимальная чистота, которую можно достигнуть при жидкостном полировании при применении микропорошков М14—М10, равна 10—11-му классу.

Процесс жидкостного полирования по производительности не выше других видов полирования и не устраняет таких дефектов поверхности, как риски, но вместе с тем он позволяет выявить трещины, раковины и т. п., образовавшиеся при предшествующей

обработке, и создает такую поверхность, которая лучше удерживает смазку и этим обеспечивает большую стойкость.

После жидкостного полирования поверхность не имеет направленных следов обработки, прижогов, микротрещин, а представляет собой матовую поверхность с равномерно распределенными углублениями. Этот процесс повышает износостойкость, усталостную прочность и стойкость деталей от коррозии.

Так, по результатам исследований Э. А. Сателя и М. А. Елизаветина износостойкость поверхности, полученной методом гидрополирования, повышается на 25—30% по сравнению с механическим полированием. Усталостная прочность стали, обработанной гидрополированием, повышается на 15%.

При обработке жидкостным полированием улучшаются режущие кромки, и стойкость инструмента возрастает. Жидкостное полирование протекает без образования пыли и нагрева с наклепом обрабатываемых поверхностей. Его неширокое пока применение вызвано недостаточной изученностью, а также отсутствием серийного выпуска установок. Эта задача до сих пор не решена, хотя ее решение является весьма необходимой и не столь трудной. Недостатком жидкостного полирования является неравномерность съема металла, что также мешает распространению этого процесса.

ДОВОДКА

Абразивным инструментом в процессе доводки являются тонкозернистые шлифовальные круги зернистостью 180-М14, шлифпорошки и микропорошки из электрокорунда, карбида кремния, корунда, карбида бора, алмаза и такие мягкие полировальные материалы, как окись хрома, крокус, трепел, венская известь, пасты ГОИ и т. п.

Для доводки стали применяют главным образом порошки и микропорошки из корунда и белого электрокорунда. Как показал опыт, доводка колец подшипников из стали ШХ15 пастой из белого электрокорунда размерностью 1 мк обеспечивает чистоту поверхности 13—14-го классов.

Для доводки чугуна применяют микропорошки из карбида кремния и белого электрокорунда, для доводки твердых сплавов — порошки из карбида бора и алмаза.

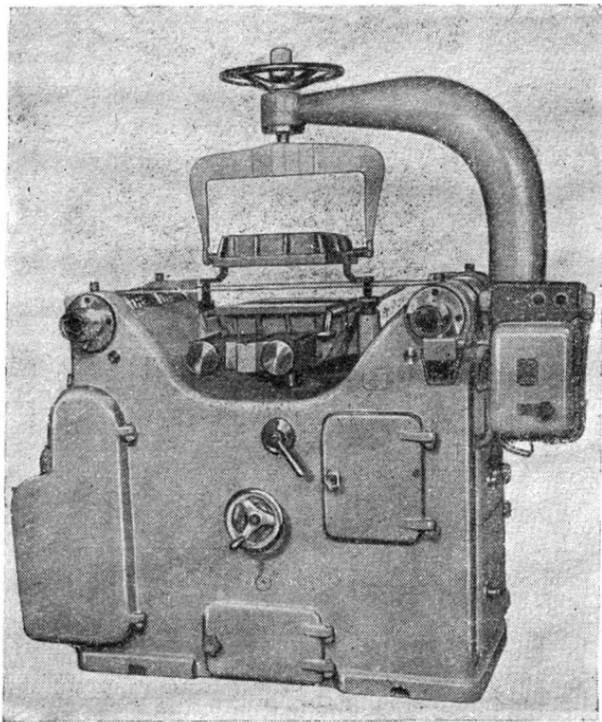
Абразивные материалы применяются или в свободном виде, или шаржированными в притирах.

Полировальные материалы применяются только в свободном виде.

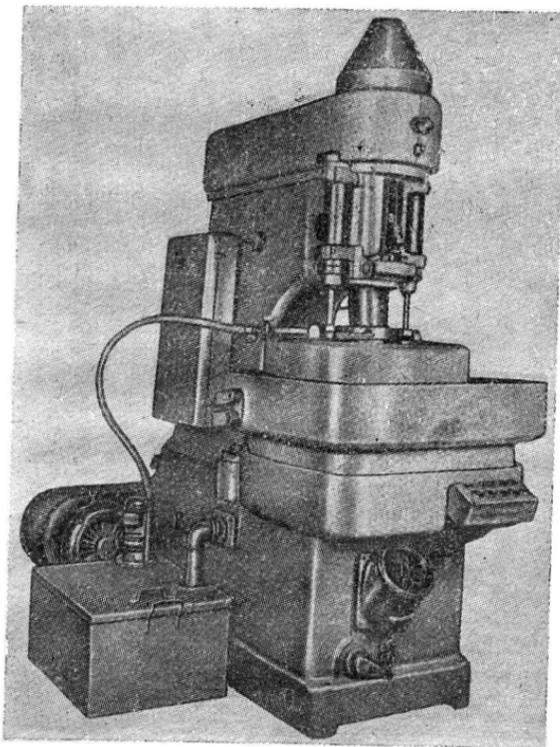
Таким образом, процессы доводки совершаются как жесткими абразивными инструментами с шаржированными зёрнами, так и свободными незакрепленными зёрнами.

В зависимости от вида применяемых абразивных инструментов, материалов и способа их нанесения доводку можно подразделить на следующие виды:

- 1) дисками или притирами, шаржированными абразивом;



Фиг. 93. Станок для доводки плоско-параллельных плиток.



Фиг. 94. Станок мод 3816 для доводки круглых и плоских деталей.

2) дисками или притирами, покрытыми свободно лежащей абразивной смесью;

3) абразивными инструментами (кругами, брусками).

Наибольшая точность и чистота поверхности достигается при применении доводки шаржированными абразивом дисками. Поэтому этот вид доводки широко применяется при изготовлении плоскопараллельных концевых мер.

Доводка свободной абразивной смесью производится или путем периодического покрытия доводочных дисков этой смесью или путем непрерывной ее подачи. Этот способ доводки применяется в производстве калибров, поршневых пальцев и других деталей массового или крупносерийного производства.

Третий способ применяется при машинной доводке различных деталей массового производства.

Другой характерной особенностью доводочных процессов являются небольшие по сравнению с шлифованием скорости, при которых они осуществляются (5—180 м/мин).

Процессам доводки подвергаются детали, которые должны иметь высокую точность и чистоту поверхности 10—14-го класса. К ним принадлежат плоско-параллельные концевые меры, калибры и детали других мерительных инструментов, детали подшипников, гидравлической и топливной аппаратуры, приборов, двигателей внутреннего сгорания и других машин, а также режущие инструменты, которые доводятся для повышения их стойкости.

В существующих конструкциях доводочных станков детали помещаются в специальные сепараторы (рамки) между двумя доводочными дисками (плитами) или кругами, получая сложные относительные перемещения. Сепараторы вместе с деталями получают или возвратно-поступательное прямолинейное движение в продольном и поперечном направлении, как это осуществлено в станке конструкции Семенова для доводки плоско-параллельных измерительных плиток (фиг. 93), или совершают планетарное, качательное или другое движение, в результате чего каждая точка детали получает сложную траекторию.

В станках для доводки круглых деталей сепараторы устанавливаются обычно эксцентрично. Доводочные диски — оба или один — получают вращательное движение с разными или одинаковыми скоростями или остаются неподвижными. Верхний диск обычно может самоустанавливаться относительно деталей.

На фиг. 94 показана конструкция подобного доводочного станка.

Для ручной круглой доводки широко применяются простые станки, в которых деталь устанавливается и вращается между центрами передней и задней бабки или в патроне передней бабки, а притир — втулка или жимок — удерживается и совершает продольные перемещения руками рабочего.

Для ручной доводки плоских деталей или плоских поверхностей на деталях пользуются вращающимися доводочными планшайбами,

при применении которых деталь удерживается и перемещается вручную.

Для доводки применяются также станки, у которых вместо притирочных дисков могут быть установлены тонкозернистые круги. Выпускаются также бесцентрово-доводочные станки для доводки круглых деталей.

Доводочные диски в зависимости от их назначения и вида абразивного материала, применяемого для их шаржирования, изготавливаются из чугуна, стали, меди, бронзы, свинца, стекла и других материалов. Как правило, твердость материала доводочного диска должна быть меньше, чем твердость обрабатываемых деталей для того, чтобы абразивный материал шаржировался в притир, а не в детали. Чаще всего для получения при доводке абразивными материалами высокой чистоты поверхности применяются диски из чугуна. Как показала практика, для достижения лучшего шаржирования и стойкости дисков в работе их следует изготавливать из мелкозернистого чугуна перлитно-ферритовой структуры следующего химического состава: 3,0—3,5% С, 1—2% Si, 0,5—0,8% Mn, не более 0,15% S и не более 0,4% P.

Твердость этого чугуна должна быть в пределах $H_B = 180 \div 220$.

Чугун перед употреблением подвергается отжигу при нагреве до 800—810° с выдержкой при этой температуре в течение 3 час. Охлаждение идет по 30° в 1 час до температуры 660°. Дальнейшее охлаждение происходит с печью.

Доводочные диски из мягких материалов: меди, свинца и т. п. применяются при доводке глубоких отверстий малых диаметров, а также для предварительной доводки.

Диски из закаленной стали и стекла «пирекс» или зеркального однородной структуры употребляют при очень тонкой доводке деталей (и малом припуске) такими нешаржирующимися полировальными материалами, как крокус, окись хрома, венская известь и т. п.

Для доводки резьбы притиры изготавливают из чугуна перлитовой структуры повышенной твердости.

Стойкость доводочных дисков зависит от величины снимаемого припуска, вида и зернистости абразивного материала, материала диска и давления при доводке. Чем больше снимаемый припуск и чем крупнее зернистость, тем меньше стойкость диска. Чем выше твердость абразивного материала и его хрупкость, тем ниже стойкость диска. Поэтому при работе с алмазом, карбидом бора и карбидом кремния диски изнашиваются быстрее, чем при применении электрокорунда. Чем ниже твердость диска, тем быстрее он изнашивается. Износ дисков особенно растет с увеличением давления при доводке свыше 3,5—4 кг/см² (табл. 22).

Наиболее высокий съем металла достигается при доводке дисками из стали и меди. Притиры из чугуна дают также высокий съем.

При доводке отверстий малых диаметров (до 15 мм) обычно используют медные притиры, для отверстий диаметром выше 15 мм применяются притиры из чугуна.

Износ притиров в % от веса снимаемого материала.

Материал притира	Абразивные материалы		
	Наждак	Электрокорунд	Карбид кремния
Чугун	0,8	1,2	1,5
Мягкая сталь	1,1	1,5	1,9
Медь	2,3	3,0	4,1

Для обеспечения лучшего качества доводки длина притира должна быть больше диаметра доводимого отверстия.

Перед установкой на доводочный станок доводочные диски подвергаются процессу притирки. В зависимости от требуемой чистоты процесс притирки ведется в две или три операции с применением абразивов соответствующей зернистости. Обычно притирку ведут по методу трех плит, при котором: сначала притирается первая плита со второй, затем первая плита притирается с третьей, потом вторая с третьей и, наконец, вторая плита с первой и первая с третьей. Этот способ обеспечивает хорошую плоскостность и прямолинейность дисков.

Чрезвычайно важно для точности и качества доводки иметь диски с точными рабочими прямолинейными плоскостями. Для этой цели через определенные промежутки времени выравнивают диски путем их приработки друг к другу, применяя для этой цели те же микропорошки абразивных материалов, при которых производилась последняя операция первоначальной притирки.

При проведении процесса доводки абразивный материал подается на доводочные диски в виде смеси с какой-либо жидкостью. В зависимости от требований, которые выдвигаются самим процессом, выбирается вид жидкости, которая одновременно выполняет роль смазочного вещества. Для доводки стальных и чугунных деталей обычно применяются абразивные смеси с керосином или маслом.

Установлено, что доводка абразивной смесью, составленной из микропорошков М28, одной части керосина и двух частей веретенного масла 2, повышает съем металла в 2 раза. Чем крупнее зернистость абразивного материала, тем больше должна быть вязкость смеси. Для повышения производительности в смесь добавляют стеарин в количестве 2,5—3% от веса жидкости. Добавка стеарина в пределах этих количеств повышает производительность доводки. Также повышается интенсивность съема при добавлении в керосино-абразивную смесь 3% олеиновой кислоты и 7% канифоли.

Чистота поверхности доводки зависит главным образом от степени зернистости абразива: чем она мельче, тем лучше чистота. Однако и вид смазки влияет на качество поверхности. Так, применение водных абразивных смесей несколько ухудшает чистоту, а

разведение полирующих материалов на вазелине, спирте и чистом авиабензине, наоборот, улучшает чистоту и вид поверхности. Поэтому при доводке концевых мер обычно применяют смеси, разведенные на авиабензине.

При доводке цветных металлов применяют смеси на стеариновой и олеиновой кислотах, или с лядровым маслом.

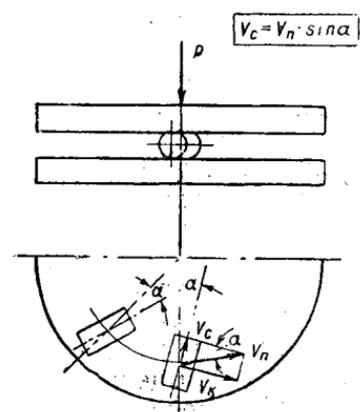
Хорошие результаты дают смеси с парафином в качестве смазывающего вещества. Содержание абразива в смеси должно быть около 5—6%.

При доводке шаржированными дисками необходимо производить втирание абразива до тех пор, пока поверхность диска не примет одинаковый матовый цвет без блестящих пятен.

Шаржирование следует вести плитам высокой плоскостности, смачивая абразив керосином или бензином с добавкой стеарина.

Повторное шаржирование доводочных дисков следует производить той же абразивной смесью или смесью, содержащей абразивные порошки несколько более крупной зернистости. Применение порошков более мелкой зернистости в этом случае не рекомендуется, так как производительность доводки уменьшится, а чистота не улучшится, в связи с тем, что оставшиеся от первого шаржирования зерна будут создавать на доводимой поверхности более глубокие риски.

Фиг. 95. Расположение круглых деталей в сепараторе.



Правку притиров для восстановления их формы следует производить на чугунных плитах электрокорундовыми порошками с применением смазки из керосина и стеарина.

Большое влияние на производительность и качество имеет установка обрабатываемых деталей и конструкция сепараторов.

Детали, подлежащие доводке, должны подвергаться строгой сортировке по размерам (толщине или диаметру), с тем, чтобы производилась одновременная доводка всех уложенных в сепараторы деталей, а не части деталей, имеющих большие размеры.

Во избежание появления царапин на доводимой поверхности круглых деталей и излишнего трения детали о стенки отверстий сепаратора, их изготовляют из мягкого материала, даже из дерева, или делают сепараторы с центрами, в которые устанавливают доводимые детали; во всех случаях отверстия в сепараторах делают на 2—3 мм больше диаметра детали.

Для увеличения производительности доводки круглых деталей отверстия в сепараторах делают под углом α (фиг. 95) к радиусу сепаратора. Величина $\alpha = 5 \div 15^\circ$. Чем лучше должна быть чистота поверхности, тем меньше делают угол α . Установка сепараторов с эксцентриситетом относительно доводочного диска на

20—25 мм и больше также повышает производительность доводки, ухудшая, однако, ее качество.

Установка сепараторов с эксцентриситетом преследует цель более равномерного износа диска.

Режимы доводки зависят от ее вида и требований, к ней предъявляемых. При машинной доводке скорости доводочных дисков обычно берутся в пределах 100—180 м/мин. При машинной доводке плитами скорость возвратно-поступательного движения лент сепаратора составляет 8—15 м/мин. При ручной доводке твердых сплавов на вращающихся дисках их скорость берется 30—60 м/мин. Удельное давление, как правило, не должно превышать 1,5—2 кг/см². Такая доводка твердосплавных резцов повышает их стойкость в несколько раз.

Чистота поверхности деталей, подвергаемых доводке, обычно имеет 7—9-й класс и в результате этого процесса (в несколько последовательных операций) может быть повышена на 3—5 классов. Чем точнее и чище должна быть поверхность, тем меньше должно быть давление, тем мельче должна быть зернистость абразивных и полировальных материалов, тем разнообразнее и многократнее должны быть движения деталей и дисков.

Иногда, как например, в производстве плоскопараллельных концевых мер длины, целью доводки является не только достижение требуемой размерности, высокой точности и чистоты поверхности, но и придание свойства притираемости, т. е. способности соединяться при сдвигании относительно друг друга.

Для достижения притираемости доводку измерительных поверхностей концевых мер разбивают на пять операций, причем для последних двух операций доводочные плиты шаржируются микропорошками из белого электрокорунда размерностью 3—1 мк, благодаря чему достигается чистота 13 б класса.

Микропорошки размерностью 1 мк имеют гранулометрический состав зерен от 0 до 1 мк. Только отдельные зерна имеют размерность до 3 мк. Микропорошки 2 мк содержат свыше 99% зерен размерностью от 0,25 до 2 мк и отдельные зерна до 4 мк. Микропорошки 3 мк имеют в своем составе зерна от 0,75 до 3 мк и отдельные зерна, составляющие десятые доли процента зерна размерностью до 6 мк. Такая размерность и чистота состава и позволяют обеспечить столь высокую чистоту поверхности.

ПОВЫШЕНИЕ ТВЕРДОСТИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

В тех случаях, когда применяемый абразивный инструмент имеет в процессе шлифования большой износ, или в случаях быстрого осыпания кромки круга, применяют повышение твердости пропиткой круга в растворе бакелита и последующей его бакелизации.

Таким способом удается повысить твердость на одну — четыре степени и больше.

Как показывает опыт многих заводов, этот способ повышения твердости является весьма эффективным; значительно повышает производительность шлифования и снижает расход абразивного инструмента.

Ниже приводится таблица Московского автозавода им. Лихачева для назначения концентрации раствора бакелита, необходимого для повышения твердости круга.

Номер зернистости абразивного инструмента	Концентрация раствора бакелита для повышения твердости на:			
	степень	две степени	три степени	четыре степени
16	0,1	0,16	0,21	0,25
24	0,08	0,145	0,18	0,22
36	0,07	0,13	0,165	0,2
46	0,06	0,11	0,15	0,18
60	0,05	0,09	0,125	0,15
80	0,04	0,07	0,1	0,13
100	0,035	0,06	0,085	0,11
120	0,03	0,055	0,075	0,09

Для определения удельного веса требуемого раствора бакелита к найденному в таблице числу прибавляют удельный вес растворителя. Обычно в качестве растворителя применяется ацетон, удельный вес которого равен 0,8.

Таким образом, для повышения твердости круга зернистости 46, например на две степени, надо в растворитель влить такое количество бакелита, чтобы удельный вес раствора был равен 0,91.

Твердость круга до бакелизации	Процентное содержание бакелита в растворе для кругов зернистости			Твердость круга после бакелизации
	24	46	60—80	
M1	15	15	15	M2
M2	15	15	—	M3
M2	35	25	55	CM1
M3	15	15	—	
M2	65	35	55	CM2
M3	45	25	50	
CM1	25	15	35	
M3	70	35	—	C1
CM1	45	25	50	
CM2	25	15	45	
M3	—	55	—	C2
CM1	70	45	—	
CM2	55	35	—	
C1	55	25	55	
CM2	70	55	—	CT1
C1	65	35	—	
C2	35	25	55	
C1	—	55	—	CT2
C2	70	35	—	
CT1	60	35	—	
CT1	70	55	—	CT3
CT2	60	45	—	
CT2	70	60	—	T1

Пропитку надо вести так, чтобы раствор покрывал не более $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$ высоты круга. Для этого раствор вливают в ванну с решетчатым основанием и подлежащие пропитке круги укладывают на решетку.

Пропитку следует прекратить после того, как раствор выступит на поверхности круга.

Пропитанные круги подвергают сушке, в процессе которой круг несколько раз переворачивают, чтобы не было стекания раствора в одну сторону.

Сушка должна вестись в хорошо вентилируемом сушильном шкафу или на открытом воздухе. После сушки круги подвергаются бакелизации в электрической печи в течение 20—25 час. в постепенном подъеме температуры до 150° и с выдержкой при температуре 160 — 170° в течение 6—10 час. Чем больше размеры кругов, тем длительнее время бакелизации и выдержки. По окончании бакелизации производится охлаждение в течение 6—9 час., после чего круги выгружаются и испытываются на разрыв.

Как правило, механическая прочность кругов значительно возрастает. Операции пропитки, сушки и бакелизации надо проводить в резиновых перчатках, так как раствор вредно влияет на кожу рук. Следует также учитывать, что пары ацетона взрывоопасны, поэтому при работе с раствором и ацетоном запрещается курение и применение огня.

Существует способ повышения твердости круга путем пропитки его раствором бакелита в денатурированном спирте.

В нижеприведенной таблице показано содержание жидкого бакелита в растворе для повышения твердости кругов зернистостью № 24—80.

Денатурированный спирт берется в растворе с водой в соотношении 1 : 1.

Операции пропитки, сушки и бакелизации производятся так же, как и при использовании бакелитового раствора с ацетоном.

ТАБЛИЦА ВЫБОРА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТОВ

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Бабки станков	Чугун	Обдирка плоскостей	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б
Блок цилиндров	"	Обдирка приливов, литников и т. п.	КЧ	16—24	СТ1—СТ3	Б
Блок зубчатых колес	Сталь	Хонингование	КЗ	120	СТ3	К
		Внутреннее	Э	46—60	С1—С1	К
		Плоское	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
Болт шатунный	Сталь сырая	Круглое наружное	Э	80	С1—С2	К
		Плоское карусельное	Э	36—46	С1—С2	К
		Бесцентровое	Э	46—60	С2—С1	К
Бойки для молотов	Сталь закаленная	Круглое наружное	Э	46—60	СМ1—СМ2	К
		То же	Э	46—60	СМ2—С1	К
		Бесцентровое	Э	24—36	СТ1—СТ2	К
Вал карданный	Сталь углеродистая	Обдирочное	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
		Плоское — периферий круга	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
		Предварительное шлифование крестовины	Э	46	С2—С1	К
Вал коленчатый автомашин ЗИЛ	Сталь хромистая	Окончательное шлифование крестовины	Э	80	СТ1	К
		Предварительное круглое шлифование коренных шеек и галтелей	Э	36—46	СТ1—Т1	К
Вал коленчатый автомашин ЗИЛ	"	Окончательное круглое шлифование коренных и шатунных шеек	Э	46	СТ2—СТ3	К
Вал кулачковый автомашин ЗИЛ	"	Предварительное круглое наружное шлифование шеек	Э	46	СТ1	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Вал первичный Вал промежуточный Вал коленчатый компрессора Вал распределительный автомашин ГАЗ-51	Сталь	Предварительное круглое наружное шлифование кулачков и эксцентрика	Э	24	СТ3	К
		Окончательное шлифование кулачков и эксцентрика	Э	60	СТ1	К
		Внутреннее шлифование	ЭБ	60	СТ1	К
		Круглое наружное	Э	60	С2	К
		То же	Э	46	Т1	К
Вал вторичной коробки перемены передачи машины М-20	"	"	Э	46	СТ3	К
Валики шлицевые	Сталь сырая	Круглое наружное То же	Э	36—46	С2—СТ1	К
			Э	46	СМ2—С1	К
Валки для горячей прокатки	Чугун	Круглое обдирочное шлифование Предварительное круглое наружное То же Окончательное круглое наружное	КЧ	16—24	СТ3—Т1	Б
			КЧ	86	СМ1—СМ2	К
			КЧ	24—36	С1—С2	Б
			КЧ	46—60	СМ2—С1	Б
Валки для холодной прокатки	Чугун	Отрезка Предварительное круглое наружное Окончательное круглое наружное шлифование Доводочное круглое наружное	КЧ	24—36	СТ1—СТ2	Б
			КЧ	36	С1—С2	Б
			К2	60—80	С1—С2	Б
			К3	М40	СМ1—СМ2	Б

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связки
Валки для холодной прокатки	Сталь закаленная	Предварительное круглое наружное	Э	46—60	СМ1—СМ2	К
Валы	Сталь сырая	Окончательное Доводочное	Э	100—120	М3—СМ1	К
		Круглое наружное	Э и ЭБ	М28 46	С1—СТ1	Б К
Веретена	Сталь закаленная	То же	Э и ЭБ	46	СМ1—С1	К
	Сталь сырая	Предварительное круглое наружное	Э	46	СТ2—СТ3	К
	Сталь закаленная	Бесцентровое предварительное	Э	46	С2—СТ1	К
		Окончательное круглое наружное	ЭБ	60	С1—С2	К
Вилки велосипедные	Сталь	Окончательное бесцентровое	Э	46—60	СМ2—С1	К
		Ручная зачистка мест сварки	Э	16—24	СТ2—Т1	Б
Вилы	„	Заточка зубьев	Э	24—36	СТ2—СТ3	К
		Винты микрометров	„	Предварительное круглое наружное	Э	24 46—60	СТ3—Т1	Б
Окончательное круглое наружное	Э			46—60	СМ2—С2	К
Вкладыши подшипников	Бронза	Круглое наружное	КЧ	36—46	М3—СМ1	К
		Внутреннее	КЧ	46—60	М3—СМ1	К
Втулки	Сталь закаленная	Круглое наружное	З	46—60	СМ2—С1	К
		Внутреннее	Э	46—60	СМ1—СМ2	К
Гильзы трактора	Сталь	Предварительное внутреннее	КЗ	100	М3—СМ1	К
		Окончательное внутреннее	КЗ	230	М3—СМ1	К
		Круглое наружное	Э	36—46	СМ2—С1	К
Гильзы (автотракторные)	Чугун специальный	Внутреннее	Э	46	СМ1—СМ2	К
		Хонингование	КЗ	120—150	С1—СТ1	К
Гребенка зуборезная	Сталь быстрорежущая	Доводка	КЗ	М20—М28	М3—СМ1	К
		Шлифование рабочей части зубьев	ЭБ	60	СМ2	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи	
Гребенка зуборезная	Сталь быстрорежущая	Заточка передней грани зубьев чашечными кругами	КЗ	150—180	С2	Б	
	То же	Заточка передней грани по выемке	ЭБ	80	СМ2	К	
Долбяки зуборезные	"	Шлифование плоскостей торцом круга	ЭБ	36—46	М3—СМ1	К	
	"	Шлифование плоскостей периферией круга	ЭБ	60—80	СМ1—СМ2	К	
		Шлифование зубьев:					
		а) модуль 1	ЭБ	120—150	СМ1—СМ2	К	
		б) " 2	ЭБ	80—100	СМ1—СМ2	К	
Долота и стамески	Сталь инструментальная и быстрорежущая	Заточка	ЭБ	40—60	М3—СМ1	К	
		Плоское торцом круга	Э	24—36	М3—СМ1	К	
	То же	Шлифование краев	Э	36—46	С1—С2	К	
	Сталь	Плоское торцом круга	Э	24	СМ1—С2	К	
			Э	24	С1—С2	Б	
	Заклепочные швы и соединения	"	Зачистка после заклепки	Э	24—36	С1—СТ2	К
				Э	24—36	СТ2—СТ3	Б
Звенья цепей сельскохозяйственных машин	Чугун	Обдирочное	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	К	
	Ковкий чугун (отожженный)	"	КЧ	16	СТ3—Т1	Б	
			Э	16—24	С2—СТ1	К	
			Э	16—24	СТ1—СТ2	Б	
Звездочки для сельскохозяйственных машин	Сталь марганцовистая	"	Э	16—24	СТ2—СТ3	К	
			Э	16—24	СТ3—Т1	Б	
Зенковки конусные	Чугун серый	Зачистка зубьев	КЧ	3К	СТ2	К	
	Сталь быстрорежущая	Заточка передней поверхности зубьев	ЭБ	46	СМ2	К	
	То же	Заточка задней поверхности зубьев чашечными кругами	ЭБ	60	СМ2	К	

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Зенковки конусные	Сталь быстрорежущая	Доводка	КЗ	150—180	С 2	Б
Зенкеры насадные цилиндрические для сквозных отверстий	Сталь быстрорежущая	Заточка чашечным кругом	ЭБ	46	СМ2	К
Зубила	Сталь инструментальная	Доводка чашечным кругом	КЗ	180	С2	Б
		Обдирочное	Э	24	СТ1—СТ2	К
Иголки	Сталь закаленная	Заточка	Э	60	С1—С2	К
		Заточка острия	Э, КЗ	46—60	СТ1—СТ3	К
Калибры, кольца резьбовые	Сталь закаленная	Плоское — торцом круга	Э	24—36	М3—СМ1	К
	То же	Плоское — периферией круга	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
	•	Внутреннее	ЭБ	60—80	М3—СМ1	К
	•	Предварительное шлифование резьбы	ЭБ	150	СМ2—С2	К
	•	Окончательное шлифование резьбы	ЭБ	230	С2—СТ1	К
Калибры, пробки гладкие, вставки	Сталь закаленная	Предварительное шлифование измерительной поверхности	Э	46	С1	К
	То же	Окончательное шлифование измерительной поверхности	ЭБ	60—80	СМ1—СМ2	К
	•	Шлифование торца	Э	46—80	С1—С2	К
	•	Шлифование центров	Э	60—80	С2—СТ1	К
	•	Шлифование фаски	Э	46—60	С1—С2	К
Калибры, пробки резьбовые	Сталь закаленная	Шлифование резьбы по целому металлу:	ЭБ	М28	С2—СТ2	К
		шаг резьбы до 0,75 мм	ЭБ	М40	Т1—Т2	Б
	То же	шаг резьбы от 1,0 до 1,5 мм	ЭБ	М40	С2—СТ1	К
	•	шаг резьбы 1,75 мм	ЭБ	230	СТ3—Т1	К
			ЭБ	280	С1—С2	К
			ЭБ	180	СТ3—Т1	Б

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Калибры, пробки резьбовые	Сталь закаленная	Шлифование резьбы по нарезанному профилю; шаг резьбы до 2,0 мм	ЭБ	280	C1—C2	К
			ЭБ	230	CT1—CT2	Б
	То же	Шлифование резьбы по нарезанному профилю: шаг резьбы от 2,5 до 4,0 мм	ЭБ	230	CM2—C1	К
			ЭБ	180	CT1—CT2	Б
Калибры, пробки резьбовые	"	шаг резьбы от 4,5 до 5,0 мм	ЭБ	230	CM2—C1	К
			ЭБ	150	CT1—CT2	Б
		Шлифование резьбы по нарезанному профилю: шаг резьбы от 5,5 до 6,0 мм	ЭБ	180	CM1—CM2	К
			ЭБ	120	C2—CT1	Б
Калибры-скобы	Сталь сырая штампованная	Плоское обдирочное шлифование торцом круга	Э	24	CM2—C1	К
			Э	24	C1—C2	Б
	То же	Плоское шлифование периферийной круга Шлифование размерных плоскостей	Э	46—60	CM1—CM2	К
Э	60		CM1	К		
Картера авто-тракторных двигателей	Чугун серый	Плоское шлифование	КЧ	36—46	CM2—C1	К
Клапаны авто-тракторных двигателей	Сталь	Предварительное плоское шлифование торцов стержня	Э	24—36	CM2—C1	Б
			Э	36—46	CM1—CM2	Б
		Окончательное шлифование торцов стержня	ЭБ	45—60	C2—CT1	К
			Э	36—46	C2—CT1	К
		Предварительное бесцентровое	Э	60	C1—C2	К
			Э	80	BT1	К
		Бесцентровое шлифование радиуса и конуса стержня	Э	80	BT1	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Клапаны авто-тракторных двигателей	Сталь	Окончательное круглое шлифование фаски клапана	Э	100	СТ2	К
Клещи	Сталь сы-рая	Обдирочное	Э	16—24	СТ2—СТ3	Б
Ключи гаеч-ные	Сталь	Заточка	Э	24—36	СТ1—СТ2	Б
		Обдирочное шли-фование плос-костей	Э	16—24	СТ2—СТ3	Б
Колосники Кольца порш-невые (авто-тракторные)	Чугун ков-кий	Обдирочное шли-фование кон-турных поверх-ностей	Э	24—36	СТ2—СТ3	Б
		Обдирочное шли-фование зева ключа	Э	16—24	СТ1—СТ2	К
	Чугун	Обдирочное	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	Б
		Бесцентровое внутреннее и наружное об-дирочное	Э	24—36	СТ2—СТ3	К
	Чугун	Круглое наруж-ное	КЧ	36—46	СМ2—С1	К
	Чугун	Предварительное двухстороннее плоское шли-фование тор-цов	КЧ	24—36	С2—СТ1	Б
			Э	24—36	С2—СТ1	К
Чугун	Плоское шлифо-вание перифе-рией круга	Э	46—60	СМ1—С1	К	
Чугун	Окончательное плоское шли-фование	КЧ	100	С2	К	
Кольца под-шипников	Сталь под-шипников	Шлифование бортиков	ЭБ	80	С2	Б
		Плоское шлифо-вание	ЭБ	80	СМ2	Б
Коньки	Сталь сы-рая	Шлифование бо-ковых плоско-стей полостей	Э	36—46	СМ2—С1	Б
Корпус плуга	То же	Заточка вручную	Э	36—46	С1—С2	К
	Чугун	Обдирочное	Э	16—24	СТ2—СТ3	Б
Корпус короб-ки скоростей станка	Чугун	Плоское шлифо-вание торцом	КЧ	24—36	С1—С2	Б
Корпус втулки поворотного кулака		Круглое	Э	36	СТ1	К
Кронштейны (автотрак-торные)	Чугун	Плоское шлифо-вание торцом	Э	46	СМ2	К
		Плоское обди-рочное шлифо-вание	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Крюки	Сталь	Обдирочное	Э	24	СТ2—СТ3	Б
Кулисы (железнодорожные)	"	Внутреннее	Э	16—24	СТ1—СТ2	Б
Кулисный камень	Сталь цементированная закаленная	"	Э	36—46	СМ1—С1	К
Лемеха (сельскохозяйственные)	Сталь сырая	Обдирочное шлифование поверхности	Э	16—24	СТ2—СТ3	Б
Лерки (круглые плашки)	Сталь инструментальная быстрорежущая	Плоское Скашивание фаски у отверстия	Э Э	24—36 60—80	СМ1—СМ2 СТ1—СТ2	К К
Литье	Чугун ковкий	Обдирочное	Э	16—24	СТ3—Т1	Б
Линейки измерительные	Сталь закаленная	Плоское	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
Лопаты	Сталь	Заточка кромки	Э	24—36	СТ2—СТ3	Б
Магниты	"	Плоское шлифование торцом круга	Э	16—36 24—46	М3—СМ2 С1—С2	К Б
Матрицы волочильные	Сталь закаленная	Внутреннее	ЭБ	46—60	СМ1—С1	К
	Твердые сплавы	Внутреннее	КЗ	46—80	СМ1—СМ2	К
Матрицы для литья под давлением	Сталь	Плоское шлифование торцом круга	Э	24—36	СМ1—СМ2	К
Маховики	Чугун	Плоское шлифование торцом круга	КЧ КЧ	24 24	С1—С2 СМ2—С1	Б К
Метчики	Сталь	Обдирочное	Э	36	СТ1—СТ2	Б
	Сталь закаленная	Плоское шлифование квадрата	Э	46—60	С1—С2	К
	То же	Круглое шлифование режущей передней части	Э	46—60	СМ2—С2	К
	"	Шлифование канавок	Э	46—60	С1—С2	К
	"	Заточка под зубом	Э	46—80	СМ2—С1	К
	"	Шлифование резьбы:				
		а) шаг резьбы до 1,0 мм	ЭБ	М—28	СТ1—СТ2	К
		б) то же, от 1,0 до 1,5 мм	ЭБ	М40	С2—СТ1	К
		в) то же, от 1,5 до 2,5 мм	ЭБ	230—280	С2—СТ1	К
		г) то же, от 2,5 до 4,0 мм	ЭБ	120—180	СМ2—С2	К

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Молотки ручные Направляющие станков	Сталь закаленная Чугун	Обдирочное	Э	24	СТ2—СТ3	Б
		Предварительное плоское	КЧ, Э	24—36	СМ2—С1	Б
		Окончательное плоское	КЧ, Э	46—60	СМ1—СМ2	Б, К
Наковальня	Сталь	Плоское шлифование торцом круга	Э	24—36	СМ2—С2	Б, К
Напильники	Чугун отбеленный	Обдирочное плоское	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	Б
	Сталь сырая	Обдирочное плоское	Э	16—24	СТ1—СТ3	Б
	То же	Снятие заусениц	Э	24	СТ1—СТ2	Б
	"	Плоское обдирочное	Э	24—36	СТ1—СТ2	К
Бараны микрометров	Сталь сырая	Бесцентровое наружное шлифование круглых напильников	Э	36—46	С2—СТ1	К
	То же	Круглое наружное	Э	60	СМ2—С1	К
	То же	Подрезка торца и фаски	Э	60	СМ2—С1	К
Ножовочные полотна с крупным шагом	Сталь закаленная	Заточка	Э	46—60	С2—СТ1	Б
Ножовочные полотна с мелким шагом	То же	Заточка	ЭБ	80—120	СМ2—С1	К
Ножи машинные	Сталь закаленная	Плоское шлифование торцом круга	Э	24—36	СМ2—С1	Б
	То же	Отрезка	Э	46—60	СТ1—СТ2	Б
	"	Заточка ручная	Э	36—46	СМ2—С2	Б
	"	Заточка автоматическая	Э	60—80	СМ1—С1	К
Ножи столовые	Сталь инструментальная	Доводка ручная	ЭБ	120—180	СМ2—С2	К
	То же	Заточка предварительная	Э	36—46	С—СТ	Б
	То же	Заточка окончательная	Э	60—80	СМ2—С1	Б
Ножи перочинные	Сталь инструментальная	Заточка предварительная	Э	60—80	СМ1—СМ2	К
	То же	Заточка окончательная	Э	60—80	С1—С2	К
	"	Заточка окончательная	ЭБ	150—180	СМ2—С1	К
	"	Доводка режущего лезвия	ЭБ	230—280	СМ1—С1	К

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Ножи для косилок и комбайнов	Сталь сырая	Плоское шлифование торцом круга	Э	24—36	СМ2—С1	Б
	Сталь закаленная	Заточка на автоматических станках	Э	36—46	СМ2—С1	Б
		Заточка на ручных машинках	Э	36—46	С1—СТ1	Б
Ножи для мясников	Сталь инструментальная	Плоское	Э	46	СМ1—СМ2	Б
Ножи вставные для разверток	То же	Заточка	Э	60—80	С1—С2	Б
	Сталь инструментальная и быстрорежущая	Плоское шлифование торцом круга	Э	36—46	М3—СМ1	К
		То же	То же	Э	24—36	СМ2—С2	Б
Ножи вставные для фрез	"	Шлифование ребра, основания торца и снятие затыльника	Э	36—46	СМ1—СМ2	К
		Заточка	Э	36—46	С1—С2	Б
		"	Э	36—46	С1—С2	Б
		Снятие заусениц	Э	36—46	С1—С2	К
		Шлифование концов	Э	46—60	С2	К
		Заточка	Э	46—60	СТ1—СТ2	К, Б
Ножницы для механической резки металла	Сталь закаленная	Шлифование кромок	ЭБ	120	СТ1	К
		Заточка сегментными кругами	Э	36	СМ2—С1	Б
Ось ведомой шестерни	Сталь	Заточка кольцевыми кругами	ЭБ	36—46	СМ1—СМ2	Б
		Бесцентровое предварительное	Э	46	СМ2	К
Стрелки	Бесцентровое окончательное	Обдирочное	Э	60	СТ	В
		Обдирочное плоскостей и выемок (ручное)	Э	16	СТ2—Т1	Б
Отвертки	Сталь закаленная	Заточка	Э	36—46	С1—СТ1	К
Отливки	Ковкий чугун	Обдирочное	Э	16—24	СТ1—СТ3	Б
Пальцы поршневые (автотракторные)	Сталь закаленная	Предварительное бесцентровое	Э	36—46	С2—СТ1	К
		Окончательное бесцентровое	Э	60—80	С1—С2	К
		Доводочное бесцентровое	Э	180	СМ2—С1	К, Б

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Пальцы поршневые (автотракторные)	Сталь закаленная	Доводочное бесцентровое	КЗ	230—М28	С1—СТ1	Б
	То же	Шлифование торцов	Э	36	С2	Б
Перья Пилы рамные и ленточные	Сталь	Отрезка концов	Э	180—230	СТ	В
	Сталь закаленная	Заточка зуба	Э	36—46	С1—СТ1	В
Пилы круглые для металла сегментные	Сталь быстрорежущая	Плоское шлифование сегментными кругами	Э	46	С	В
			Э	24—36	СМ2—С1	Б
Пилы угловые и концевые	Сталь закаленная	Заточка	Э	36—46	С2—СТ1	Б
			Э	36—46	СМ1—СМ2	К
	То же	Предварительное плоское шлифование периферией круга	Э	24—36	СМ1—СМ2	Б
			ЭБ	46	М3—СМ1	К
Поворотный кулак (автотракторный)	Хромистая сталь	Предварительное бесцентровое шлифование цапф	Э	46	СТ2	К
			Э	60	СТ1	К
Подшипники роликовые	Сталь подшипниковая	Предварительное круглое наружное	Э	46	СМ2—С1	К
			Э	60—80	СМ2—С1	К
			Э	46—60	СМ1—С1	К
			ЭБ	46—60	СМ1—С1	К
	"	Внутреннее	Э	60—80	С2—СТ1	К
			Э	15 мм		
			Э	46	С2	Б
			Э	80	СМ2	Б
Поршневые кольца	Чугун	Предварительное шлифование торцов	К2	46	С2	Б
			К2	80	СМ2	Б
Поршень машины ГАЗ-51	Алюминиевый сплав	Круглое наружное	Э	46	С2	К
			КЗ	М40	СТ2	Б
	То же	Плоское шлифование периферией круга				

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи	
Пробойники и пуансоны	Сталь	Круглое наружное	Э	46—60	СМ1—СМ2	К	
Пружины	"	Внутреннее	Э	46—60	СМ2—С1	К	
	"	Обдирочное шлифование концов	Э	16—24	СТ2—СТ3	К	
	"	Шлифование проволок мелких размеров	Э	60	С1	К	
	"	Шлифование проволок средних размеров	Э	36	СТ1	К	
	"	Шлифование проволок крупных размеров	Э	24	СТ2	К	
Плуги (корпуса)	"	Обдирочное	Э	16—24	СТ2—Т1	К, Б	
Развертки машинные	Сталь инструментальная и быстрорежущая	Плоское шлифование лезвий торцом круга	ЭБ	36—46	М3—СМ1	К	
	То же	Плоское шлифование периферией круга	ЭБ	46—60	СМ1—СМ2	К	
	"	Предварительное круглое наружное	ЭБ	36—46	С2—СТ1	К	
	"	Окончательное круглое наружное	ЭБ	46—60	СМ1—С1	К	
	"	Шлифование желобков	ЭБ	46—60	С1—С2	К	
	"	Затыловка задних граней	ЭБ	46—60	СМ1—СМ2	К	
	"	Заточка передней грани	Э	46—60	СМ1—СМ2	К	
	"	Заточка	КЗ	60—80	М3—СМ1	К	
	Развертки ручные цилиндрические и конические	Сталь инструментальная	Заточка чашечными кругами	ЭБ	60	СМ2	К
		То же	Доводка передней грани	КЗ	180	С2	Б
Резцы гравировальные	"	Заточка	Э	46—60	СМ2—С1	К	
	"	Заточка ручная	Э	46—60	СМ1—С1	К	
Резцы токарные фасонные	Сталь быстрорежущая	Заточка автоматическая	Э	46—60	СМ1—СМ2	К	
	То же	Доводка ручная	ЭБ	230	С1—С2	К	

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Резцы токарные	Твердый сплав	Предварительная заточка чашечными кругами	КЗ	46—60	МЗ—СМ2	К
	То же	Окончательная заточка	КЗ	60—80	СМ1—СМ2	К
	"	Предварительная заточка периферией круга	КЗ	36—46	СМ1—СМ2	К
	"	Окончательная заточка периферией круга	КЗ	60—80	МЗ—СМ1	К
Рессоры поло- совые	Сталь	Обдирочное плоскостей и скашивание кромок	Э	16—24	СТ2—СТ3	К
	"	Обдирочное шлифование ушков	Э	24	СТ1—СТ2	К
Ролики под- шипников цилиндри- ческие	Сталь под- шипниковая закаленная	Предварительное бесцентровое	Э	46—60	С1	К
	То же	Чистовое бесцентровое	Э Э	60—80 100—120	СТ СТ	В В
Ролики под- шипников конические	Сталь под- шипниковая сырая	Предварительное бесцентровое шлифование образующих конических роликов	Э	46	СТ1 СТ	К В
			Э	60		
	Сталь под- шипниковая закаленная	Чистовое бесцентровое шлифование образующих конических роликов	Э	100	СТ	В
Ролики бочко- образные	Сталь под- шипниковая закаленная	Шлифование торцов	ЭБ	100	СТ1	Б
		Предварительное бесцентровое	Э	80	СТ	К
	То же	Чистовое бесцентровое	Э	80—100	СТ	В
Ротор гидро- насоса	Сталь	Окончательное бесцентровое	Э	120	СТ	В
		Окончательное шлифование пазов	ЭБ	80	СМ2	К
Ружейные стволы	"	Круглое наружное	Э	46	С1	К
Рули велоси- педные	"	Зачистка мест сварки	Э	24—36	СТ1—СТ2	Б
Рубанки	Сталь зака- ленная	Заточка	Э	46—60	СМ2—С1	К

Наименование деталей	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Сверла	Сталь инструментальная и быстрорежущая	Бесцентровое	ЭБ	46—80	СМ2—С2	К
		"	Э	46—60	С2—С2	К
Сверла	Твердый сплав	Заточка	КЗ	46—80	СМ1—СМ2	К
Спицы велосипедные	Сталь	Зачистка концов	Э	46—60	СТ2—СТ3	Б
Сухарь крестовины	"	Плоское	Э	46	СМ1	К
Трубы	" "	Обдирочное шлифование внутренней поверхности и зачистка концов	Э	16—24	СТ1—СТ2	К
		Круглое наружное	Э	46	СМ2—С1	К
		Бесцентровое	Э	46—60	С1—С2	К
		Отрезка (без применения охлаждения)	Э	36—46	СТ1—СТ3	Б
		Отрезка	Э	36—46	СТ	В
		Отрезка	Э	60	СТ	В
		Отрезка	Э	60	СТ	В
Трубы	Сталь нержавеющая	Отрезка	Э	60	СТ	В
	Сталь хромомолибденовая	"	Э	60	СТ	В
	Алюминий или латунь	"	Э	24—36	СТ	В
	Чугун	Обдирочное внутренней поверхности и зачистка концов	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	К
Топоры	Сталь	Обдирка плоскостей	Э	16—24	СТ1—СТ3	Б
		Заточка	Э	24—36	СТ1—СТ2	Б
		Бесцентровое (предварительное) шлифование стержня	Э	60	СТ1	К
Толкатель клапана	"	То же, окончательное	ЭБ	120	С2	К
Угольники	Сталь закаленная	Плоское шлифование торцом круга	Э	24	СМ2—С2	Б
	То же	То же, периферией круга	Э	36	СМ1—СМ2	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Утюги	Чугун	Шлифование плоскостей	КЧ КЧ	16—24 16—24	СМ2—С2 М3—СМ1	Б К
Фланцы (автотракторные)	Сталь сырая	Плоское шлифование периферией круга	Э	36—46	СМ2—С1	К
	Сталь закаленная Чугун	Круглое наружное Обдирочное	Э КЧ КЧ	46 16—24 24	СМ2—С1 С2—СТ1 СТ1	К Б К
Фрезы двуугловые несимметричные	Сталь быстрорежущая	Заточка передней грани и углубление канавки	ЭБ	46	СМ1	К
	То же	Заточка задней грани чашечными кругами	ЭБ	60	СМ2	К
Фрезы дисковые модульные	Сталь быстрорежущая	Доводка	КЗ ЭБ	180 60	С2 СМ2	Б К
		Заточка передней грани тарельчатыми кругами	КЗ КЗ	180 60—80	С2 М3—СМ1	Б К
Фрезы торцовые с вставными ножами	Твердый сплав	Заточка задней грани чашечными кругами	КЗ КЗ	60—80	СМ2	К
Фрезы червячные	Сталь быстрорежущая	Подрезка торца	Э	46—60	СМ1—СМ2	К
	То же	Внутреннее шлифование профиля зуба	Э ЭБ	46—60 60—80	СМ1—СМ2 СМ2—С1	К К
	"	Заточка	ЭБ	60	СМ1—СМ2	К
Фрезы шлицевые	Сталь быстрорежущая	Внутреннее шлифование зубьев по наружному диаметру	ЭБ Э	46—60 60	СМ1—СМ2 СМ2	К К
	То же	Прорезка и заточка передней грани зуба	ЭБ	46—60	С1	К
Фрезы дисковые двух- и трехсторонние	Сталь быстрорежущая	Заточка чашечными кругами	ЭБ	60	СМ2	К
	То же	Доводка чашечными кругами	КЗ	180	С2	Б
Центры токарных станков	Сталь закаленная или быстрорежущая	Шлифование конуса	Э	60—80	СМ2—С1	К
	Твердый сплав	Шлифование конуса	КЗ	80	М3—СМ1	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Цилиндры рифленные (текстильные машины)	Сталь сырая	Предварительное круглое шлифование рифленной части	Э	46	СТ1—СТ2	К
Цанги	Сталь закаленная	Окончательное круглое	Э	60—80	СТ1	К
	Сталь инструментальная	Внутреннее	Э	46—60	СМ1—СМ2	Б
Шабера	Сталь инструментальная	Разрезка	Э	46	СТ	В
		Заточка режущей грани	Э	46	СМ2—С2	К
			Э	46—60	С	В
Шаблоны профильные	Сталь инструментальная и быстрорежущая	Предварительное шлифование по контуру	Э	46—60	С1—С2	К
	То же	Окончательное	ЭБ	150—230	СМ2—С1	К
	Сталь инструментальная	Предварительное плоское шлифование	Э	46	СМ	К
	То же	Окончательное плоское	Э	60	С2	К
Шайбы	Сталь закаленная	Плоское предварительное	ЭБ	36	М3—СМ1	К
			Э	24—36	СМ2—С1	Б
		Окончательное плоское	Э	46	СМ2	К
Шарики	Сталь сырая	Предварительное	Э	46	ВТ1—ЧТ2	К
	Сталь закаленная	Окончательное	ЭКЧ	180—230	ВТ1—ЧТ1	К
Шары для мельниц	Марганцовистая сталь	Бесцентровое шлифование	Э	36	СТ2	К
Шайбы упорные	Сталь	Плоское шлифование	Э	36—46	СМ1—СМ2	Б
		Плоское предварительное шлифование	Э	24—36	СМ2—С1	Б
Шатуны	"	Плоское окончательное шлифование	Э	60	СМ1	Б
		Внутреннее шлифование	Э	46—60	СМ2—С1	К
		Шлифование проушины	Э	36	СМ2—С1	К
		Хонингование	КЗ	320	СТ3	К

Наименование детали	Материал детали	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Шеверы	Сталь быстрорежущая	Предварительное шлифование зуба	ЭБ	46—60	МЗ	К
	То же	Окончательное шлифование зуба	ЭБ	100—120	МЗ	К
Швы сварочные	„	Зачистка мест сварки	Э	16—24	СТ1—СТ2	Б
Шпильки контрольные	Сталь серебрянка	Бесцентровое шлифование	Э	60	СМ2—С1	К
Шпиндели станков	Сталь сырая	Круглое наружное шлифование	Э	46—60	СМ2—С3	К
	Сталь закаленная	Круглое наружное шлифование	ЭБ	46—60	СМ1—СМ2	К
Штангенциркуль мерительные губки	Сталь закаленная	Окончательное шлифование	Э	60—80	СМ1—СМ2	К
	То же	Шлифование сколов	Э	46—60	СМ2—С1	К
Эксцентрики кулачковые	Сталь закаленная	Круглое наружное шлифование	ЭБ	60	СМ2—С1	К
	То же	Внутреннее шлифование	ЭБ	46—60	СМ1—СМ2	К

ТАБЛИЦА ВЫБОРА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ
 ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
 И ДЕТАЛЕЙ ИЗ НИХ

Наименование	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Агат	Предварительное круглое и ручное	КЧ	60—80	СМ1—СМ2	К
	Окончательное круглое и ручное	КЗ	180—М40	М3—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	80—100	СМ2—С1	Б
Асбоцемент	Плоское	КЧ	16—24	СМ2—С1	Б
Асбест	Отрезка	КЧ	16—24	С2—СТ1	Б
	Плоское	КЧ	16—24	СМ2—С1	Б
Каучук	•	КЧ	16—24	СМ1—СМ2	Б
Бетон	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б
Гипс	•	КЧ	16—24	С1—С2	Б
Гранит	Плоское — торцом круга	КЧ	16—24	СМ1—СМ2	К
	Плоское — периферией круга	КЧ	24—36	СМ1—С1	К
	Плоское фасонное	КЧ	24—36	С1—С2	К
	Отрезка	КЧ	24—36	СТ1—СТ2	Б
Дерево (твердые породы)	Бесцентровое наружное	КЧ	24—36	СМ1—СМ2	К
Известняк	Плоское	КЧ	26—24	СМ2—С1	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ3	Б
Изоляторы	Предварительное плоское	КЧ	36	СМ2—СМ1	Б
	Окончательное плоское	КЧ	46—60	СМ1—СМ2	Б
	Отрезка	КЧ	36	СТ1—СТ2	Б
Камни искусственные	Плоское торцом круга	КЧ	16—24	М3—СМ1	К
	Плоское — периферией круга	КЧ	24—36	СМ2—С1	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	Б
Кварц плавленный	Круглое наружное	КЧ	36—46	СМ2—С1	К
	Плоское	КЧ	36	СМ1—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	36—46	СТ1—СТ2	Б
Кирпичи керамические	Плоское обдирочное	КЧ	16—24	С2—СТ1	Б
	Плоское чистовое	КЧ	36—46	СМ2—С1	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ3	Б

Наименование	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Кожа	Плоское ручное	КЧ	24—36	М3—СМ1	К
Кость	Плоское ручное	КЧ	24—36	С2—СТ1	К
Мрамор	Плоское обдирочное	КЧ	16—24	СМ2—С1	Б
	Плоское:				
	1-я операция	КЧ	36—46	СМ2—С1	Б
	2-я операция	КЧ	80—100	СМ1—СМ2	Б
	3-я операция	КЗ	180—280	СМ1—СМ2	Б
	Предварительное круглое наружное	КЧ	16—24	С1—С2	К
	Окончательное круглое наружное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	24	СТ1—СТ3	Б
	Предварительное плоское	КЗ	60—80	М3—СМ1	К
Минералы драгоценные (сапфир, рубин)	Окончательное плоское	КЗ	150—230	СМ1—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	60—80	СМ1—СМ2	Б
Огнеупоры	Плоское—торцом круга	КЧ	16—24	СМ1—С1	Б
	Плоское—периферией круга	КЧ	24	СМ2—С2	
	Отрезка	КЧ	24	СТ2—СТ3	Б
Облицовочные керамические плиты	Плоское торцовое	КЧ	16—24	СМ1—СМ2	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б
Пробка	Плоское	КЧ	46	СМ1—СМ2	Б
Пластмасса	Круглое наружное	КЧ	24—36	СМ1—СМ2	Б
	Плоское	КЧ	24—36	СМ2—С1	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б
	Круглое наружное	КЧ	24	СМ1	Б
Резина	Круглое наружное	КЧ	46	СМ1—СМ2	Б
Сланец	Плоское	КЧ	24—36	СТ1—СТ3	Б
	Отрезка	КЧ	24—36	СТ1—СТ3	Б
Стекло	Предварительное плоское	КЧ	36—46	СТ1—СТ2	Б
	Чистовое плоское	КЧ	60—80	СМ1—СМ2	Б
	Круглое наружное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Внутреннее	КЧ	46—80	СМ1—СМ2	К
	Скашивание краев у оптических стекол	ЭБ	120—180	С1—С2	Б
	Скашивание краев у листового стекла	ЭБ	80—120	С1—СТ1	Б
Стекло	Отрезка (при малой скорости с охлаждением)	КЧ	80—100	СМ1—С1	Б
	Шлифование граней	КЧ	80—100	СМ1—СМ2	К
Стекланные шары, колпаки	Шлифование граней	ЭБ	180—230	С2—СТ1	К
Стекланные линзы	Шлифование граней	ЭБ	180—230	С2—СТ1	К

Наименование	Наименование операции шлифования	Вид абразивного материала	Номер зернистости	Степень твердости	Вид связи
Стеклянные трубки	Круглое наружное	КЧ	46—60	СМ1—С2	К
	Внутреннее	КЧ	80—100	М3—СМ1	К
	Отрезка	КЧ	80—100	СМ2—С1	Б
Стеклянные стаканы	Шлифование граней	ЭБ	120—140	С2—СТ1	К
Стекло зеркальное	Предварительное шлифование краев	ЭБ	80	СМ1—СМ2	К
	Окончательное шлифование краев	КЗ	230	СМ2—С1	К
Стекло переднее автомобильное	Предварительное скашивание краев	ЭБ	80	С2—СТ1	К
	Окончательное скашивание краев	ЭБ	150—180	СТ1	К
	Нарезание кантов	КЧ	100	СТ2	К
	Отрезка (при малой скорости с охлаждением)	КЧ	80—100	СМ1—С1	Б
Уголь	Плоское	КЧ	24—36	М3—СМ1	К
	Бесцентровое наружное	КЧ	36—46	С1—С2	К
	Круглое наружное	КЧ	36—46	СМ2—С1	Б
Фарфор	Отрезка	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	Б
	Предварительное плоское	КЧ	16—36	СМ1—СМ2	К
	Окончательное плоское	КЧ	46—80	СМ1—СМ2	Б
	Бесцентровое наружное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Круглое наружное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Ручное—с брусками для устранения дефектов	ЭБ	80—100	С1—С2	К
Фибра	Отрезка	КЧ	36—46	С2—СТ1	Б
	Плоское	КЧ	16—24	СМ1—С1	Б
	Круглое наружное	КЧ	24—36	СМ1—СМ2	К
Цемент	Отрезка	КЧ	36—46	СТ1—СТ2	Б
	Ручная обдирка брусками	КЧ	24—36	СТ1—СТ2	К
	Плоское	КЧ	16—24	СМ1—СМ2	Б
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ1—СТ2	Б
Шифер	Плоское	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	Б
	Профильное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	36—24	СТ2—СТ3	Б
Шишки формовочные	Профильное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	К
	Отрезка	КЧ	16—24	СТ2—СТ3	Б
Эбонит	Круглое наружное	КЧ	36—46	СМ1—СМ2	Б
	Отрезка	КЧ	36—46	СТ1—СТ2	Б
Электроды	Плоское	КЧ	24—36	СМ1—СМ2	Б
	Отрезка	КЧ	24	СТ1—СТ2	Б

**ПЕРЕЧЕНЬ ПРИМЕНЯЕМОСТИ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Алмазный инструмент в виде алмазно-металлических карандашей и алмазов в оправках применяется для правки шлифовальных кругов при следующих требованиях к точности размера, формы, расположению поверхностей и чистоте обрабатываемых поверхностей деталей.

I. Наружное, круглое и бесцентровое шлифование

А. Шлифование на проход, врезанием и в упор деталей с допуском на размер по 1-му классу точности в сочетании с чистотой поверхности 8-го класса и чище.

Б. Шлифование на проход деталей с допуском на размер 12 мк и точнее в сочетании с чистотой поверхности 8-го класса для термически обработанных деталей и с чистотой поверхности 7-го класса и чище для термически необработанных деталей.

В. Шлифование на проход деталей с чистотой поверхности 9-го класса и чище с допуском на размер 20 мк и точнее.

Г. Шлифование врезанием в упор деталей с допуском на размер 25 мк и точнее в сочетании с чистотой поверхности 7-го класса и чище.

Д. Шлифование на проход термически обработанных деталей с чистой поверхности 8-го класса и чище и термически необработанных деталей с чистой поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (овальность, конусность, огранка, вогнутость, бочкообразность), вне зависимости от допуска на размер:

Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность формы в мм	Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность формы в мм
До 120	10 и точнее	Свыше 630 до 800	25 и точнее
Свыше 120 до 360	15 "	" 800 до 1000	30 "
" 360 до 630	20 "	" 1000	35 "

Е. Шлифование врезанием и в упор деталей с чистотой поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (овальность, конусность, огранка, вогнутость, бочкообразность), вне зависимости от допуска на размер:

Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность в мк	Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность в мк
До 630	20 и точнее	Свыше 800 до 1000	30 и точнее
Свыше 630 до 800	25 "	" 1000	35 "

Ж. Шлифование на проход термически обработанных деталей с чистой поверхности 8-го класса и чище и термически необработанных деталей с чистой поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на расположение поверхностей, вне зависимости от допуска на размер:

Номинальный диаметр в мм	Радиальное биение в мк	Номинальный диаметр в мм	Радиальное биение в мк
До 10	10 и точнее	Свыше 50 до 120	20 и точнее
Свыше 10 до 18	12 "	" 120 до 260	24 "
" 18 до 50	16 "	" 260	30 "

3. Шлифование врезанием в упор деталей с чистотой цилиндрической поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на расположение поверхностей, вне зависимости от допуска на размер:

Номинальный диаметр цилиндрической поверхности в мм	Радиальное или торцовое биение в мк	Номинальный диаметр цилиндрической поверхности в мм	Радиальное или торцовое биение в мк
До 10	10 и точнее	Свыше 50 до 120	20 и точнее
Свыше 10 до 18	12 "	" 120 до 260	24 "
" 18 до 50	16 "	" 260	35 "

И. Шлифование деталей с выдерживанием радиуса до 0,5 мм.

II. Внутреннее шлифование

А. Шлифование на проход и в упор деталей с допуском на размер по 1-му классу точности в сочетании с чистотой поверхности 8-го класса и чище.¹

Б. Шлифование на проход деталей с допуском на размер 23 мк и точнее в сочетании с чистотой поверхности 7-го класса и чище.

В. Шлифование врезанием в упор деталей с допуском на размер 27 мк и точнее в сочетании с чистотой поверхности 7-го класса и чище.

Г. Шлифование на проход, врезанием и в упор деталей с чистотой поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (овальность, конусность, огранка, вогнутость, бочкообразность), вне зависимости от допуска на размер:

Д. Шлифование на проход, врезанием и в упор деталей с чистотой цилиндрической поверхности 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на расположение поверхностей, вне зависимости от допуска на размер:

Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность в мк
До 360	20 и точнее
Свыше 360 до 500	25 "
" 500	30 "

Номинальный диаметр цилиндрической поверхности в мм	Радиальное или торцовое биение в мк	Номинальный диаметр цилиндрической поверхности в мм	Радиальное или торцовое биение в мк
До 10	10 и точнее	Свыше 50 до 120	20 и точнее
Свыше 10 до 18	12 "	" 120 до 260	24 "
" 18 до 50	16 "	" 260	30 "

III. Плоское шлифование

А. Шлифование на проход, врезанием и в упор деталей с допуском по 3-му классу точности в сочетании с чистой поверхностью 8-го класса и чище.

Б. Шлифование на проход деталей с допуском 12 мк и точнее в сочетании с чистой поверхностью 8-го класса для термически обработанных деталей и чистой поверхностью 7-го класса и чище для термически необработанных деталей.

В. Шлифование на проход деталей с чистой поверхностью 9-го класса и чище в сочетании с допуском на размер 20 мк и точнее.

Г. Шлифование на проход деталей с чистой поверхностью 8-го класса и чище и шлифование врезанием и в упор деталей с чистой поверхностью 7-го класса и чище в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (неплоскостность и непрямолинейность), вне зависимости от допуска на размер:

Номинальная длина в мм	Допуски на непараллельность в мк	Номинальная длина в мм	Допуски на непараллельность в мк
До 50	4 и точнее	Свыше 300 до 600	15 и точнее
Свыше 50 до 100	8 "	" 600 до 900	18 "
" 100 до 300	12 "	" 900 до 1000	20 "

IV. Фасонное шлифование

А. Фасонное шлифование врезанием деталей машин с допуском 25 мк и точнее.

Б. Фасонное шлифование по профилю инструмента с допуском 50 мк и точнее.

В. Шлифование по профилю зуборезного инструмента, зубчатых колес и шлицевых валов 2-го класса точности и точнее.

Г. Шлифование резьбы однониточными кругами.

V. Специальные виды шлифования

А. Шлифование и заточка на станках с принудительной автоматической правкой или правкой по копиру.

Б. Правка круга на вулканитовой связке, за исключением кругов формы Д.

В. Круглое наружное шлифование на проход деталей, контролируемых прилеганием по краске, при 80% прилегания и выше, а при шлифовании в упор и врезанием — при 60% прилегания и выше.

Г. Внутреннее шлифование на проход, врезанием и в упор деталей, контролируемых прилеганием по краске при 60% прилегания и выше.

Д. Шлифование на станках с одновременно работающими двумя и более кругами при чистоте поверхности шлифуемых деталей 7-го класса и чище.

Е. Правка торцов круга при шлифовании канавок шириной 8 мм и менее.

Ж. Наружное и круглое и бесцентровое шлифование на проход деталей подшипников качения с чистой поверхностью, соответствующей ГОСТу 520-55, в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (по межоперационным ТУ):

Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность формы в мк	Номинальный диаметр в мм	Допуски на точ- ность формы в мк
До 80	10 и точнее	Свыше 150 до 250	20 и точнее
Свыше 80 до 150	15 "	" 250 до 400	25 "

3. Внутреннее шлифование деталей подшипников качения с чистотой поверхности, соответствующей ГОСТу 520-55, в сочетании со следующими величинами допусков на точность формы (по межоперационным ТУ):

Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность формы в мк	Номинальный диаметр в мм	Допуски на точность формы в мк
До 80	12 и точнее	Свыше 120 до 180	20 и точнее
Свыше 80 до 120	15 "	" 180 до 320	25 "

VI. Особые замечания

А. Для частных, специальных случаев шлифования, не охваченных перечнем, применение алмазного инструмента производится на основании технической экспертизы и заключений Научно-исследовательского института алмазного инструмента и заменителей алмаза — НИИАЛМАЗ.

Б. Перечень не распространяется на операции предварительного шлифования.

В. Применение алмазной правки кругов допускается при шлифовании за одну установку нескольких поверхностей, если для одной из поверхностей полагается алмазный инструмент по данному перечню.

Г. Применение алмазного инструмента не допускается:

1) при шлифовании неотбалансированными кругами диаметром 125 мм и выше;

2) при шлифовании кругами зернистостью 36 и крупнее.

1

МИНИМАЛЬНЫЕ ТОЛЩИНЫ СТенок ЗАЩИТНЫХ КОЖУХОВ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Кожухи должны удовлетворять требованиям, предъявляемым ГОСТом 3881-53 к защитным устройствам.

Угол раскрытия кожухов следует делать возможно малым, насколько это позволяют размеры обрабатываемых на станке деталей.

Сварка кожухов, изготовляемых из листового материала, должна производиться сплошными угловыми нормальными швами, накладываемыми с обеих сторон стыка. Катет наружного шва должен быть не менее толщины боковой стенки; катет внутреннего шва — не меньше половины толщины боковой стенки.

Сварка должна производиться электродами типа Э42 или Э50 по ГОСТу 2523-51. Наружные швы должны аккуратно зачищаться.

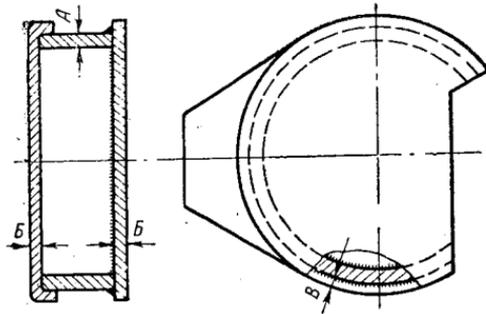
Кожухи, предназначенные для работы при скорости круга свыше 35 и до 50 м/сек, не имеющие сплошного кольцевого обода, должны иметь крышку с отбортовкой, охватывающей обод кожуха и перекрывающей примерно одну треть его ширины (борт может быть приварен и иметь ту же толщину, что и крышка). Кожухи, конструкция которых не позволяет установить крышки с отбортовкой, могут быть изготовлены с дополнительными упрочняющими стержнями.

Примечания: 1. Размеры кожухов, в которых устанавливаются круги разной высоты, должны соответствовать размерам круга наибольшей предусматриваемой высоты.

Зазор между торцом круга наибольшей высоты и крышкой должен составлять 10—15 мм.

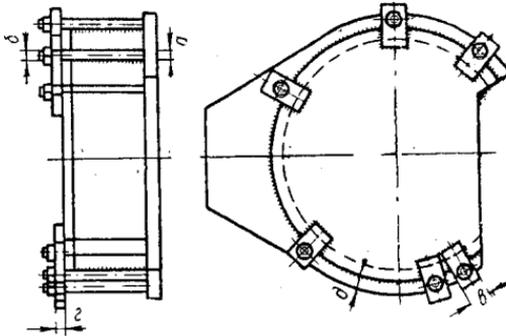
2. Кожух, конструкция которого имеет ослабляющие отверстия и выемки или не допускает установку упрочняющей крышки, должен проверяться на прочность путем разрыва в кожухе 4—5 шлифовальных кругов при рабочей скорости круга. Если при испытании кожуха шлифовальный круг не разрывается при нужной скорости, то последний следует ослабить вырубанием узких канавок у отверстия.

В табл. 1—2 приведены размеры деталей защитных кожухов шлифовальных кругов в мм.



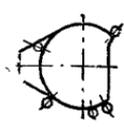
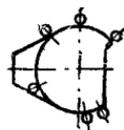
Фиг. 1. Крышка кожуха с отбортовкой.

Диаметр шлифовального круга	Размер	Материал кожухов					
		Стальное литье по ГОСТу 977-58 Сталь 25			Сталь листовая по ГОСТу 380-57 Сталь Ст. 2; Сталь Ст. 3		
		Наибольшая высота шлифовального круга					
		50	100	150	50	100	150
75—150	A	6	8	10	4	4	5
	B	6	7	8	3	3	3
	B	—	—	—	5	5	5
151—300	A	7	9	11	5	7	7
	B	7	8	8	4	4	4
	B	—	—	—	7	7	7
301—400	A	10	10	14	7	8	9
	B	10	12	11	5	5	6
	B	—	—	—	8	8	8
401—500	A	13	15	17	8	9	11
	B	11	12	14	7	7	8
	B	—	—	—	10	10	12
501—600	A	16	18	20	10	11	13
	B	13	15	17	7	8	9
	B	—	—	—	10	12	12
601—750	A	19	21	24	12	13	15
	B	16	18	20	8	9	10
	B	—	—	—	12	12	15
751—1100	A	23	27	31	14	17	19
	B	19	21	23	10	11	12
	B	—	—	—	15	15	18



Фиг. 2. Кожух с упрочняющими стержнями.

Диаметр шлифовального круга	Размер	Обозначение	Наибольшая высота шлифовального круга			Эскиз расположения стержней
			50	100	150	
75—150	Диаметр стержня	<i>a</i>	8	10	10	
	Диаметр резьбы	<i>б</i>	M8	M10	M10	
	Ширина серьги	<i>в</i>	30	30	30	
	Толщина серьги	<i>г</i>	3	3	3	
	Выступание стенки за обод	<i>д</i>	5	5	5	
151—300	Диаметр стержня	<i>a</i>	10	12	12	
	Диаметр резьбы	<i>б</i>	M10	M12	M12	
	Ширина серьги	<i>в</i>	30	35	35	
	Толщина серьги	<i>г</i>	4	4	4	
	Выступание стенки за обод	<i>д</i>	7	7	7	
301—400	Диаметр стержня	<i>a</i>	12	16	16	
	Диаметр резьбы	<i>б</i>	M10	M16	M16	
	Ширина серьги	<i>в</i>	35	40	40	
	Толщина серьги	<i>г</i>	5	5	5	
	Выступание стенки за обод	<i>д</i>	8	8	8	
401—500	Диаметр стержня	<i>a</i>	16	16	20	
	Диаметр резьбы	<i>б</i>	M16	M16	M20	
	Ширина серьги	<i>в</i>	40	40	50	
	Толщина серьги	<i>г</i>	7	7	8	
	Выступание стенки за обод	<i>д</i>	10	10	12	

Диаметр шлифовального круга	Размер	Обозначение	Наибольшая высота шлифовального круга			Эскиз расположения стержней
			50	100	150	
501—600	Диаметр стержня]	<i>a</i>	20	20	24	
	Диаметр резьбы	<i>b</i>	M20	M20	M24	
	Ширина серьги	<i>c</i>	50	50	60	
	Толщина серьги	<i>z</i>	7	8	9	
	Выступание стенки за обод	<i>d</i>	10	12	12	
601—750	Диаметр стержня	<i>a</i>	24	24	30	
	Диаметр резьбы	<i>b</i>	M24	M24	M30	
	Ширина серьги	<i>c</i>	60	60	75	
	Толщина серьги	<i>z</i>	8	9	10	
	Выступание стенки за обод	<i>d</i>	12	12	15	

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ТАБЛИЦА ОРИЕНТИРОВОЧНЫХ НОРМ РАСХОДА ЗЕРНА И КЛЕЯ ДЛЯ НАКАТКИ ПОЛИРОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Номер зернистости	Норма на 1 см ² площади накатки в г	
	зерна	мездрового клея
24 36	0,35 0,25	0,05
46 60 80	0,2 0,15 0,1	0,045
100 120 180	0,08 0,07 0,06	0,04
230 и мельче	0,05	0,03

ИНСТРУКЦИЯ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЛЕНТ ИЗ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ШКУРКИ НА ТКАНИ

1. В зависимости от требуемой ширины и длины лент рулонная шкурка разрезается на куски, превышающие по длине на 10—30 мм габаритную длину заготовки.

Пример:

Размер ленты (длина и ширина в мм)	Габаритная длина заготовки в мм	Длина куска шкурки в мм
3400×150	3570	3580
3400×100	3520	3550

2. У подготовленных кусков шкурки с обеих сторон обрываются кромки на ширину 5—10 мм. Затем куски шкурки разрываются в продольном направлении на полосы, равные по ширине требуемым лентам.

Примечание. В случае поставки шкурки в бобинах соответствующей ширины эта операция отпадает.

3. Для придания шкурке эластичности, полученные полосы изнанкой протягиваются по ребру стальной плиты (фиг. 1).

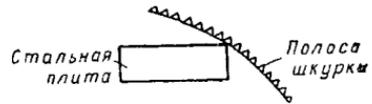
4. У полученных полос отрезаются концы под углом 45° так, чтобы заготовка превышала на 22—25 мм развернутую длину требуемой ленты.

5. На обоих концах заготовки на абразивном слое отмечаются участки шириной 22—25 мм, подлежащие зачистке от шлифующего зерна (фиг. 2).

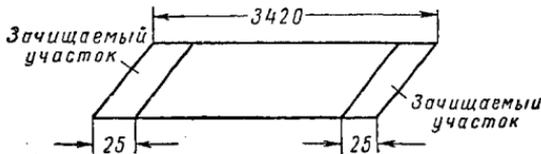
6. Подлежащий зачистке участок зажимается на 8—10 сек. между двумя металлическими плитами, нагретыми до 190—210°. Усилие зажима 1—5 кг должно обеспечить плотное прилегание шкурки к плитам.

Незачищаемые участки заготовки не должны нагреваться, так как нагрев снижает прочность удержания зерна.

7. После нагрева подлежащие зачистке участки крупнозернистой шкуркой очищаются от зерна.



Фиг. 1. Метод придания эластичности.



Фиг. 2. Подготовка ленты к склейке.

8. С изнанки склеиваемые участки той же крупнозернистой шкуркой очищаются от аппрета, и им придается шероховатость. При этом одновременно достигается утоньшение и разлохмачивание поперечной кромки зачищаемых участков.

9. После зачистки заготовка кладется на рабочий стол зерном вниз и тщательно распрямляется. Затем концы загибаются к середине ленты и накладываются друг на друга для проверки совпадения боковых кромок верхней и нижней части заготовки.

10. На расстоянии 10 см от места стыка на ленту накладываются плоские грузы, фиксирующие положение заготовки.

11. Склеиваемые участки концов заготовки смазываются горячим (60—70°) 40—45%-ным раствором мездрового клея 1-го или высшего сорта. Первый конец заготовки смазывается два раза: первый раз небольшим количеством клея, второй раз немного большим, но после того, как будет намазан второй конец.

12. Покрытые клеем участки сразу после промазки (недопустимо застудивание клея), накладываются друг на друга, прижимаются плоским металлическим грузом и оставляются под ним в течение 30 сек. Склеиваемые концы не должны находить на абразивный слой и под него. Между абразивным слоем и кромкой накладываемого участка должно оставаться 1,5—2 мм.

13. Место склейки сдавливается под прессом усилием 0,5—1 т на 100 мм ширины ленты. Под склеиваемое место и на него кладутся стальные бруски шириной 20 мм. Под этим давлением лента выдерживается в течение 3—5 мин.

14. Лента вынимается из-под пресса и в месте склейки помещается между фанерными квадратами размером порядка 200 × 200 мм и сдавливается грузом 25—50 кг или винтовым прессом. В таком положении лента оставляется в течение 16—24 час.

15. По истечении этого срока лента освобождается и просушивается на воздухе 2—3 часа. С нерабочей стороны ленты стык осторожно зачищается шкуркой от клея, выступившего в процессе сдавливания на прессе.

С обеих кромок ленты выдерживают по 2—3 нитки основы.

16. У готовой ленты проверяются:

а) размеры;

б) отсутствие запрессованных складок, бугорков зерна; при наличии складок лента должна браковаться, бугорки зерна могут быть удалены ножом или шкуркой;

в) правильность склейки: отсутствие нахлестки склеиваемого конца на абразивный слой или под него, плотность прилегания приклеенной кромки;

г) толщина склеенного места; место склейки должно быть тоньше ленты в местах, не оголенных от абразивного зерна, не менее чем:

для лент № 46 — 60 на 0,2 мм

для лент № 80 — 100 на 0,1 «

для лент № 120—150 на 0,05 «

Склеивание лент резиновым клеем

1. Приготовление клея. На смесительных вальцах готовится смесь:

СКБ (0,45)	100 в. ч.
се́ра	35 „
тиурам	3 „
окись цинка	5 „
сажа газовая	30 „
канифоль	5 „

2. Полученная смесь растворяется в бензине. Для этого в железный бачок с крышкой или в стеклянную банку на 1 кг смеси заливают 1,5—2 л авиабензина, дают постоять сутки, после чего содержимое бачка перемешивают до однородности.

3. Подготовка заготовок из шкурки производится так же, как при склеивании мездровым клеем (смотри пп. 1—8).

4. Склеиваемые поверхности смазывают раствором эбонитового клея и оставляют на воздухе на 0,5 часа для испарения бензина.

5. Склеиваемые концы ленты накладывают друг на друга и прижимают пальцами для их слипания.

6. Склеиваемое место помещают между двумя металлическими пластинками шириной 20 мм, нагретыми до температуры 200°, сдавливают усилием 0,5—1 т и выдерживают под давлением в течение 20 сек. Затем ленту извлекают из пресса.

7. Неострым ножом (чтобы не порезать ткань) удаляют валик клея, образующийся на границе спрессованного места с нижней стороны. Место срезанного валика зачищается шкуркой КЧ 150-180.

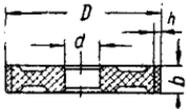
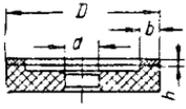
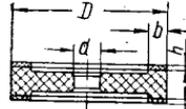
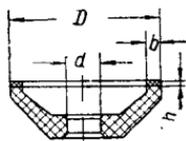
8. Дальнейшие операции производятся так же, как при склейке мездровым клеем.

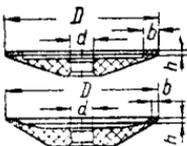
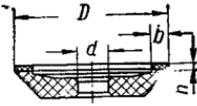
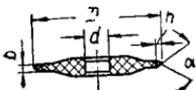
**ТАБЛИЦА ВЫБОРА АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ДОВОДКИ
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ
ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ НИИАЛМАЗа**

Тип	Назначение
АПП	Для доводки разверток и зенкеров по наружному диаметру на круглошлифовальных станках
АЧИ1	Для доводки резцов на заточных станках типа С-194
АЧИ2	Для доводки резцов на заточных станках типа С-194 и Эксцелло
АС	Для доводки резцов на заточных станках типа С-194
АЧК	Для доводки режущего инструмента на универсально-заточных станках
А18Т	Для доводки многолезвийного инструмента с прямым зубом и углом профиля канавок не более 50° на универсально-заточных станках
А30Т	Для доводки мелко модульных фрез
АЧ5Т	Для доводки многолезвийного инструмента с прямым зубом и углом профиля канавок больше 50° на универсально-заточных станках
АТК	Для доводки многолезвийного инструмента с винтовым зубом на универсально-заточных станках
А2П	Для доводки фасонного инструмента на профильно-шлифовальных станках типа ЗП95 и „Штудер“

Примечание. Применение алмазного инструмента для заточки и доводки металлообрабатывающего инструмента значительно повышает стойкость и чистоту обработанной поверхности и потому рекомендуется при наличии алмазного инструмента.

Таблица к приложению 8

Типы кругов	Форма сечения	Обозначение типа	Основные размеры в мм				Вес алмаза в каратах (концентрация 50 %)	
			D	b	h	d		
Плоские прямого профиля		АПП	100	10	3	20	20	
			150	15		32	26	
			200	10		75	41	
				20		32	82	
Чашки цилиндрические		АЧЦ1	150	3	3	16 или 32	9	
				5			15	
				10			29	
				20			1,5	27
	3	54						
		АЧЦ2	150	3	3	32	9	
				5			15	
				10			29	
20				1,5			27	
	3	54						
Двухсторонние		АС	150	3	3	16	18	
				5			30	
				10			58	
				20			1,5	54
3	108							
Чашки конические		АЧК	50	3	3	10	3	
			75	5			4,5	
							7	
			100	8		15		
			125	10		1,5	32	12
								3	24
15	1,5	17						
		3	34					

Типы кругов	Форма сечения	Обозначение типа	Основные размеры в мм				Вес алмаза в каратах (концентрация 50 %)
			D	b	h	d	
Тарелки		A18T	75	3	1,5	20	2,5
			100	5			5
			125				32	6
		A30T	75	2	3	20	4
		A45T	75	3	1,5	20	2,5
					3		5
			125	5	1,5	32	6
					3		12
				8	1,5		9,5
					3		19
		ATK	75	3	1,5	20	2,5
					3		5
1,5					7		
3					6		
125			8	1,5	32	12	
				3		9,5	
				1,5		19	
				3			
Профильные		A2П	125	3	3	32	7,5

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранец Н. Ф., Шлифовальный круг и его выбор, Машгиз, 1943.
2. Белецкий Д. Г., Технология чистой обработки, Машгиз, 1949.
3. Брозголь И. М., Влияние скорости вращения детали на производительность процесса шлифования, «Подшипник» № 6, 1952.
4. ВНИИАШ, Краткое руководство по скоростному шлифованию, Машгиз, 1951.
5. ВНИИАШ, Абразивы, ЦБТИ, 1953—1956.
6. Волский Н. И., Обрабатываемость металлов шлифованием, Машгиз, 1951.
7. Глясс В. Д., Шлифование многошлицевыми кругами. Вестник технической информации Министерства станкостроения СССР № 12, Машгиз, 1947.
8. Дьяченко П. Е., Исследование процесса шлифования, Машгиз, 1945.
9. Ипполитов Г. М., «Станки и инструмент» № 9, 1952.
10. Каменцев М. В., Искусственные абразивные материалы, Машгиз, 1950.
11. Кедров С. М., Доводка металлов. Притирочное шлифование. Отделочное шлифование. Справочник машиностроителя, том II, Машгиз, 1955.
12. Костецкий Б. И., Шлифование закаленной стали, Машгиз, 1947.
13. Кудасов Г. Ф., Механическая обработка абразивных инструментов, Машгиз, 1956.
14. Кузнецов В. Д., Физика твердого тела, т. III, Томск, Изд-во «Красное знамя», 1944.
15. Кузнецов И. П., Основы скоростного шлифования и пути его внедрения в производство, Машгиз, 1954.
16. Любомудров В. Н., Васильев Н. Н., Фальковский Б. И., Абразивные инструменты и их изготовление, Машгиз, 1953.
17. Маслов Е. Н., Основы теории шлифования металлов, Машгиз, 1951.
18. Миндлин Я. Б. Влияние безалмазной правки и правящего инструмента на процесс шлифования, 1956.
19. Наерман М. С., Исследование некоторых вопросов круглого наружного шлифования, Диссертация, 1956.
20. Ошер Р. Н., Изготовление и применение смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при обработке металлов резанием, Гостоптехиздат, 1942.
21. Попов С. А., Кинематика и динамика круглого шлифования, Диссертация, 1955.
22. Сильвестров В. Д., Безалмазная правка шлифовальных кругов, Оборонгиз, 1955.
23. Скоростное шлифование (обмен опытом) № 18 ЦБТИ, 1954.
24. Шальнов В. А., Скоростное шлифование легированных конструкционных сталей, Оборонгиз, 1956.
25. ЭНИМС, Модернизация круглошлифовальных станков для скоростного шлифования, Машгиз, 1952.
26. ЭНИИП, Пути повышения производительности при круглом шлифовании, Выпуск 3, Машгиз, 1950.
27. Ящерицын П. И., Скоростное шлифование, Машгиз, 1953.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Абразивные материалы	6
Электрокорунд	9
Карбид кремния	14
Карбид бора	17
Дробление и классификация абразивных материалов	18
Глава II. Основные свойства абразивных материалов	22
Твердость	22
Абразивная способность	26
Другие механические свойства абразивных материалов	29
Тепловые и электрические свойства	31
Химические свойства	32
Глава III. Абразивные инструменты	34
Производство абразивных инструментов	36
Абразивные инструменты на керамической связке	37
Абразивные инструменты на бакелитовой связке	42
Абразивные инструменты на вулканитовой связке	44
Механическая обработка абразивных инструментов	45
Испытание и маркировка	50
Типаж абразивных инструментов	50
Алмазные круги	57
Шлифовальная шкурка	58
Зернистость абразивных материалов и инструментов	62
Форма зерен	64
Основные недостатки и задачи производства абразивных инструментов	67
Глава IV. Основные свойства абразивных инструментов	71
Твердость абразивных инструментов	71
Строение абразивного инструмента	76
Объемный вес	79
Механические свойства абразивных инструментов	80
Самозатачиваемость, износ и стойкость	85
Теплостойкость	90
Абразивная способность абразивных инструментов	91
Свойства связок	92
Число зерен	94
Разновысотность и несоосность расположения зерен	97
Глава V. Основы шлифования	100
Элементы резания при шлифовании	100
Виды шлифования	102
Образование стружки	106
Толщина, ширина и длина стружки при шлифовании	108
Толщина стружки	110
Длина стружки	114

	Стр.
Глава VI. Выбор характеристики абразивных инструментов	117
Влияние характера операции абразивной обработки	118
Влияние мощности и состояния шлифовального станка	119
Влияние свойств материала детали	120
Влияние формы и размеров детали и круга	122
Зависимость между твердостью круга и условиями его работы	123
Зависимость между зернистостью и условиями работы	127
Глава VII. Теплообразование при шлифовании	129
Влияние смазочно-охлаждающей жидкости	133
Силы резания и их связь с процессом шлифования	140
Глава VIII. Правка шлифовальных кругов	143
Правка алмазами	144
Безалмазная правка	147
Правка кругами из карбида кремния	148
Глава IX. Уравновешенность шлифовальных кругов	153
Глава X. Качество поверхности и поверхностного слоя шлифуемых деталей	159
Чистота поверхности	160
Наклеп	165
Глава XI. Скоростное круглое и плоское шлифование и его особенности	167
Номенклатура кругов для скоростного шлифования	168
Влияние скорости резания и подачи на показатели скоростного шлифования	169
Опыт скоростного шлифования	171
Резьбошлифование	176
Глава XII. Процессы окончательной отделки	182
Хонингование	182
Суперфиниш	189
Полирование	192
Полирование кругами	192
Ленточное полирование и шлифование	195
Жидкостное полирование	204
Доводка	209
Приложения:	216
1. Повышение твердости абразивных инструментов	216
2. Таблица выбора характеристики шлифовальных кругов для обработки различных машиностроительных деталей и инструментов	219
3. Таблица выбора характеристики шлифовальных кругов для обработки неметаллических материалов и деталей из них	236
4. Перечень применяемости алмазного инструмента для правки шлифовальных кругов	239
5. Минимальные толщины стенок защитных кожухов шлифовальных кругов для скоростного шлифования	243
6. Таблица ориентировочных норм расхода зерна и клея для накатки полировальных кругов	246
7. Инструкция по изготовлению лент из шлифовальной шкурки на ткани	247
8. Таблица выбора алмазных инструментов для доводки твердосплавных металлообрабатывающих инструментов по рекомендациям НИИАЛМАЗа	250
Литература	253

Георгий Михайлович Ипполитов
АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Редактор издательства *Н. А. Иванова*

Технический редактор *В. Д. Элькин*

Корректор *А. Усачева*

Переплет художника *А. В. Петрова*

Сдано в производство 24/I 1959 г. Тираж 7000 экз.
Подписано к печати 28/IV 1959 г. Т-05539.
Печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 17,25. Бум. л. 8,0. Зак. 3/109.
Формат 60 × 92¹/₁₆

Типография № 3 Углетехиздата, Ленинград,
ул. Салтыкова-Щедрина, 54.

21
9587

2875 17/59