

А. Н. РЕЗНИКОВ



**А**лмазные  
**Р**ежущие  
**И**нструменты

---

А. Н. РЕЗНИКОВ - АЛМАЗНЫЕ РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

А. Н. РЕЗНИКОВ  
*Профессор, доктор технических наук*

# **АЛМАЗНЫЕ РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ**

КУЙБЫШЕВСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
1964

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе непрерывного совершенствования металлообработки происходит ряд этапов резкого, скачкообразного повышения производительности труда в связи с применением новых инструментальных материалов. Такие резкие подъемы производительности труда вначале были результатом применения быстрорежущих сталей взамен углеродистых, затем твердых сплавов взамен быстрорежущих сталей. Сейчас в промышленности начинают широко внедряться алмазные инструменты, которые как сами по себе, так и в сочетании с твердыми сплавами вновь обеспечивают резкое повышение производительности труда.

В настоящее время одной из задач технологии машиностроения является снижение припусков на обработку и повышение качества обработанных поверхностей. Следовательно, роль шлифовально-отделочных операций возрастает. Алмазные инструменты наиболее эффективно могут быть использованы для совершенствования чистовой обработки и шлифования, поэтому их перспективы весьма широки.

Мировая добыча естественных алмазов (без СССР) составляет примерно 30 млн. карат в год (карат равен 0,2 грамма). Из этого количества за рубежом расходуется на технологические нужды 80%, в том числе на режущие инструменты, их шлифовку и заточку — около 55%.

Наша страна до недавнего времени располагала незначительными запасами алмазов, что сдерживало применение алмазных инструментов в производстве. Почти повсеместно разрабатывались различные виды алмазозаменителей для правки шлифовальных кругов и других операций.

В связи с открытием в 1954—1955 годах крупных месторождений алмазов в Якутской АССР, а также с разработкой и освоением способа получения синтетических алмазов картина резко изменилась. Теперь у нас налажен выпуск искусственных алмазов. Наша промышленность может производить их столько, сколько нам надо.

Значительную роль в изучении методов использования и организации работ по применению алмазов в производстве сыграл Государственный Научно-исследовательский институт алмазного инструмента и процессов алмазной обработки (НИИалмаз).

Громадная заслуга в деле разработки технологии и организации промышленного выпуска синтетических алмазов принадлежит Институту физики высоких давлений Академии Наук СССР во главе с Героем Социалистического Труда членом-корреспондентом АН СССР Л. Ф. Верещагиным и Украинскому научно-исследовательскому конструкторско-технологическому институту синтетических сверхтвердых материалов и инструмента во главе с Героем Социалистического Труда В. Н. Бакулем.

Резкий рост количества натуральных и синтетических алмазов ставит перед инженерно-техническим персоналом предприятий важную задачу — широко применять и рационально использовать алмазные инструменты для улучшения качества изделий и повышения производительности труда при обработке разнообразных материалов.

На ряде предприятий эта задача решается успешно. Применение алмазных шлифовальных кругов и паст позволяет значительно повысить производительность процесса обработки твердых материалов и обеспечить высокое качество изделий и инструментов.

Так, например, производительность процесса заточки и доводки твердосплавных инструментов при применении алмазных шлифовальных кругов повышается в 3—5 раз, а стойкость инструмента — в 2—5 раз.

Сделаем простой расчет. Предприятия Средне-Волжского экономического района потребляют в год 5 млн. твердосплавных резцов. Если алмазной обработкой повысить стойкость инструментов только вдвое, то это равносильно сокращению расхода резцов на 2,5 млн. штук в год. Резец обходится предприятию в среднем 50 коп. Следовательно, только за счет алмазной обработки резцов можно получить экономию свыше 1 млн. рублей в год.

Большая экономия получается и при использовании кристаллов из натуральных алмазов для чистовой тонкой токарной обработки. Стойкость алмазных резцов при двухсменной работе, как показал опыт куйбышевских предприятий, составляет 2—3 месяца. Можно привести такие любопытные цифры. Путь, проходимый быстрорежущим резцом по обрабатываемому материалу до затупления инструмента, составляет около 8 км. Для твердосплавных резцов путь, проходимый до затупления, возрастает до 20—50 км. Алмазный же резец до затупления проходит по обрабатываемому материалу 2,5—3 тыс. километров!

Быстрорежущий резец стоит 20 коп., твердосплавный — 50 коп., а алмазный — 5—10 руб. Если предположить, что каждый из них выдержит по десять переточек, то это значит, что

расходы за счет инструмента на 1 км пути по изделию при работе быстрорежущим резцом составят 0,25 коп., твердосплавным — примерно 0,14 коп., а алмазным — всего 0,02—0,05 коп.

Мы остановились столь подробно на экономических преимуществах обработки алмазным инструментом потому, что до настоящего времени действуют кое-где старые понятия и привычки, согласно которым считается, что алмазы в производстве надо заменять, а не внедрять. Это объясняется недостаточной информированностью инженерно-технических работников и новаторов производства об эффективности применения алмазных инструментов.

Совершенно недостаточно изучен еще и сам процесс алмазной обработки изделий, а также его закономерности и особенности.

Предлагаемый читателю труд основан на опыте работы отечественных, в том числе и куйбышевских предприятий. Мы использовали также результаты исследовательских работ и в первую очередь работ, выполненных автором или под его руководством в отраслевой научно-производственной инструментальной лаборатории Куйбышевского политехнического института и Средне-Волжского совнархоза (НПИЛ). В необходимых случаях приведены данные о зарубежном опыте.

Цель настоящей книги — сделать некоторые теоретические обобщения в новой для нашей науки и практики области алмазной обработки, а также оказать производителям посильную помощь в освоении техники и технологии алмазного резания.

---

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА НАТУРАЛЬНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ

Алмаз состоит из одного химического элемента — углерода. Каждый атом углерода в кристаллической решетке алмаза окружен другими четырьмя атомами, находящимися в углах тетраэдра, то есть четырехгранника, все грани которого треугольники. Любой из атомов углерода связан общими электронами со всеми четырьмя соседними атомами. Силы связи образуют между собой угол  $109^{\circ}28'$ . Кратчайшее расстояние между связанными атомами углерода составляет  $1,54\text{Å}$  (ангстрем), то есть около  $0,00015$  микрона.

Атомы углерода в кристаллической решетке алмаза связаны весьма прочно, что является одной из основных причин его высокой твердости и износостойкости.

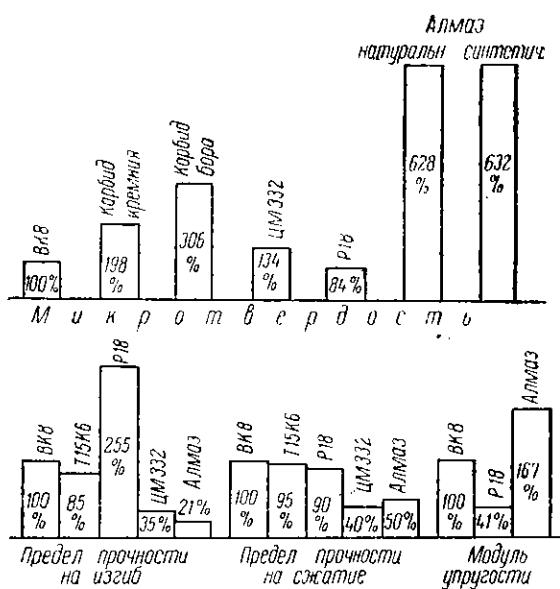
В табл. 1 приведены некоторые основные физические свойства алмаза. Значения основных физических величин даны как в используемой ныне системе единиц, так и в новой международной системе (СИ), рекомендуемой к преимущественному применению в соответствии с ГОСТ 9867—61 [3]. Как известно, в этой системе масса вещества измеряется в килограммах, а следовательно, плотность — в  $\text{г/см}^3$ ,  $\text{кг/м}^3$ , сила — в ньютонах. Соотношение  $1\text{ кг}=9,80665\text{ н}$  лежит в основе всех соотношений между удельными нагрузками ( $H$ ,  $\sigma$ ,  $E$ ), приведенными в табл. 1. Работа и теплота в новой системе единиц представлены джоулями ( $1\text{ калория}=4,1868\text{ дж}$ ), а мощность — ваттами.

Сопоставим физические свойства алмаза со свойствами других инструментальных материалов. Примем за 100% микротвердость широко распространенного в промышленности твердого сплава ВК8.

По сравнению с этим материалом закаленная быстрорежущая сталь Р18 имеет твердость лишь 84% (фиг. 1). Микротвердость режущей керамики ЦМ332 — 134%. Абразивные материалы, используемые обычно для обработки твердых сплавов — карбид кремния и карбид бора, тверже сплава ВК8 соответственно в 1,98 и 3,06 раза. Но наиболее твердыми являются алмазы — натуральный и синтетический. Они более чем в шесть раз тверже, чем сплав ВК8, и примерно в 7,5 раза тверже, чем закаленная быстрорежущая сталь.

Таблица 1  
Основные физические величины, характеризующие свойства натуральных и синтетических алмазов

Наименование	Обозначение	Размерность	Значение	В системе СИ	
				размерность	значение
Плотность . . . . .	$\gamma_0$	г/см <sup>3</sup>	3,01 ÷ 3,54	г/см <sup>3</sup>	3,01 ÷ 3,54
Микротвердость алмаза натурального . . . . .	$H$	кг/мм <sup>2</sup>	10 060	н/мм <sup>2</sup>	98 655
синтетического . . . . .	$H$	»	10 100	»	99 047
Предел прочности на изгиб . . . . .	$\sigma_B$	»	30	»	294,2
на сжатие . . . . .	$\sigma_6$	»	200	»	1961,3
Модуль упругости . . . . .	$E$	»	72 · 10 <sup>8</sup> ÷ 93 · 10 <sup>8</sup>	»	70,6 · 10 <sup>4</sup> ÷ 91,2 · 10 <sup>4</sup>
Коэффициент теплопроводности . . . . .	$\lambda$	$\frac{\text{кал}}{\text{см·сек·град.}}$	0,35	вт/м. град.	1,465 · 10 <sup>2</sup>
Теплоемкость весовая . . . . .	$c$	кал/г. град	0,12	дж/кг. град.	5,02 · 10 <sup>2</sup>
объемная . . . . .	$c\%_0$	кал/см <sup>3</sup> град.	0,42	дж/см <sup>3</sup> . град.	1,76
Коэффициент температуропроводности . . . . .	$a$	см <sup>2</sup> /сек	0,83	см <sup>2</sup> /сек.	0,83
Коэффициент линейного расширения . . . . .	$\alpha$	1/град.	0,9 · 10 <sup>-6</sup> ÷ ÷ 1,45 · 10 <sup>-6</sup>	1/град.	0,9 · 10 <sup>-6</sup> ÷ ÷ 1,45 · 10 <sup>-6</sup>



Фиг. 1. Прочностные свойства алмазов в сопоставлении со свойствами других режущих материалов.

сжатие для этих материалов — 95%; 90%; 40% и 50% (фиг. 1).

Как видим, прочность алмаза по сравнению со сталью и твердыми сплавами невелика, что объясняется наличием в алмазах плоскостей спайности. Синтетические алмазы более хрупки, чем натуральные. Низкая прочность и высокая хрупкость алмазных зерен и кристаллов определяют область их применения в качестве режущих материалов. Это — область тонких стружек, малых нагрузок, безударной и безвибрационной работы.

Упругость алмаза достаточно высока. Модуль упругости этого материала примерно в 1,7 раза выше, чем сплава ВК8, и более чем в 4 раза выше, чем стали Р18. Высокий модуль упругости алмаза является одним из факторов, определяющих высокие режущие свойства алмазных инструментов.

Перейдем далее к рассмотрению теплофизических свойств алмаза. Как известно, теплофизические свойства режущего материала в значительной мере определяют стойкость инструмента.

По-прежнему будем сравнивать режущие материалы со сплавом ВК8, теплофизические константы которого примем за 100% (фиг. 2). Коэффициент теплопроводности алмаза оказывается достаточно высоким. Он более чем в два раза превышает коэффициент теплопроводности сплава ВК8, примерно в пять раз выше, чем коэффициент теплопроводности стали Р18 и твердого сплава Т15К6, и почти в тридцать пять раз выше, чем теплопроводность минералокерамики.

Особо высокая твердость обеспечивает алмазному зерну весьма высокие режущие свойства, способность успешно разрушать поверхностные слои других, даже достаточно твердых материалов.

Рассмотрим далее прочностные характеристики алмаза. Принимая предел прочности на изгиб сплава ВК8 за 100%, получаем для твердого сплава Т15К6, закаленной стали Р18, минералокерамики и алмаза соответственно 85%, 255%, 35% и 21%.

Предел прочности на



Это весьма благоприятное свойство обеспечивает возможность сравнительно быстрого отвода тепла от режущей поверхности алмазного зерна и, следовательно, создает условия для возникновения относительно низких температур на контактных поверхностях инструмента.

Благоприятный термический режим на режущих участках алмазного зерна создается также за счет высокой теплоемкости алмаза.

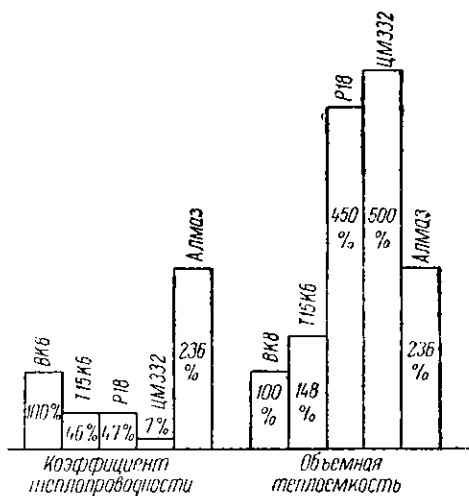
Важно заметить, что при высоких температурах алмаз постепенно превращается в графит. Такое превращение начинается в обычных условиях (в воздухе) при температуре около 800°.

Сравнительно низкая температурная устойчивость является одним из недостатков натуральных и синтетических алмазов. Поэтому как в нашей стране, так и за рубежом ведутся работы по созданию сверхтвердых веществ, которые во всех отношениях были бы похожи на алмаз, но имели бы более высокую температурную устойчивость. Таким новым, весьма перспективным материалом, пока еще не вышедшим за пределы лабораторно-производственных испытаний, является боразон, полученный впервые американской фирмой General Electric, а затем Институтом физики высоких давлений АН СССР.

Боразон получен из нитрида бора путем воздействия на него высоких давлений и температур, подобно тому как получается синтетический алмаз из графита [2, 4].

В периодической таблице Менделеева бор и азот расположены в одном ряду по соседству с углеродом: бор — слева, а азот — справа от углерода. Это натолкнуло на мысль о возможности получить из них вещество, по свойствам близкое к алмазу. Боразон, или как его еще иначе называют, кубический нитрид, имеет кристаллическую решетку почти с такими же параметрами, как и алмаз. Это обуславливает его твердость, равную твердости алмаза. Температурная же устойчивость боразона значительно выше, чем алмаза, — он не теряет своих свойств при нагреве до 1800°С.

По мере освоения и промышленного выпуска инструментов из боразона производительность обработки изделий инструментами



Фиг. 2. Теплофизические свойства алмаза в сопоставлении со свойствами других режущих металлов.

типа алмазных, по-видимому, может быть значительно повышена. В настоящее же время режимы работы должны быть подобраны таким образом, чтобы режущие зерна алмазов не испытывали температур, близких к температурам начала графитизации.

Из теплофизических свойств алмаза обращает на себя внимание весьма низкий коэффициент линейного расширения. Он по крайней мере в пять раз меньше, чем у твердого сплава ВК8 и примерно в семь раз ниже, чем у инструментов из P18. Следовательно, инструменты с кристаллами алмаза обладают весьма малыми температурными деформациями. Если вспомнить, что и механические деформации алмаза вследствие высокого модуля упругости невелики, то можно сделать заключение, что с помощью инструментов, содержащих алмазные режущие элементы, можно создавать высокоточные изделия и поддерживать эту точность в течение длительного времени.

Как натуральные, так и синтетические алмазы не проводят электрического тока. Только натуральные алмазы голубого цвета являются полупроводниками. Ввиду того, что голубые алмазы встречаются очень редко, искусственного превращения алмазов в полупроводники пытаются добиться путем диффузии в них мельчайших алюминиевых частиц [5].

Заканчивая рассмотрение физико-механических свойств, остановимся на некоторых особенностях синтетических алмазов. Синтезирование алмаза из графита производится при весьма высоких давлениях и температурах. В американской промышленности, например, по данным фирмы General Electric, алмазы синтезируются в специальных камерах-автоклавах. Камера и пуансоны изготовлены из твердого сплава и выложены особым материалом — пиропилитом, стойким по отношению к температурам. При синтезировании алмаза из графита применяются металлические катализаторы в виде никеля или тантала. Рабочие давления в ходе процесса составляют  $53 \div 120$  тыс. атмосфер, а температуры  $1200 \div 2400^\circ$ . Без катализаторов по данным этой фирмы потребовалось бы давление до 300 тыс. атмосфер и температуры около  $4000^\circ$ .

Основная масса кристаллов при синтезе алмаза получается размером  $0,2 \div 0,4$  мм, отдельные кристаллы достигают размера  $0,6 \div 0,8$  мм. Следовательно, синтетические алмазы пока не могут использоваться как кристаллы для инструментов, работающих на токарных и сверлильных операциях. Их область применения — главным образом шлифовальные инструменты и порошки для доводочных операций. Кристаллические же инструменты для снятия сравнительно крупных стружек (точение, сверление) выполняются из натуральных алмазов.

Исследования показывают, что синтетические алмазы отличаются от натуральных формой наружной поверхности. У синтетических алмазов поверхность имеет много выступов и углублений, тогда как поверхность природных алмазов ровная и глад-

кая [2]. Это увеличивает количество режущих граней у каждого зерна синтетического алмаза, а также обеспечивает лучшее удержание зерен в связке.

Благодаря высоким режущим свойствам алмазов основная часть их расходуется на технические нужды. В общей мировой добыче алмазов (примерно 30 млн. карат в год без СССР) доля алмазов, расходуемых на технические цели, близка к 70—80%. Основная часть технических алмазов идет на изготовление алмазных инструментов, а также на обработку твердосплавных изделий и режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами.

Алмазные инструменты, нашедшие применение в производстве, можно разделить на две основные группы: а) кристалльные и б) шлифовальные. К кристалльным относятся инструменты, содержащие зерна алмаза весом не менее 0,05—0,06 карата, то есть объемом 3 куб. миллиметра и более. Таковы алмазы для правки шлифовальных кругов, алмазные резцы, сверла, стеклорезы, наконечники к твердомерам, буровые инструменты, алмазные контакты к приборам активного контроля.

Мы уже отмечали, что в данное время синтетические алмазы могут быть получены в виде зерен размером в среднем не более 0,4 мм, то есть весом не более 0,001 карата. Следовательно, синтетические алмазы непригодны для изготовления кристалльных инструментов, поэтому область применения последних сравнительно ограничена. Правда, увеличение добычи алмазов в нашей стране и широкий выпуск синтетических алмазов, заменивших почти полностью натуральные алмазы в шлифовальных инструментах, расширяет возможности предприятий по применению кристалльных инструментов.

Наиболее широко применяемым видом алмазных инструментов являются шлифовальные (круги, притиры, надфили, порошки), изготавливаемые в подавляющем большинстве случаев из синтетических алмазов.

## **АЛМАЗНЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ**

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

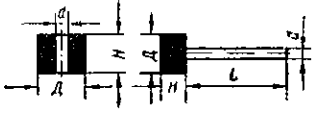
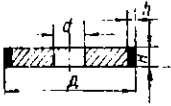
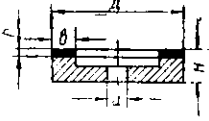
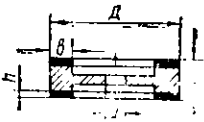
Алмазные шлифовальные круги характеризуются следующими основными параметрами: 1) формой и размерами; 2) материалом режущего зерна; 3) размером режущих зерен; 4) характером связки; 5) составом алмазоносного слоя; 6) количеством алмазов в круге; 7) материалом корпуса круга.

**Форма и размеры** алмазных кругов регламентированы ГОСТ 9770-61. Основные типы кругов и их размеры приведены в табл. 2.

Плоские прямые круги типа АПП (алмазный плоский прямой) предназначены для обработки цилиндрических и плоских поверх-

Алмазные круги (форма, размеры, вес алмазов)

Таблица 2

Эскиз	Обозначения	Основные размеры, мм					Вес алмазов в каратах при концентрации		
		<i>D</i>	<i>H</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	25%	50%	100%
	А1ПП АГЦ	6 8 10	6 6 6	2 3 3	— — —	2 2,5 3,5	0,16 0,28 0,47	0,33 0,57 0,94	0,66 1,14 1,88
	АПП	30 50 75 100 100 125 125 150 150 200 200 250 300	10 10 5 5 10 5 10 5 10 5 10 10 15	10 16 20 32 32 32 32 32 32 32 32 75 75	— — — — — — — — — — — — — 5	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 5	2,79 4,85 3,70 5,01 10,02 6,30 12,60 7,60 15,19 10,18 20,36 25,53 76,25	5,58 9,70 7,40 10,02 20,05 12,60 25,20 15,20 30,39 20,36 40,73 51,07 152,50	11,16 19,40 14,80 20,04 40,10 25,20 50,40 30,40 60,78 40,72 81,46 102,14 305,00
	АПВ	100 125 150 150 200 200	20 20 20 20 20 20	32 32 32 32 32 32	5 5 5 10 10 20	3 3 3 3 3 3	4,90 6,20 7,49 14,47 19,64 37,21	9,80 12,40 14,98 28,94 39,28 74,43	19,60 24,80 29,96 57,88 78,56 148,86
	АПВД	100 125 150 150 200 200	20 20 13 13 20 20	32 32 32 32 32 32	5 5 5 10 10 20	3 3 3 3 3 3	9,82 12,40 14,98 28,94 28,94 39,28 74,43	19,64 24,80 29,96 57,89 57,89 78,56 148,86	39,28 49,60 59,92 115,78 115,78 157,12 297,72

Эскиз	Обозначение	Основные размеры, мм					Вес алмазов в каратах при концентрации				
		D	H	d	b	h	25%	50%	100%		
			АЧК	50	20	16	3	3	1,45	2,91	5,82
75	25			20	3	3	2,23	4,46	8,92		
100	32			32	3	3	3,00	6,00	12,00		
100	32			32	5	3	4,90	9,80	19,60		
100	32			32	10	3	9,30	18,60	37,20		
125	32			32	3	3	3,78	7,56	15,12		
125	32			32	5	3	6,20	12,40	24,80		
125	32			32	10	3	11,89	23,78	47,56		
150	32			32	3	3	4,56	9,12	18,24		
150	32			32	5	3	7,49	14,98	29,96		
	А1ЧК	150	32	32	3	3	14,47	28,94	57,89		
		150	32	32	10	3	26,88	53,76	107,52		
		200	40	32	10	3	19,64	39,28	78,56		
		200	40	32	20	3	37,21	74,43	148,86		
			АТ	75	10	20	3	1,5	1,11	2,23	4,46
				75	10	20	5	1,5	1,80	3,60	7,20
				100	10	32	3	1,5	1,50	3,00	6,00
				125	13	32	3	1,5	1,89	3,78	7,56
			А1Т	75	10	20	2	3	1,51	3,02	6,04
				100	10	32	2	3	2,02	4,05	8,10
125	13			32	2	3	2,54	5,08	10,16		
	А3Т			75	10	20	3	1,5	1,11	2,23	4,46
		75	10	20	5	1,5	1,80	3,60	7,20		
		100	10	32	3	1,5	1,50	3,00	6,00		
		100	10	32	5	1,5	2,45	4,90	9,80		
		125	13	32	5	1,5	3,10	6,20	12,40		
	А2П	50	10	10	3	1,5	3,00	6,00			
		125	13	32	5	1,5	3,78	7,56	15,00		

ностей на круглошлифовальных, плоскошлифовальных или заточных станках. Они могут быть использованы для изготовления изделий из металлов и пластмасс для шлифования и доводки наружных поверхностей и торцов твердосплавных инструментов и твердосплавных частей штампов.

Круги АПП и АГЦ (алмазные головки цилиндрические) предназначены для обработки внутренних цилиндрических поверхностей — посадочных отверстий цельных твердосплавных инструментов, внутренних поверхностей штампов и т. д.

Стандартом предусмотрено большое количество разновидностей кругов, где алмазосносный слой расположен не на периферии, как у кругов типа АПП и АГЦ, а на одном или двух торцах.

Таковы прежде всего круги АПВ (с выточкой) и АПВД (двойной). Эти круги могут быть применены при обработке плоских поверхностей, в частности, при заточке и доводке резцов. Круги АПВД используются при шлифовании и доводке мерительных поверхностей контрольных инструментов. Заточка и доводка резцов кругами АПВД позволяет сократить вспомогательное время на переустановку резцов в резцедержателе, так как обработка инструмента может производиться либо правой, либо левой стороной круга.

Широко распространены в производстве круги АЧК (алмазный чашечный конический). Они могут быть применены как для плоского торцового шлифования, так и для заточки передних и задних поверхностей режущих инструментов на универсально-заточных и специальных станках. Коническая форма круга облегчает доступ к затачиваемым поверхностям многолезвийных инструментов. Расположение гаек, закрепляющих АЧК на шпинделе станка, внутри корпуса круга, создает ряд технологических преимуществ и прежде всего обеспечивает свободное перемещение изделий мимо торца круга.

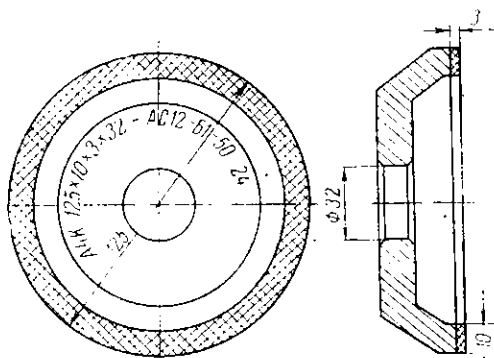
Разновидностью чашечных являются круги А1ЧК, где алмазосносный слой расположен главным образом по периферийной части конуса. Это создает условия для удобного подхода к задним поверхностям зубцов многолезвийных инструментов. Круги АТ, А1Т, А2Т (алмазные тарельчатые), имеющие различные углы при основании конуса, служат для обработки плоскостей в труднодоступных местах. Они успешно используются для заточки передней поверхности многолезвийных инструментов с малыми углами впадины между зубцами, например, твердосплавных мелкомодульных фрез. Такие круги рекомендуются для доводки мерительных поверхностей твердосплавных скоб в тех случаях, когда круги типа АПВ и АПВД не могут быть применены из-за малого расстояния между мерительными поверхностями инструмента.

Круги типа АЗТ имеют алмазосносный слой, нанесенный на конический торец. Это позволяет такими кругами шлифовать и доводить винтовые поверхности, например, передние поверхности

твердосплавных инструментов со спиральными зубьями. В этом случае инструменты с плоскими торцами типа АЧК и АТ непригодны, поскольку винтовая поверхность передней грани инструмента не разворачивается на плоскость. При шлифовании винтовой поверхности между нею и инструментом должен иметь место точечный или линейчатый контакт. Круги типа АЗТ как раз и обеспечивают линейчатость контакта между образующей конического торца круга и обрабатываемой винтовой поверхностью.

Фасонные плоские круги типа А2П и А5П используются для образования фасонных поверхностей либо методом огибания (например, обработка фасонных инструментов на профилешлифовальных станках), либо методом непосредственного копирования профиля круга на изделии (например, изготовление радиусных выточек, канавок, стружколомающих лунок на твердосплавных инструментах, шлифование и доводка резьбы).

Форма и размеры указываются в маркирующей надписи на круге (фиг. 3). В соответствии со стандартом эта надпись начинается с обозначений, характеризующих форму и размеры круга в таком порядке: форма круга — диаметр—размеры алмазосносного слоя — диаметр посадочного отверстия. Так, для круга, приведенного на фиг. 3, АЧК 125×10×3×32 надпись обозначает алмазный чашечный конический круг диаметром 125 мм, с алмазосносным слоем шириной (по торцу) 10 мм и толщиной



Фиг. 3. Пример маркировки алмазного круга: алмазный чашечный круг диаметром 125 мм, размеры алмазосносного слоя 10×3, диаметр отверстия 32 мм, алмаз синтетический, зернистость 12 (размер зерна 0,12 мм), органическая связка В1 (бакелит, наполнитель карбид бора), концентрация алмазов 500/0, количество алмазов в круге 24 карата.

3 мм, диаметром посадочного отверстия 32 мм. Если на круге сделана надпись: АПП 200×10×3×75, то по аналогии расшифруем ее как алмазный плоский прямой круг диаметром 200 мм с алмазосносным слоем длиной (вдоль образующей) 10 мм, толщиной (по радиусу) 3 мм, диаметром посадочного отверстия 75 мм.

Материалом режущих зерен в алмазных кругах могут служить натуральные или синтетические алмазы. Опыт показывает, что синтетические алмазы несколько более хрупкие, чем натуральные. Поэтому в отдельных случаях круги из натуральных алмазов могут оказаться более стойкими и производительными. Однако даже при этих условиях синтетические алмазы, значи-

тельно более дешевые, чем натуральные, как правило, экономичнее. В большинстве случаев, особенно при обработке твердых сплавов, синтетические алмазы не уступают натуральным, а иногда и превосходят их по режущим свойствам.

Материал режущего зерна отмечается при маркировке кругов. Если в круге используются зерна натурального алмаза, то в маркировке непосредственно после формы и размеров круга идет обозначение «А» и далее число, характеризующее размеры зерна. Если в круге зерна из синтетических алмазов, то ставится обозначение «АС» — алмаз синтетический, как, например, для круга, изображенного на фиг. 3.

Размер режущих зерен является весьма важной характеристикой алмазного круга. В зависимости от размера алмазные режущие зерна условно разделяются на три группы: шлифзерна, шлифпорошки, микропорошки.

В соответствии с ГОСТ 9206-59, размеры зерен алмазов (как и других абразивных зерен) принято выражать либо в сотых долях миллиметра (для шлифзерен и шлифпорошков), либо в микронах (для микропорошков). Так, зернистость 25 обозначает

Таблица 3

Зернистость алмазных и абразивных кругов, порошков и паст

Группа	Обозначение зернистости	Размер зерен основной фракции, <i>мм</i>
Шлифзерна	50	0,50 ÷ 0,63
	40	0,40 ÷ 0,50
	32	0,32 ÷ 0,40
	25	0,25 ÷ 0,32
	20	0,20 ÷ 0,25
	16	0,16 ÷ 0,25
Шлифпорошки	12	0,12 ÷ 0,16
	10	0,10 ÷ 0,12
	8	0,08 ÷ 0,10
	6	0,06 ÷ 0,08
	5	0,05 ÷ 0,06
	4	0,04 ÷ 0,05
Микропорошки	M40	0,028 ÷ 0,040
	M28	0,020 ÷ 0,028
	M20	0,014 ÷ 0,020
	M14	0,010 ÷ 0,014
	M10	0,007 ÷ 0,010
	M7	0,005 ÷ 0,007
	M5	0,003 ÷ 0,005
	M3	0,001 ÷ 0,003
	M1	Меньше 0,001



ет, что в круге использованы зерна, основная фракция которых имеет наименьший размер  $\frac{25}{100} = 0,25$  мм. Круг зернистостью М40 имеет в алмазоносном слое зерна, размеры основной фракции которых не превышают 40 микрон.

В табл. 3 приведены зернистости, применяемые в соответствии с ГОСТ 9206-59 для абразивных и алмазных кругов, порошков и паст. Обозначение зернистости в маркировке круга ставится непосредственно после обозначения материала зерна. Так, АС20 — круг с зернами из синтетических алмазов, зернистостью 20. Аналогично А8 — круг с зернами из натуральных алмазов зернистостью 8.

**Характер связки** в значительной мере определяет эксплуатационные свойства алмазного круга. Связка обеспечивает ту или иную прочность удержания зерен в алмазоносном слое. Она определяет момент, когда притупившиеся зерна освобождаются и удаляются из круга, то есть определяет способность алмазного круга к самозатачиванию. При более прочных связках режущие зерна удерживаются в круге до большей степени притупления. Поэтому работа кругами с более прочными связками хотя и обеспечивает меньший расход алмазов, но сопровождается, как правило, более высокими температурами шлифования и большей напряженностью процесса.

В алмазных шлифовальных кругах до настоящего времени нашли себе применение три основных вида связок: 1) органические, 2) металлические и 3) керамические.

В качестве органической связки, как правило, служат фенольно-формальдегидные смолы, в частности, бакелит. Круги на бакелитовой связке применяются преимущественно для работ, где предусмотрен сравнительно небольшой съем обрабатываемого материала, например, чистовая заточка и доводка твердосплавных инструментов. При более грубых работах расход алмазов вследствие малой прочности связки оказывается чрезмерным. Круги на бакелитовой связке обеспечивают высокую чистоту поверхности и мало засаливаются.

Металлические связки могут быть на медно-оловянной, вольфрамко-кобальтовой или железо-никелевой основе. Металлическая связка более прочна. Поэтому круги с такой связкой предназначены для съема больших слоев материала, чем круги на органической связке. Вместе с тем они, как правило, вызывают большие усилия и температуры шлифования. Поэтому при работе кругами на металлической связке обязательно непрерывное и достаточно обильное охлаждение.

Керамическая связка пока еще мало распространена.

Обозначение связки «Б» (бакелитовая), «М» (металлическая) или «К» (керамическая) следует в маркировке круга за зернистостью. Кроме букв обозначения связки содержит номер, условно обозначающий материал наполнителя.

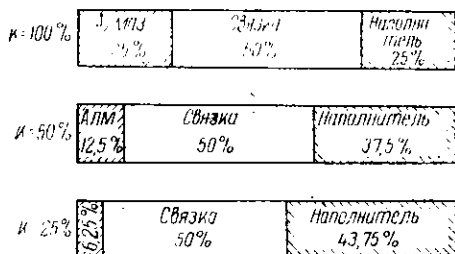
Наполнители являются одним из элементов **состава алмазосного** слоя. Этот слой состоит из алмазных зерен, связки и наполнителя. Наполнитель играет роль опоры для алмазных зерен, поскольку последние занимают лишь часть объема алмазосного слоя.

Состав алмазосного слоя характеризуется прежде всего концентрацией алмазов. Условились полагать за 100% концентрации содержание в каждом кубическом миллиметре алмазосного слоя 0,878 мг алмаза или 0,00439 карата. Нетрудно подсчитать, что при стопроцентной концентрации алмазы занимают примерно четверть объема алмазосного слоя. В самом деле, принимая удельный вес алмаза равным 3,5, устанавливаем, что 0,878 мг алмаза имеют объем  $\sim 0,25 \text{ мм}^3$ .

Алмазные круги чаще всего выпускаются 100%; 50% и 25% концентрации, то есть с объемом алмазов, составляющим соответственно 25%; 12,5%; 6,25% объема режущего слоя. По специальным заказам выпускаются круги с концентрацией свыше 100%.

Естественно, что чем выше концентрация алмазов в алмазосном слое, тем выше при прочих равных условиях работоспособность, производительность и срок службы круга. Однако, чем выше концентрация, тем большее количество карат алмаза в круге, тем дороже круг.

На фиг. 4 приведены диаграммы, характеризующие состав алмазосного слоя при различной концентрации алмазов.



Фиг. 4. Состав алмазосного слоя при различной концентрации алмазов.

Наполнитель, занимающий от 25 до 43,75% объема алмазосного слоя, может состоять из различных материалов.

Практически для кругов с органическими связками используются наполнители в виде карбида бора, железного порошка, белого электрокорунда или зеленого карбида кремния. Круги с бакелитовой связкой и наполнителем в виде карбида

бора обозначаются «Б1», круги с бакелитовой связкой и наполнителями в виде железного порошка, белого электрокорунда и зеленого карбида кремния обозначаются соответственно «Б2», «Б3», «Б4».

По данным НИИ Алмаза соотношение в режущих свойствах алмазных кругов на бакелитовой связке в зависимости от наполнителя может быть охарактеризовано следующими величинами. Если за 100% принять работоспособность кругов со связкой Б1, то для Б2, Б3 и Б4 получаем соответственно 120%; 107%; 170%.

Повышенные режущие свойства кругов с железным порошком и карбидом кремния объясняются более высокой теплопроводностью наполнителей и, следовательно, лучшим отводом тепла от режущих алмазных зерен в тело круга. Однако круги на связке Б4 недостаточно вязки и хрупкость их алмазоносного слоя может привести к разрушению инструмента в работе.

В данное время наибольшее распространение получили алмазные круги с органической связкой типа Б1. Достаточно широко применяются и круги с металлической связкой М1 (медно-оловянная композиция).

Вместе с тем надо заметить, что непрерывно расширяющаяся область применения алмазных шлифовальных инструментов требует большого разнообразия в составах и характеристике алмазоносных слоев. Поэтому промышленность, производящая алмазные инструменты, научно-исследовательские институты и лаборатории работают над созданием новых видов связок и наполнителей к ним. В ближайшие годы машиностроение получит, по-видимому, новые высокоэффективные виды связок, делающие алмазные круги пригодными для обработки широкой гаммы разнообразных материалов в различных условиях производства.

**Количество алмазов в круге**, определяющее стоимость последнего, зависит от размеров алмазоносного слоя и концентрации в нем алмазных зерен. Необходимость в определении количества алмазов возникает обычно в двух случаях: 1) при определении стоимости нового круга; 2) при определении стоимости алмазов, израсходованных в результате износа алмазоносного слоя на круге после того или иного периода его эксплуатации.

Определение алмазосодержания и стоимости нового круга лучше всего производить по объему алмазоносного слоя. Количество алмазов в круге может быть установлено по формуле:

$$A = 439 \cdot 10^{-7} KV \text{ карат,} \quad (1)$$

где  $K$  — концентрация, %;

$V$  — объем алмазоносного слоя,  $\text{мм}^3$ .

Так, круг АЧК  $125 \times 10 \times 3 \times 32$  (фиг. 3) имеет объем алмазоносного слоя:

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) h = \frac{\pi}{4} (125^2 - 105^2) \cdot 3 = 10833 \text{ мм}^3.$$

При концентрации  $K = 50\%$  по формуле (1) получаем:

$$A = 439 \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 10833 = 23,778 \approx 24 \text{ карата.}$$

В табл. 4 приведены цены на шлифовальные круги из синтетических алмазов по состоянию на 1 января 1964 г. [6].

В соответствии с этой таблицей стоимость круга на бакелитовой связке в рассматриваемом примере составляет:

$$C = 24 \cdot 2 \text{ р. } 40 \text{ к.} = 57 \text{ р. } 60 \text{ к.}$$

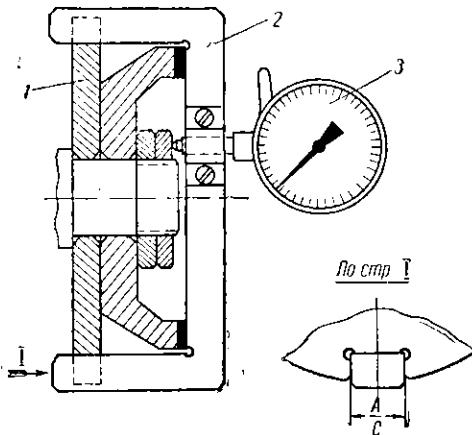
## Цены на шлифовальные круги из синтетических алмазов

Количество алмазов в одном круге в каратах	Оптовая цена алмазных кругов в руб. и коп., отнесенная к одному карату алмаза, содержащегося в круге			
	Круги по ГОСТ 9770—61 и отраслевым нормам		Круги специальные	
	на органи- ческой связке	на метал- лической связке	на органи- ческой связке	на метал- лической связке
До 0,5	13—90	16—30	25—90	30—70
От 0,5 до 1,0	9—70	11—30	17—20	20—70
» 1,0 » 1,5	6—60	7—50	11—50	13—10
» 1,5 » 2,5	4—90	5—50	8—00	9—10
» 2,5 » 5,0	3—70	4—10	5—40	6—30
» 5,0 » 15,0	2—90	3—10	3—90	4—30
» 15,0 » 60,0	2—40	2—50	2—90	3—10
Свыше 60,0	2—10	2—20	2—30	2—40

Количество алмазов в каратах отмечается последним в порядке цифр, характеризующих круг (см., например, фиг. 3).

По мере износа круг теряет часть алмазонасного слоя. Для определения экономических показателей процесса алмазной обработки необходимо определить количество алмазов, израсходованных за счет износа круга за тот или иной период времени.

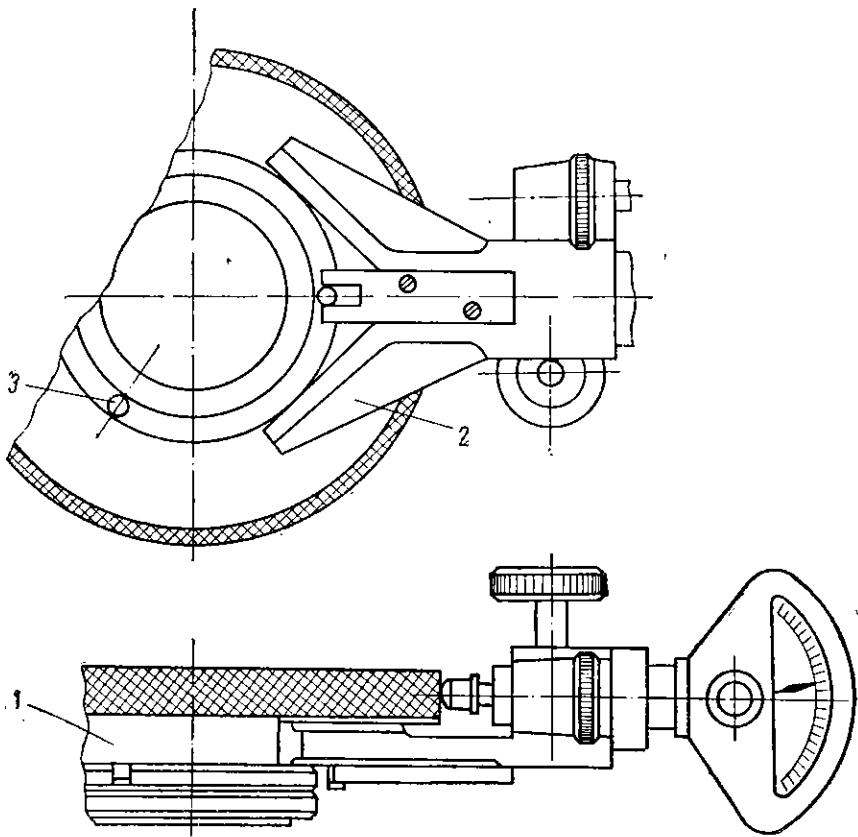
В этом случае используется обычно один из двух методов: 1) определение изменения размеров и объема алмазонасного слоя и 2) определение изменения веса круга.



Фиг. 5. Устройство для измерения износа чашечного алмазного круга.

Первый метод имеет то преимущество, что для установления расхода алмазов круг может не сниматься со шпинделя станка и, следовательно, наладка операции не меняется. Изменение размеров круга надо определять с возможно большей тщательностью по результатам нескольких измерений от постоянной базы.

Для установления износа чашечных алмазных кругов можно использовать приспособление, схема которого приведена на фиг. 5. На шпиндель станка вме-



Фиг. 6. Устройство для измерения износа плоского прямого алмазного круга.

сте с кругом устанавливается хорошо сбалансированный диск 1 с тремя парами радиальных вырезов. В эти вырезы входят с посадкой скольжения лапки скобы 2, чем обеспечивается постоянство положения измерительного устройства относительно круга. Скоба 2 имеет шлифованные плоскости, которыми она в процессе измерения опирается на рабочий торец круга. При этом ножка микронного индикатора 3 упирается в шлифованную шайбу, с помощью которой алмазный круг крепится на шпинделе станка. Различие в показаниях индикатора до и после некоторого периода эксплуатации круга, будучи осреднено по трем измерениям, составляет износ алмазного инструмента.

При необходимости измерить износ круга формы АПП можно использовать устройство, показанное на фиг. 6. На шпиндель станка одновременно с кругом устанавливается каленое, тщательно шлифованное кольцо 1. Призма измерительного устройства 2 опирается на это кольцо. Положения призмы по отношению к

кругу фиксируются пальцами 3. Мерительный стержень прибора (миниметр, микрокатор) опирается на наружную поверхность алмазосносного слоя. Разница в показаниях прибора до и после эксплуатации составляет радиальный износ круга.

Определив тем или иным путем изменение объема алмазосносного слоя  $\Delta V$ , можем рассчитать расход алмазов по формуле, аналогичной (1):

$$\Delta A = 439 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot \Delta V \text{ карат.} \quad (2)$$

При определении расхода алмазов путем точного взвешивания круга до и после выполнения заданного объема работ необходимо учитывать, что вес изношенной части алмазосносного слоя зависит не только от веса алмазов, но и от веса связки и наполнителя. Поэтому, если известно, что круг потерял  $\Delta B$  граммов веса, то, чтобы установить, сколько в этих граммах содержится граммов или карат алмазов, необходимо знать состав алмазосносного слоя.

Обработка данных Украинского института синтетических сверхтвердых материалов, выполненная нами, позволяет рекомендовать при расчете расхода алмазов для кругов на бакелитовой связке формулы, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Формулы для расчета расхода алмазов по изменению веса круга  $\Delta B$  (граммов)

Связка	Расход алмазов	
	в граммах	в каратах
Б1	$\Delta A' = (0,004K + 0,014) \Delta B$	$\Delta A = (0,02K + 0,07) \Delta B$
Б2	$\Delta A' = (0,0029K - 0,034) \Delta B$	$\Delta A = (0,014K - 0,17) \Delta B$
Б3	$\Delta A' = (0,0036K - 0,01) \Delta B$	$\Delta A = (0,018K - 0,05) \Delta B$
Б4	$\Delta A' = (0,0037K + 0,012) \Delta B$	$\Delta A = (0,0175K + 0,06) \Delta B$

Если, например, по результатам точного взвешивания установлено, что круг со связкой Б1 и концентрацией 100% после некоторого периода работы потерял в весе 0,5 г, то это значит, что израсходовано:

$$\Delta A' = (0,004 \cdot 100 + 0,014) \cdot 0,5 = 0,207 \text{ г,}$$

$$\text{или } \Delta A = (0,02 \cdot 100 + 0,07) \cdot 0,5 = 1,035 \text{ карата.}$$

**Материалом корпуса алмазного круга** является, как правило, алюминиевый легкий сплав или пластмасса. Корпуса из алюминиевых сплавов обеспечивают лучший отвод тепла от алмазосносного слоя и тем самым содействуют повышению стойкости инструмента. Пластмассовые корпуса хуже отводят тепло, но их применение упрощает технологию изготовления кругов и несколько удешевляет стоимость инструмента.

## ТЕПЛОФИЗИКА И ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

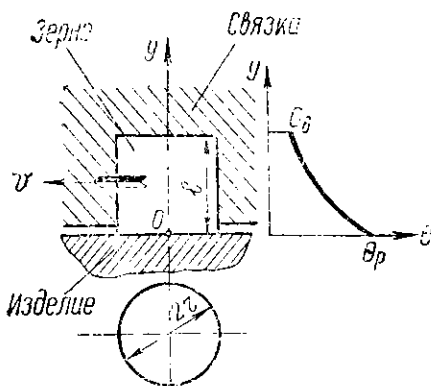
Первое Всесоюзное совещание по применению алмазного инструмента в народном хозяйстве СССР, созданное в г. Киеве в июне 1963 г., в своем решении отметило необходимость исследования тепловых и других физических явлений при алмазной обработке как основу для отыскания важнейших закономерностей процесса и выбора наиболее выгоднейших режимов работы.

Мы уже указывали выше, что алмаз при всех присущих ему достоинствах обладает одним существенным недостатком — при температурах, превышающих  $800-820^\circ$ , он превращается в графит, то есть полностью теряет режущие свойства. Поэтому весьма важно установить связь между элементами режима резания и температурой отдельно взятого алмазного зерна, чтобы определить область режимов и других параметров процесса, при которых температура рабочей поверхности зерна не превышает безопасного предела.

Задача о расчете температуры на рабочей поверхности алмазного зерна в самом первом приближении может быть решена с помощью общих закономерностей теплофизики. Как всегда, когда мы имеем дело с какой-либо из задач технологической теплофизики, надо схематизировать реальный процесс, чтобы упростить сложную задачу и сделать ее доступной математическому описанию. В нашем случае схему процесса для зерна, расположенного на рабочем торце алмазного круга и участвующего в резании, представим в нижеследующем виде. Положим, что зерно имеет форму цилиндрика, диаметр которого равен высоте (фиг. 7). Со всех сторон оно окружено слоем связки<sup>1</sup>. На рабочей (нижней) поверхности зерна выделяется тепло, являющееся результатом процесса резания.

Это тепло равномерно распределено по площадке контакта рабочего торца зерна с изделием, и на каждой единице площади контакта выделяется  $q \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{сек}}$ .

Теплота  $q \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{сек}}$  распределяется между зерном и шлифу-



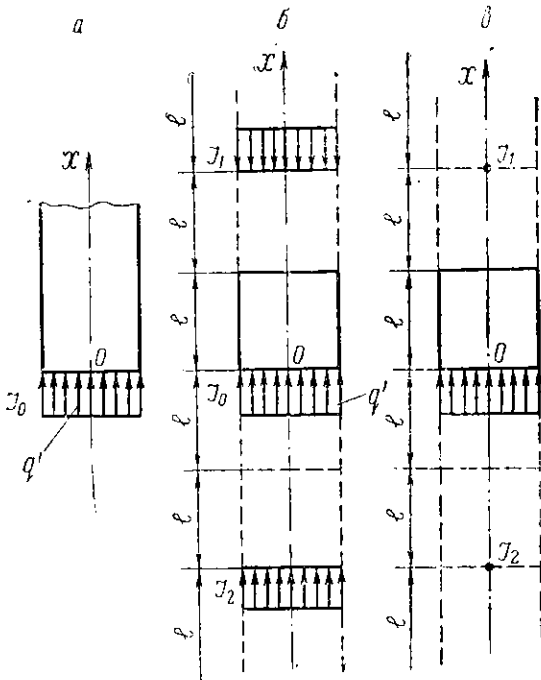
Фиг. 7. Схематическое представление алмазного зерна.

<sup>1</sup> Под связкой здесь понимаем всю остальную массу рабочего слоя круга.

Температура зерна складывается как результат подвода теплоты резания со стороны рабочего торца и отвода части этого тепла через поверхность контакта зерна со связкой.

Рассмотрим вначале нагревание зерна теплотой, которая в него подводится, полагая при этом, что отдачи тепла из зерна нет. В дальнейшем учтем снижение температуры зерна за счет теплоотвода в связку.

В теплофизике известно решение задачи о температуре в полубесконечном стержне, на торце которого непрерывно действует источник тепла постоянной интенсивности (фиг. 8,а). В этом случае температура в любой точке стержня рассчитывается по формуле [7].



Фиг. 8. Стержни — полубесконечный (а) и конечных размеров (б), нагреваемые плоским источником постоянной интенсивности. Замена ряда плоских источников рядом сосредоточенных (а).

$$\Theta(x) = \frac{q'}{c \gamma V \pi a} \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \times e^{-\frac{x^2}{4a(\tau-t)}} \quad (3)$$

где  $q'$  — интенсивность источника, кал/см<sup>2</sup>. сек;

$c \gamma$  и  $a$  — соответственно объемная теплоемкость кал/см<sup>3</sup>. град и коэффициент температуропроводности см<sup>2</sup>/сек материала стержня;

$\tau$  — время действия источника, сек;

$x$  — расстояние рассматриваемой точки от торца стержня, см.

Положив в (3)  $x=0$ , получаем формулу для расчета температуры на торце полубесконечного стержня:



$$\Theta_0' = \frac{q'}{c\gamma\sqrt{\pi a}} \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} = \frac{2q'\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

В последнем выражении объемная теплоемкость  $c\gamma$  по общеизвестной формуле

$$c\gamma = \frac{\lambda}{a}$$

заменена отношением коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  (кал/см. сек. град) к коэффициенту температуропроводности  $a$ . Если стержень ограничен по длине размером  $l$  (фиг. 8, б), то при той же интенсивности источника  $q'$  температура в нем будет выше, чем для полубесконечного стержня. Это повышение, вызванное ограниченностью тела, учитывается математически с помощью бесконечного ряда так называемых отраженных источников  $I_1; I_2 \dots I_n$ , равных по мощности действующему источнику  $I_0$  и расположенных так, как показано на фиг. 8,б [7; 8; 9].

Чтобы не усложнять задачу, сделаем упрощение схемы, представленной на фиг. 8,б, вполне допустимое в нашем случае. Заменим каждый из плоских отраженных источников  $I_1; I_2 \dots I_n$  сосредоточенным точечным источником (фиг. 8,в). Мощность каждого сосредоточенного источника  $q''$  примем равной

$$q'' = q' \cdot F \text{ кал/сек,}$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения стержня.

Для описания температурного поля, вызванного в полубесконечном теле сосредоточенным непрерывно действующим источником тепла, в теории источников [7] имеем выражение:

$$\Theta''(R, \tau) = \frac{q''}{2\pi\lambda R} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{R}{\sqrt{4a\tau}}\right) \right]. \quad (5)$$

Здесь  $R$  — расстояние от источника до рассматриваемой точки;

$\Phi$  — функция Крампа (модифицированная функция интеграла вероятности), для которой в справочной литературе даются таблицы [10].

Используя формулу (5), рассчитаем температуру центральной точки  $\theta$  на нижнем торце стержня (фиг. 8,в). По отношению к этой точке отраженные источники образуют симметричный ряд с расстояниями  $R_n = 2ln$ , где  $n = 1; 2; 3 \dots \infty$ .

Температура, вызванная всеми отраженными источниками в точке  $\theta$ , может быть определена как сумма температур, вызванных каждым из этих источников. Используя формулу (5), получаем:

$$\Theta_0'' = 2 \cdot \frac{q''}{2\pi\lambda l} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{ln}{\sqrt{a\tau}}\right)}{2n}. \quad (6)$$

Общую температуру в точке  $0$ , возникающую в результате действия основного и отраженных источников, получим, суммируя (4) и (6) и заменив при этом  $q'' = q' F$ :

$$\Theta_0 = \Theta_0' + \Theta_0'' = \frac{2q' \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \sqrt{\tau + \frac{q' F}{\pi \lambda l}} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{ln}{\sqrt{a\tau}}\right)}{2n}. \quad (7)$$

Теперь перейдем к алмазному зерну. Мы приняли ранее, что  $l = 2r$  и  $q' = bq$ . Имеем в виду, что  $F = \pi r^2$ . Обозначим теплофизические коэффициенты для алмаза через  $\lambda_1$  и  $a_1$ .

Подставляя упомянутые величины в (7), получаем:

$$\Theta_0 = \frac{2bq \sqrt{a_1}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} + \frac{bq}{2\lambda_1} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{2rn}{\sqrt{a_1\tau}}\right)}{2n}. \quad (8)$$

С целью обобщения расчетной формулы для ряда подобных случаев введем в последнюю формулу безразмерный критерий Фурье [11], положив

$$F_0 = \frac{a_1 \tau}{r^2}.$$

В нашем случае к концу реза

$$F_0 = \frac{a_1 B}{v r^2}, \quad (9)$$

так как время нагревания зерна  $\tau$  равно отношению длины контакта зерна с изделием в направлении скорости круга (длины реза)  $B$  к скорости круга  $v$ .

В формулу (9) следует подставлять  $B$  и  $r$  в см,  $v$  — в см/сек и  $a_1$  — в см<sup>2</sup>/сек. Это не вполне удобно, так как на практике длина контакта  $B$  и радиус зерна  $r$  измеряются в миллиметрах, а скорость шлифования — в м/сек. Переходя к этим размерностям и оставив  $a_1$  см<sup>2</sup>/сек, получаем формулу для расчета критерия Фурье:

$$F_0 = \frac{a_1 B}{10 v r^2}, \quad (10)$$

где  $a_1$  см<sup>2</sup>/сек,  $B$  мм,  $r$  мм,  $v$  м/сек.

С учетом критерия  $F_0$  формула (8) приобретает следующий вид:

$$\Theta_0 = \frac{bqr}{10 \lambda_1} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{2n}{\sqrt{F_0}}\right)}{n} \right].$$

Цифра 10 введена нами в знаменатель последнего выражения с тем, чтобы подставлять радиус зерна  $r$  в миллиметрах. Обозна-

чим безразмерную величину, стоящую в квадратных скобках, через  $A_p$ , то есть положим

$$A_p = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{2n}{\sqrt{F_0}}\right)}{n}. \quad (11)$$

Тогда температура рабочей поверхности алмазного зерна без учета теплоотвода в связку может быть рассчитана по формуле

$$\Theta_0 = \frac{bqr}{10 \lambda_1} \cdot A_p. \quad (12)$$

Теперь учтем теплоотвод в связку. Известно [11], что цилиндр, погруженный в среду с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_c$  и температурой  $\Theta_c$ , отдает в эту среду количество тепла

$$Q_0 = \frac{(\Theta - \Theta_c) \cdot 2\pi l \lambda_c}{\ln \frac{2l}{r}} \text{ кал/сек},$$

где  $l$  и  $2r$  — размеры цилиндра,  $\Theta$  — его температура.

Применяя эту формулу для определения тепла, отдаваемого алмазным зерном в связку, положим, что ввиду массивности круга связка и лежащая над ней масса зерен за период реза не нагревается, то есть условно примем  $\Theta_c = 0^\circ$ . Температуру цилиндра  $\Theta$  примем равной средней температуре алмазного зерна  $\Theta_{cp}$ . Учтем также, что в нашем случае  $l = 2r$ .

Тогда

$$Q_0 = \frac{4\pi}{2,303 \lg 4} \cdot \Theta_{cp} \cdot r \cdot \lambda_c \text{ кал/сек}.$$

В последней формуле  $r$  выражается в см.

За время одного реза зерно отдаст в связку количество тепла  $Q = Q_0 \tau$ , что вызовет снижение температуры зерна в среднем на

$$\Delta \Theta = \frac{Q}{(c\gamma)_1 W_1},$$

где  $(c\gamma)_1$  — объемная теплоемкость алмазного зерна;

$W_1$  — его объем.

Подставляя в последнее выражение значение  $Q$ , получаем:

$$\Delta \Theta = 1,44 \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \cdot \frac{a_1 \tau}{r^2} \Theta_{cp} = 1,44 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \cdot \Theta_{cp} \cdot F_0. \quad (13)$$

В выражении (13) известны все величины, кроме средней температуры на поверхности зерна. Имея в виду приближенный характер нашего расчета, примем, что средняя температура в зерне с учетом теплоотвода в связку равна:

$$\Theta_{cp} \approx \frac{\Theta_0 + \Theta_s}{2} - \Delta \Theta,$$

где  $\Theta_0$  — рассчитанная нами ранее температура нижней (рабочей) поверхности зерна;

$\Theta_s$  — температура верхней торцевой поверхности зерна (цилиндрика).

Рассуждая аналогично тому, как мы это делали при определении  $\Theta_0$ , можно получить:

$$\Theta_s \approx \frac{bqr}{10 \lambda_1} A_s,$$

где

$$A_s = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1 - \Phi\left(\frac{2n-1}{\sqrt{F_0}}\right)}{2n-1}. \quad (14)$$

Обозначим

$$A_{cp} = \frac{A_p + A_s}{2}.$$

Тогда

$$\Theta_{cp} \approx \frac{bqr}{10 \lambda_1} A_{cp} - \Delta\Theta.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (13), получаем:

$$\Delta\Theta = 1,44 \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \left( \frac{bqr}{10 \lambda_1} A_{cp} - \Delta\Theta \right) \cdot F_0,$$

откуда

$$\Delta\Theta = \frac{1,44 \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \cdot \frac{bqr}{10 \lambda_1} \cdot A_0}{1 + 1,44 \frac{\lambda_c}{\lambda_1} F_0}, \quad (15)$$

где

$$A_0 = A_{cp} \cdot F_0. \quad (16)$$

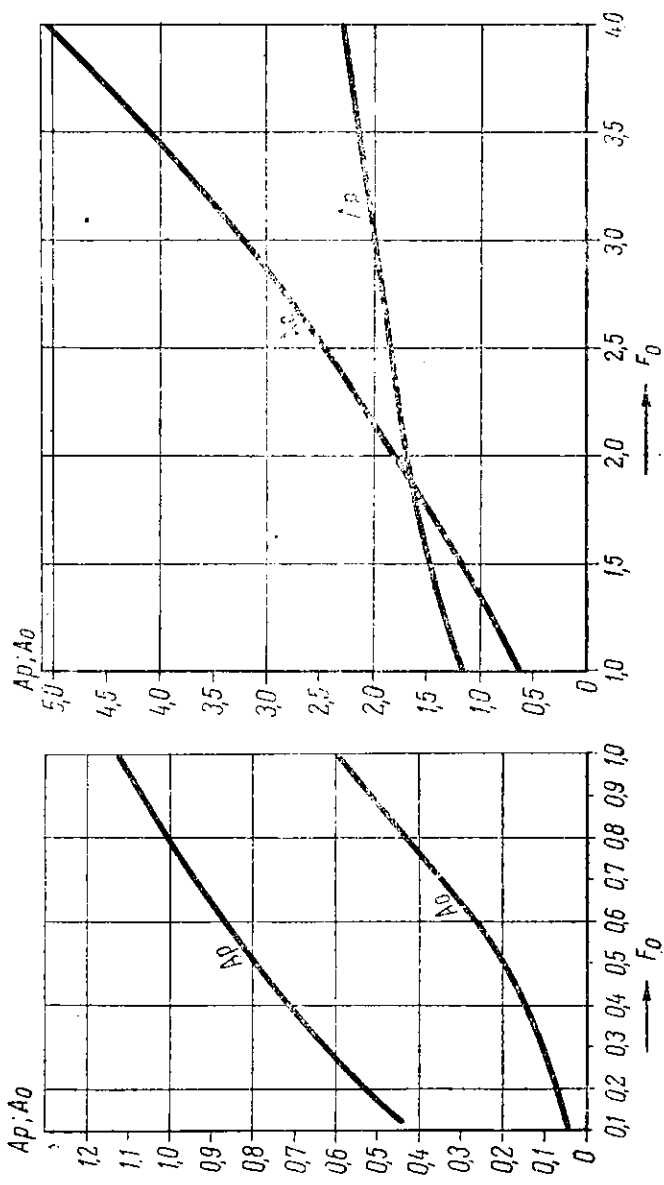
С учетом охлаждения за счет отдачи тепла в связку температуру рабочей поверхности зерна рассчитываем, связывая формулы (12) и (15):

$$\Theta_p = \Theta_0 - \Delta\Theta = \frac{bqr}{10 \lambda_1} \left( A_p - \frac{1,44 \lambda_c A_0}{\lambda_1 + 1,44 \lambda_c F_0} \right). \quad (17)$$

На фиг. 9 приведены графики для функций  $A_p$  и  $A_0$ , входящих в формулы для расчета температуры рабочей поверхности зерна.

Кроме функций  $A_p$  и  $A_0$  необходимо знать интенсивность теплообразования  $q$  и коэффициент  $b$ , характеризующий долю тепла, входящего в зерно.

Начнем с последнего. Для установления баланса тепла между двумя телами — движущимся и неподвижным, в настоящее время



Фиг. 9. Графики функций  $A_p$  и  $A_o$ , используемых для расчета температуры в отдельном алмазном зерне.

используют метод, предложенный Д. К. Иегером [12] — сравнение температур контактной площадки, рассчитанных со стороны каждого из тел.

Применим аналогичный метод для решения нашей задачи. Определим температуру центральной точки площадки контакта между движущимся зерном и поверхностью шлифуемого изделия. Как мы условились выше, зерно имеет форму цилиндра, следовательно, площадка контакта ограничена окружностью диаметром  $2r$ . Для определения температуры в центре плоского источника круговой формы, быстро движущегося по полупространству, в литературе [7] приводится формула

$$\Theta(0) = \frac{Q_u}{\pi \lambda_u r},$$

где  $Q_u$  — количество тепла, поступающего в тело в единицу времени;

$\lambda_u$  — коэффициент теплопроводности этого тела.

В нашем случае

$$Q_u = (1 - b) q \cdot \pi r^2.$$

В обе формулы  $r$  входит в сантиметрах. Переходя к  $r$  мм, получаем

$$\Theta(0) = \frac{(1 - b) q r}{10 \lambda_u}. \quad (18)$$

Теперь приравняем друг другу выражения (17) и (18), предполагая, что температура в центре контактной площадки будет одинаковой как для зерна, так и для шлифуемого изделия. Из сравнения путем элементарных преобразований получаем:

$$b = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_u}{\lambda_1} \left( A_p - \frac{1,44 \lambda_c A_0}{\lambda_1 + 1,44 \lambda_c F_0} \right)}. \quad (19)$$

Как видно из последней формулы, доля тепла, передаваемого зерну, тем больше, чем меньше теплопроводность шлифуемого изделия  $\lambda_u$ . Изменение коэффициента теплопроводности связки  $\lambda_c$  также приводит к изменению доли тепла в круге.

Рассмотрим далее вопрос об интенсивности теплообразования на рабочей площадке каждого алмазного зерна  $q$ . Последняя может быть рассчитана, если известна общая тепловая энергия процесса и количество рабочих зерен, на которые она распределяется.

Целый ряд исследований показывает, что при процессах, связанных с интенсивным деформированием материала, к которым относится и резание (шлифование), механическая энергия, израсходованная на выполнение той или иной операции, полностью превращается в теплоту.

Пусть нам известна окружная сила  $P_z$ , возникающая в процессе шлифования (фиг. 10). Если одновременно на площадке контак-

та работает  $n$  зерен, то на каждое рабочее зерно приходится в среднем окружная сила

$$p = \frac{P_z}{n}. \quad (20)$$

Каждое зерно на длине контакта между кругом и изделием совершает работу

$$A = p \cdot B. \quad (21)$$

Предполагая, что эта механическая энергия полностью превращается в тепловую, рассчитываем тепло, выделяющееся на рабочей поверхности алмазного зерна за один рез.

$$Q = \frac{pB}{I}, \quad (22)$$

где  $I$  — механический эквивалент тепла ( $I=427$  кгм/ккал).

Далее определяем интенсивность теплообразования  $q$  кал/см<sup>2</sup>.сек по формуле

$$q = \frac{Q}{\pi r^2 \tau}, \quad (23)$$

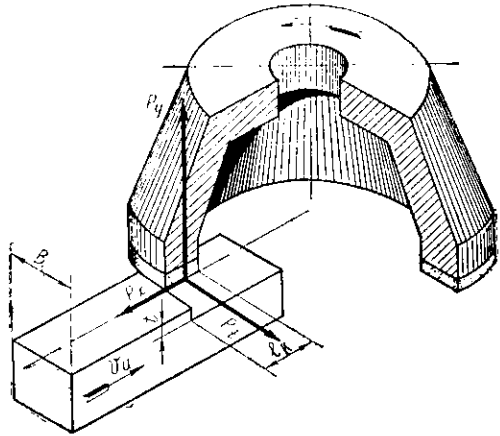
где  $\tau$  — время перемещения алмазного зерна по изделию за один рез, равное  $\frac{B}{v}$ ;  $v$  м/сек;  $r$  см.

Чтобы окончательно расшифровать значение  $q$ , необходимо знать количество зерен  $n$ , работающих одновременно на площадке контакта между кругом и изделием. К решению этого вопроса подойдем, предполагая, что в среднем объем всех зерен одинаков и равен  $W_1 = 2\pi r^3$  мм<sup>3</sup>. Объем алмазов в каждом кубическом миллиметре алмазоносного слоя определяется концентрацией  $K$  и оказывается равным:

$$W = 0,25 \cdot \frac{K}{100} \text{ мм}^3.$$

Следовательно, в одном кубическом миллиметре круга имеется зерен

$$n_1 = \frac{W}{W_1} = \frac{K}{2510 r^3}.$$



Фиг. 10. Схема процесса плоского шлифования торием алмазного круга.

На каждый погонный миллиметр круга приходится

$$n' = \frac{1}{13,6r} \sqrt[3]{K} \text{ зерен,}$$

а на площадку  $B \times l_k$  (фиг. 10):

$$n_0 = \frac{\sqrt[3]{K^2}}{184,7} \cdot \frac{Bl_k}{r^2}.$$

Целый ряд исследований [13, 14] показывает, что в работе участвуют не все зерна  $n_0$  как вследствие выкрашивания разновысотности их расположения так и ввиду того, что часть зерен попадает в след впереди идущих.

Поэтому на площадке  $B \times l_k$  одновременно работают

$$n = mn_0 = m \frac{\sqrt[3]{K^2}}{184,7} \cdot \frac{Bl_k}{r^2} \text{ зерен.} \quad (24)$$

В различных литературных источниках [13, 14] приведены величины  $m$ , значительно отличающиеся друг от друга. По-видимому, коэффициент  $m$ , определяющий соотношение между фактически работающим и расчетным количеством зерен на площадке контакта между кругом и изделием не может быть одним и тем же в различных условиях шлифования. Дело в том, что количество фактически работающих зерен зависит от свойств связки, ее способности удерживать зерна, а также от режима резания, поскольку последний влияет на процесс самозатачивания круга. Поэтому, например, увеличение скорости круга  $v$  и скорости перемещения изделия  $v_u$  должно вызывать уменьшение  $m$ , а повышение прочности связки — увеличение этого коэффициента. Выяснение значения величин  $m$  и их связи с элементами режима работы и свойствами круга представляет, с нашей точки зрения, интересную задачу для исследователей, изучающих процесс алмазного шлифования.

Используя формулы (20) — (24) и приводя все величины к применяемым на практике размерностям  $P_z$  кГ;  $v$  м/сек;  $r$  мм;  $B$  мм;  $l_k$  мм, получаем:

$$q = 137,6 \cdot 10^2 \frac{P_z v}{mK^{\frac{2}{3}} Bl_k} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек.} \quad (25)$$

Объединяя выражения (17), (19) и (25), получим формулу для расчета температуры на рабочей поверхности зерна:

$$\Theta_p = 1376 \cdot \frac{A}{\lambda_1 + \lambda_u A} \cdot \frac{P_z v}{Bl_k} \cdot \frac{r}{mK^{\frac{2}{3}}}, \quad (26)$$

где

$$A = A_p - \frac{1,44 \lambda_c A_0}{\lambda_1 + 1,44 \lambda_c F_0}. \quad (27)$$



Если положить в соответствии с табл. 1 коэффициент теплопроводности алмаза  $\lambda_1 = 0,35$  кал/см. сек. град., то

$$\Theta_p = 1376 \frac{A}{0,35 + \lambda_u A} \cdot \frac{P_z''}{Bl_k} \cdot \frac{r}{mK^{2,3}} \quad (28)$$

и

$$A = A_p = \frac{4,12\lambda_c A_0}{1 + 4,12\lambda_c F_0} \quad (29)$$

Покажем пример расчета по формуле (28). В процессе плоского шлифования пластин из твердого сплава ВК8 шириной  $B = 12$  мм и длиной  $L = 8$  мм торцом алмазного круга АЧК 125×10×3—АС25—Б1—50—24 со скоростью шлифования  $v \approx 26$  м/сек при некотором режиме резания (скорость изделия  $v_u = 2,5$  м/мин и глубина резания  $t = 0,03$  мм) окружная сила составляет  $P_u = 9,85$  кг. Определим температуру  $\Theta_p$ , возникающую в этом случае. Из маркировки круга видно, что размер его зерна составляет  $2r = 0,25$  мм, а концентрация алмазов  $K = 50\%$ . Определим, пользуясь формулой (10) и таблицей 1, критерий Фурье:

$$F_0 = \frac{0,83 \cdot 12}{10 \cdot 26 \cdot 0,125^2} = 2,45.$$

По графику на фиг. 9 получаем:

$$A_p = 1,79 \text{ и } A_0 = 2,41.$$

Коэффициент теплопроводности изделия  $\lambda_u = 0,14$  кал/см. сек. град. Поскольку обрабатываемая пластина имеет длину  $L = 8$  мм меньшую, чем ширина алмазонасного кольца круга (в соответствии с маркировкой последняя равна 10 мм), длина площадки контакта между кругом и изделием  $l_z = L = 8$  мм. Примем, что коэффициент теплопроводности круга с бакелитовой связкой  $\lambda_c = 0,02$  кал/см. сек. град. Ориентируясь на исследования проф. С. С. Редько [14], положим  $m \approx 0,12$ . Тогда по формуле (29) получаем:

$$A = 1,79 = \frac{4,12 \cdot 0,02 \cdot 2,41}{1 + 4,12 \cdot 0,02 \cdot 2,45} \approx 1,62$$

и далее по (28):

$$\Theta_p = 1376 \frac{1,62}{0,35 + 0,14 \cdot 1,62} \cdot \frac{9,85 \cdot 26}{12 \cdot 8} \cdot \frac{0,125}{0,12 \cdot 50^{2/3}} \approx 790^\circ.$$

Интересно отметить, что при аналогичных условиях алмазного шлифования с помощью закладной термомарки на поверхности шлифуемого изделия зарегистрирована наибольшая температура  $725^\circ$ . Такая близость результатов расчета и эксперимента является, конечно, случайной как в силу недостатков, свойственных расчету, в основе которого лежит целый ряд допущений, так и в силу погрешностей, свойственных эксперименту, тем более что последний скорее всего регистрировал некоторую температуру, отличную от температуры рабочей площадки отдельно взятого зерна.

Однако общий порядок величин, которые можно получить по формуле (28), по-видимому, соответствует порядку реально существующих температур.

Это значит, что формула (28) может служить в первом приближении для оценки условий шлифования с точки зрения обеспечения безопасных температур на алмазном зерне.

С помощью такой оценки можно, например, корректировать режимы работы кругов. Пусть в условиях предыдущего примера мы пожелаем из каких-либо соображений увеличить скорость продольного движения стола  $v_u$  до 5 м/мин. Как будет показано ниже, при шлифовании сплава ВК8 для силы  $P_z$  справедлива формула

$$P_z = c \cdot t^{0,91} \cdot v_u^{0,43}.$$

Следовательно,

$$\frac{P_z'}{P_z''} = \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{0,91} \cdot \left( \frac{v_u'}{v_u''} \right)^{0,43}. \quad (30)$$

Поскольку глубина резания (подача на двойной ход) не меняется, то

$$P_z'' = \left( \frac{v_u''}{v_u'} \right)^{0,43} \cdot P_z' = 2^{0,43} \cdot 9,85 = 13,3 \text{ кГ}.$$

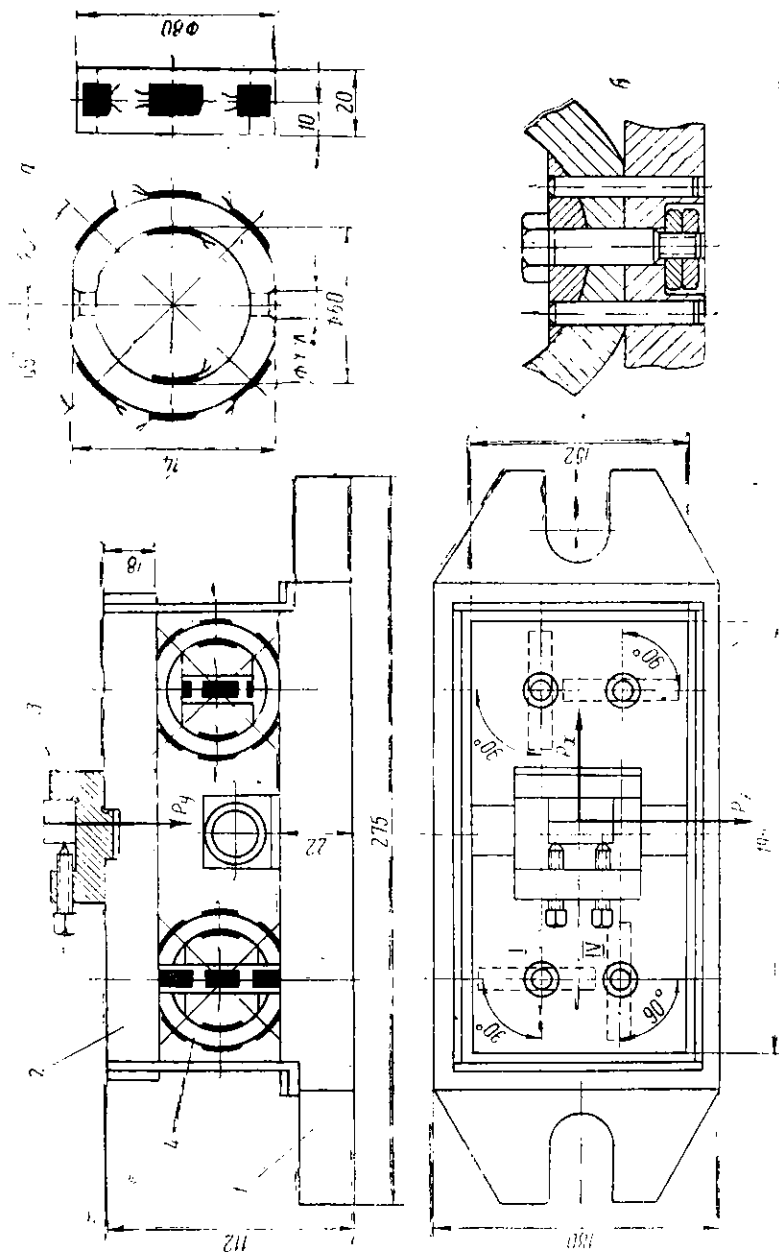
Увеличение  $P_z$  вызовет, как это следует из (28), пропорциональное повышение температуры на рабочей поверхности зерна. Эта температура достигнет  $\Theta_p' = 1050^\circ$ , то есть будет совершенно неприемлемой для алмазного инструмента. Алмазный круг будет интенсивно разрушаться. Предположим, желательнее по каким-либо соображениям работать со скоростью продольного хода  $v_u = 5$  м/мин. Чтобы не превышать предельную для зерна температуру  $800^\circ$ , надо, в соответствии с (30), в условиях нашего примера уменьшить глубину резания исходя из соотношения:

$$\left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{0,91} = \frac{\Theta_p'}{\Theta_{\max}} = \frac{1050}{800} = 1,31,$$

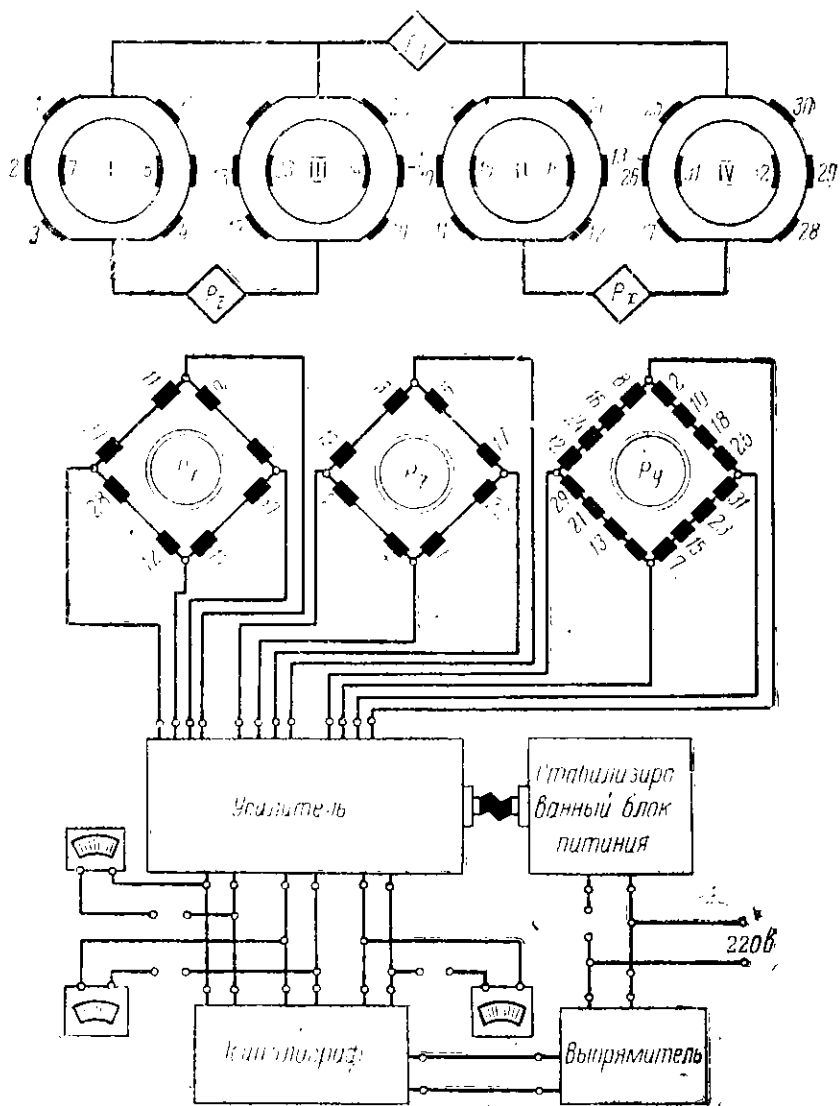
то есть перейти от  $t_1 = 0,03$  мм к глубине резания  $t_2 \leq 0,022$  мм.

Приведенный выше пример показывает, что режимы резания при алмазном шлифовании не могут избираться только по технологическим соображениям (чистота поверхности, точность и т. д.), они должны проверяться на рабочую температуру алмазного круга.

Для такой проверки, как это видно из изложенного, необходимы данные о силах резания, возникающих при алмазной обработке. Таких данных в справочной литературе еще очень мало, поскольку сами процессы алмазной обработки являются достаточно новыми для нашей промышленности. Поэтому целесообразно опыт изучения динамики и температур при алмазной обработке накапливать не только в научных учреждениях, но и в заводских технологических лабораториях. Для этой цели заводские технологические лаборатории должны иметь соответствующую аппаратуру. Хоро-



Фиг. 11. Конструкция столика к плоскошлифовальному станку для измерения сил резания при алмазном шлифовании.



Фиг. 12. Электрическая схема включения датчиков динамометра к плоскошлифовальному станку.

шо зарекомендовали себя измерительные столики к плоскошлифовальным станкам, работающие на тензодатчиках. Конструкция динамометрического столика к плоскошлифовальному станку приведена на фиг. 11.

Нижняя плита 1 динамометра неподвижно укрепляется на столе станка. На верхней плите 2 установлено то или иное устройство для зажатия шлифуемого изделия, например, тисочки 3. Обе плиты связаны между собой кольцами 4, представляющими упругие элементы. Кольца 4 крепятся к каждой из плит болтами и шпильками, как показано на фиг. 11,б. Упругих колец четыре, они размещены так, как показано в нижней проекции фиг. 11. На каждое из колец, размеры которых приведены на фиг. 11,а, наклеены восемь тензодатчиков, позволяющих регистрировать усилия шлифования. На фиг. 12 датчики перенумерованы. Здесь же показано, как воспринимаются три составляющих усилия шлифования:  $P_z$ ;  $P_y$  и  $P_x$  (фиг. 10). Сила  $P_z$  воспринимается кольцами I и III, сила  $P_x$  — кольцами II и IV, а сила  $P_y$  — всеми четырьмя кольцами.

Работоспособность прибора и отсутствие взаимовлияния сил в большой мере зависят от точности калибровки, разметки и наклейки датчиков, а также от тщательности сборки.

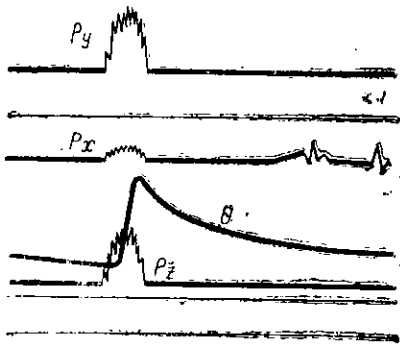
Тензодатчики сопротивлением 200 ом с базой 20 мм должны быть откалиброваны с точностью до 0,1 ома.

Датчики и кольца должны быть размечены по осям симметрии на инструментальном микроскопе. Все четыре кольца желательно изготавливать из одного куска металла (сталь 65Г). По основным размерам кольца должны отличаться друг от друга не более чем на 0,005 мм. Особое внимание следует обратить на точность взаимного расположения колец, что достигается предварительной координатной разметкой плиты и выверкой положения колец с помощью лекальных инструментов и индикаторов.

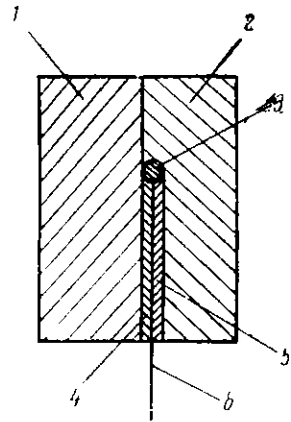
Принципиальная схема всей установки и электрическая мостиковая схема соединения датчиков показаны на фиг. 12.

Расположение датчиков на кольцах и схема их включения дают возможность производить измерение  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  компенсационным методом с исключением взаимного влияния сил друг на друга. Высокая жесткость динамометра (около 14 000 кг/мм), составляющая его весьма важное положительное свойство, связана, однако, с малыми выходными сигналами и необходимостью использования усилителя (фиг. 12). Последний питается через стабилизированный блок от сети переменного тока 220 в. Усиленные сигналы могут быть восприняты регистрирующими приборами или осциллографом.

На фиг. 13 приведен образец осциллограммы, полученной при шлифовании твердого сплава торцом алмазного чашечного круга. Кроме сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  на осциллограмме видна запись температуры  $\Theta$ , возникающей в процессе шлифования. Чтобы записать температуры в процессе алмазного шлифования, можно использо-



Фиг. 13. Образец осциллограммы, полученной с помощью тензометрического столика при плоском шлифовании.



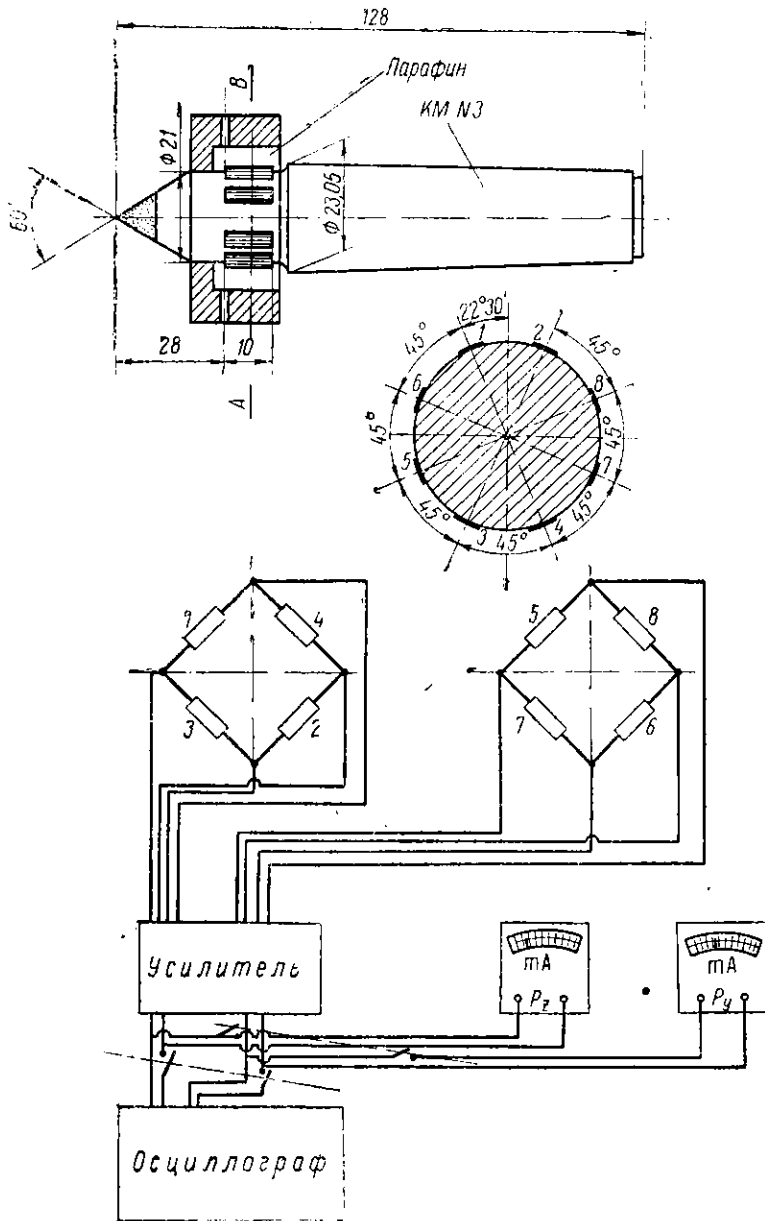
Фиг. 14. Схема установки термодпары для измерения закона распределения температур по толщине пластины при плоском алмазном шлифовании:

1—2 — пластины, пришлифованные друг к другу, 3—голова термодпары, 4—5—тонкие направляющие пластины, 6 — один из двух проводников термодпары.

вать искусственную термодпару (например, хромель-копель) с возможно более малым диаметром проводников. Спай термодпары заземляется между двумя твердосплавными пластинками через весьма тонкие слюдяные пластинки, как это показано на фиг. 14. По мере сошлифовывания материала пластины, а далее и шарика (спая) термодпары на осциллограммах получают записи, характеризующие закон распределения температур по толщине пластины, вплоть до температуры обрабатываемой поверхности.

Для измерения усилий при круглом наружном шлифовании алмазными кругами может быть использован измерительный задний центр (фиг. 15). Обрабатываемое изделие закрепляется на жесткой оправке, которая вращается в неподвижных центрах — переднем обычном и заднем — измерительном. Измеряются две составляющие усилия резания — окружная  $P_z$  и радиальная  $P_y$ . Эти силы, воздействуя на задний центр, вызывают изгиб последнего в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Деформации центра воспринимаются восемью тензодатчиками (№ 1—8, фиг. 15) с базой 10 мм и сопротивлением 200 ом. Схема включения датчиков, приведенная на фиг. 15, исключает взаимовлияние сил. Каждые четыре датчика образуют измерительный мост. Ток с диагонали моста попадает в усилитель и далее на шлейфы осциллографа или стрелочные приборы.

При использовании динамометрического центра следует особое внимание обращать на состояние центровых отверстий оправки, расположение поводка, передающего вращение от планшайбы к изделию, и обеспечение надлежащего осевого давления центра. Если шлифуется изделие большой ширины, то необходимо использо-

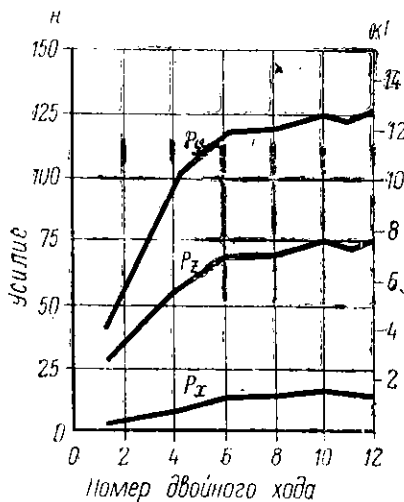


Фиг. 15. Динамометрический задний центр к круглошлифовальному станку и его электрическая схема.

вать два меридиальных центра - передний и задний. Погрешности измерения при этом, однако, возрастают.

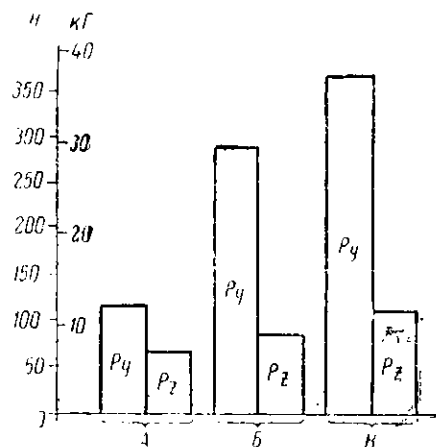
Рассмотрим некоторые данные по измерению усилий при алмазном шлифовании твердых сплавов.

В научно-производственной инструментальной лаборатории (ИПИЛ) Куйбышевского политехнического института и Средне-Волжского СХУ Ю. И. Ивановым и И. И. Гугля измерялись усилия при плоском шлифовании твердых сплавов торцом алмазного круга. На фиг. 16 показано, как меняются силы  $P_x$ ,  $P_y$ , и  $P_z$  в зави-



Фиг. 16. Зависимость сил  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от номера двойного хода при плоском шлифовании пластины ВК8 ( $B \times l_k = 12 \times 8 \text{ мм}^2$ );  $v = 26 \text{ м/сек}$ ;  $v_u = 2,5 \text{ м/мин}$ ;  $t = 0,02 \text{ мм}$ .

Круг АЧК 125  $\times$  10  $\times$  3 — АС25-Б1-50-24. Слева — шкала в ньютонах (н), справа — в килограммах (кг).



Фиг. 17. Сопоставление сил, возникающих при шлифовании твердых сплавов алмазным кругом АС25-Б1-50 и кругами из зеленого карборунда КЗ40СМ1К.

А — алмазное шлифование; Б — абразивное при упругом закреплении изделия; В — абразивное при жестком закреплении изделия.

симости от порядкового номера двойного хода стола. Видно, что все три составляющие усилия шлифования резко возрастают от первого к шестому ходу, в связи с тем, что на этих ходах выбираются зазоры в системе станок—инструмент—изделие. Далее процесс стабилизируется и силы  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  возрастают медленно. Как следует из результатов эксперимента, при алмазном шлифовании торцом круга наибольшую величину имеет сила  $P_y$  (фиг. 10), за нею следуют силы  $P_z$  и  $P_x$ . Последняя вообще очень мала и практического значения не имеет.

Интересно сопоставить силы, возникающие при алмазном и абразивном процессах шлифования. Целесообразно проводить сравнение при условии равной производительности обоих процессов, а не при одинаковых режимах работы, так как последнее сопостав-



ление не имеет практического смысла. На фиг. 17 сопоставлены силы  $P_y$  и  $P_z$ , возникающие при шлифовании твердого сплава ВК8 кругом из зеленого карборунда КЗ40СМ1К и алмазным кругом АЧК 125×10×3—АС25-Б1-50-24. Шлифование кругом КЗ проводилось при  $v=22$  м/сек,  $v_u=2,5$  м/мин в двух вариантах закрепления изделия — жестком и упругом.

Как известно, упругое закрепление твердых сплавов при шлифовании снижает трещинообразование и повышает качество изделий [15]. При жестком закреплении круг подавался на  $t=0,04$  мм, а при упругом — на  $t=0,07$  мм. Алмазная обработка проводилась при  $v=26$  м/сек,  $v_u=2,5$  м/мин,  $t=0,02$  мм. Производительность во всех трех случаях находилась в пределах  $Q=13,3\div 14$  мм<sup>3</sup>/мин, несмотря на то, что кругу КЗ сообщались глубины резания  $t$  (вертикальные подачи) в 2–3,5 раза большие, чем алмазному кругу. Дело в том, что вследствие отжатия и износа круга фактические съемы кругом КЗ оказывались на уровне съемов твердого сплава, осуществляемых алмазным кругом.

Несмотря на равенство фактических съемов, усилия резания при работе кругами КЗ, как это видно из фиг. 17, оказываются больше в 1,26–1,63 раза по  $P_z$  и в 2,4–3,06 раза по  $P_y$  чем при шлифовании алмазным инструментом. Следствием такого различия в силах является различие в температурах на шлифуемой поверхности. При переходе от круга АС25 к упругому или жесткому шлифованию кругом КЗ температура возрастает с 500 до 580 и 730°С. Надо также иметь в виду, что при алмазной обработке чистота и качество шлифованной поверхности оказываются значительно более высокими.

В рассматриваемой работе получены следующие формулы для сил  $P_z$  и  $P_y$  (размеры шлифуемой поверхности 12×8 мм<sup>2</sup>, круг АЧК 125×10×3—АС25-Б1-50-24):

а) при обработке сплава ВК8:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= c_1 \cdot t^{0,91} \cdot v_u^{0,43} \cdot v^{-0,735} \\ P_y &= c_2 \cdot t^{1,165} \cdot v_u^{0,57} \cdot v^{-0,835} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

б) при обработке сплава Т14К8:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= c_3 \cdot t^{0,955} \cdot v_u^{0,326} \cdot v^{-1,14} \\ P_y &= c_4 \cdot t^{1,02} \cdot v_u^{0,46} \cdot v^{-1,31} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Значения  $c_1$ — $c_4$  приведены в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициенты в формулах (31) и (32)

Результат	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
В килограммах . . . . .	$1,8 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^4$	$0,79 \cdot 10^3$	$2,96 \cdot 10^4$
В ньютонах . . . . .	$1,765 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^5$	$0,775 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^5$

Остальные величины подставляются в (31) и (32) в следующих размерностях:

$$t \text{ мм; } v_u \text{ м/мин, } v \text{ м/сек.}$$

Приведенные выше формулы относятся к случаю шлифования твердых сплавов кругами из синтетических алмазов со сравнительно крупным зерном (АС25).

Усилия, возникающие при работе кругами из натуральных алмазов с малыми размерами зерен, изучались Р. Г. Махкамовым [16], С. А. Поповым и А. Е. Гельфандом [17, 18].

Р. Г. Махкамов обрабатывал пластины из твердого сплава Т15К6 с размерами шлифуемой поверхности  $7 \times 22 \text{ мм}^2$ . Алмазный плоский прямой круг зернистостью А8 на органической связке имел концентрацию 50% и ширину алмазоносного слоя 10 мм. Скорость круга составляла 22 м/сек. Для этих условий обработки получена формула

$$P_z = c \cdot t^{1,24} \cdot v_u^{0,82}. \quad (33)$$

Установлено, что при алмазном шлифовании составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_v$  в 5—7 раз меньше, чем для случая шлифования кругами из КЗ12СМ1.

Исследованием, выполненным А. Е. Гельфандом под руководством С. А. Попова (НИИалмаз, МВТУ, МКТС), установлено, что при обработке твердого сплава ВК20 кругами на металлической связке окружную силу можно рассчитывать по формуле:

$$P_z = 63,5 \cdot K_0 \cdot t^{0,8} \cdot v_u^{0,6} \cdot s_{\text{поп}}^{0,9} \text{ кг}, \quad (34)$$

где  $K_0$  — коэффициент, учитывающий влияние зернистости круга;

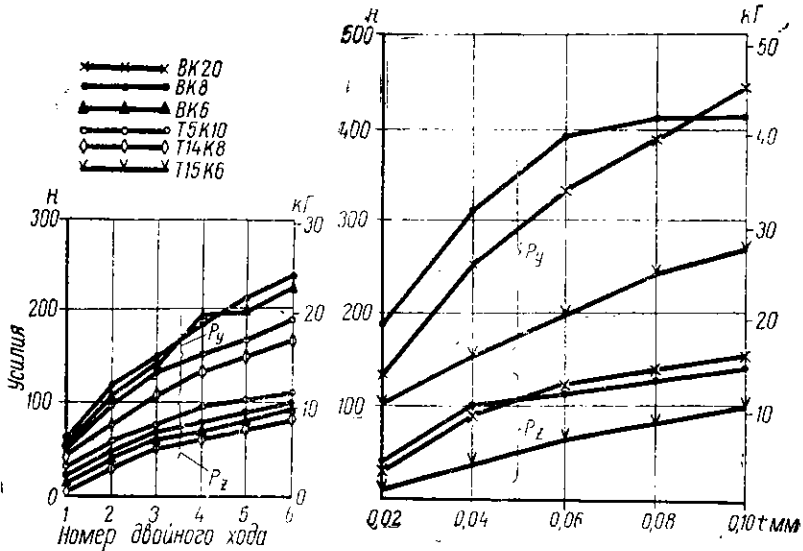
$s_{\text{поп}}$  — поперечная подача круга ( $s_{\text{поп}} > 0,8 \text{ мм/проход}$ ).

Из графиков, приведенных в работе [18], можно заключить, что  $K_0 \approx 1$  при зернистости свыше А10 и увеличивается до  $K_0 = 15$  при переходе от А10 к А6. Следовательно, при снятии одного и того же припуска в единицу времени большие усилия возникают при работе кругами с более мелким зерном. Значит, без особой нужды нет необходимости работать весьма мелкозернистыми кругами, а там, где это допускается технологическими требованиями, стремиться применять круги с более крупным зерном.

Рассмотрение формул (29)—(32) позволяет установить влияние каждого из элементов режима резания на динамику процесса алмазного шлифования. Наибольшее влияние оказывает глубина резания  $t$ . Ее воздействие аналогично влиянию глубины в других процессах резания. Изменение глубины резания сильнее отражается на составляющей  $P_v$ , чем на  $P_z$  что также вполне закономерно. Продольная подача (скорость изделия)  $v_u$  определяет нагрузку, приходящуюся на каждый режущий элемент круга. Чем больше  $v_u$ , тем сильнее нагружены режущие зерна, тем больше силы резания. Наоборот, с увеличением скорости круга  $v$  нагрузка на каждое ал-

мазное зерно снижается, так как с увеличением  $v$  возрастает количество зерен, срезающих материал изделия в единицу времени.

Усилия при алмазном шлифовании зависят не только от элементов режима резания и зернистости круга. Значительное влия-



Фиг. 18. Влияние обрабатываемого материала на усилия при алмазном шлифовании.

Слева — шлифование торцом круга АЧК  $125 \times 10 \times 3$  — АС25-Б1-50-24,  $v = 26$  м/сек;  $v_n = 2,5$  м/мин;  $t = 0,03$  мм; справа — шлифование периферией круга, зернистость А10, связка металлическая,  $K = 1000/\rho$ ,  $v = 30$  м/сек,  $v_n = 3$  м/мин.

ние на  $P_z$  и  $P_y$  оказывает материал твердого сплава, обрабатываемого шлифованием. Это видно как из табл. 6, так и из графиков, на которых приведены данные НПИЛ (фиг. 18, слева) и С. А. Попова и А. Е. Гельфанда [17] (фиг. 18, справа). Как следует из этих графиков, твердые сплавы можно в первом приближении расположить по возникающим силам примерно в таком порядке:

Марка сплава	ВК20	Т15К10	ВК8	ВК6	Т14К8	Т15К6
$K_{Pz}$	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9	0,5

Под каждой маркой сплава указан коэффициент  $K_{Pz}$ , характеризующий ориентировочное изменение силы  $P_z$  при переходе к данному сплаву от сплава ВК8. Как видно, изменение силы следует примерно за изменением количества кобальта в твердом сплаве. Это свидетельствует о том, что значительное влияние на усилия

шлифования оказывает вязкость сплава. Более хрупкие сплавы разрушаются легче, чем более вязкие, следовательно, и силы здесь возникают меньшие.

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУГА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, ЭКОНОМИЧНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

С точки зрения интересов производства процесс алмазного шлифования определяется рядом основных показателей. Одним из важнейших является объемная производительность  $Q$  мм<sup>3</sup>/мин, характеризующая съем обрабатываемого материала в единицу времени. Вторым важным показателем является экономичность процесса. Последняя связана с работоспособностью алмазного инструмента  $P$  кг/сч, то есть массой обрабатываемого материала, который может быть сошлифован при израсходовании одного карата алмазов. Если известна минутная производительность  $Q$ , машинное время работы алмазного инструмента  $\tau_m$  мин, а также тем, или иным путем установлено израсходованное за это время количество алмазов  $\Delta A$  (см. выше, стр. 22), то

$$P = \frac{Q \tau_m \gamma_0}{\Delta A} \cdot 10^{-6} \text{ кг/сч}, \quad (35)$$

где  $\gamma_0$  — плотность шлифуемого материала, г/см<sup>3</sup>,  
 $\Delta A$  — вес алмаза в каратах.

Для сопоставления процессов шлифования различных обрабатываемых материалов определение работоспособности в кг/сч может оказаться неудобным, так как эти материалы имеют различную плотность. В этом случае работоспособность алмазного инструмента можно охарактеризовать величиной

$$P_v = \frac{Q \tau_m}{\Delta A} \text{ мм}^3/\text{сч}, \quad (36)$$

то есть определять работоспособность по объему материала, сошлифованного при израсходовании одного карата алмаза. Нетрудно заметить, что

$$P_v = 10^6 \frac{P}{\gamma_0}. \quad (37)$$

Величину, обратную работоспособности, принято называть удельным расходом алмаза и выражать в миллиграммах алмаза, израсходованных на съем одного грамма обрабатываемого материала

$$q = \frac{\Delta A'}{Q \tau_m} \cdot 10^6 \text{ мг/г}. \quad (38)$$

В последней формуле  $\Delta A'$  — вес алмазов в граммах, израсходованных за время  $\tau_m$  мин. (см. табл. 5, стр. 22). Удобна для практических расчетов формула

$$q \text{ мг/г} = \frac{0,2}{P} \frac{\text{кг/сч}}{\text{кг/сч}},$$

связывающая весовой удельный расход с работоспособностью алмазного круга.

Для сопоставления удельного расхода алмазов при обработке материалов различной плотности целесообразно рассчитывать величину

$$q_n = \frac{\Delta A'}{Q \tau_m} \cdot 10^3 \text{ мг/мм}^3, \quad (39)$$

в которую расход алмазов  $\Delta A'$  по-прежнему подставляется в граммах.

Работоспособность или удельный расход алмазов входят составной частью в формулы для определения себестоимости алмазного шлифования. В самом деле, расходы на операцию  $M$  состоят из двух основных статей: зарплаты станочника  $M_1$  и расходов на амортизацию инструмента  $M_2$ :

$$M = M_1 + M_2.$$

В свою очередь

$$M_1 = \tau_{шт} \cdot c,$$

где  $\tau_{шт}$  — штучное время, мин.,

$c$  — минутная зарплата станочника, руб/мин.

Если выделим из штучного времени  $\tau_{шт}$  машинное  $\tau_m$ , то можем написать:

$$M_1 = \left( \frac{V_{шт}}{Q} + \tau_0 \right) c,$$

где  $V_{шт}$  — объем материала в  $\text{мм}^3$ , подлежащий удалению для получения изделия;

$Q$  — минутная производительность обработки,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ ;

$\tau_0$  — затраты времени, не относящиеся к машинному.

Амортизационные расходы  $M_2$  можем представить в виде:

$$M_2 = \frac{V_{шт}}{P_n} \cdot b_0,$$

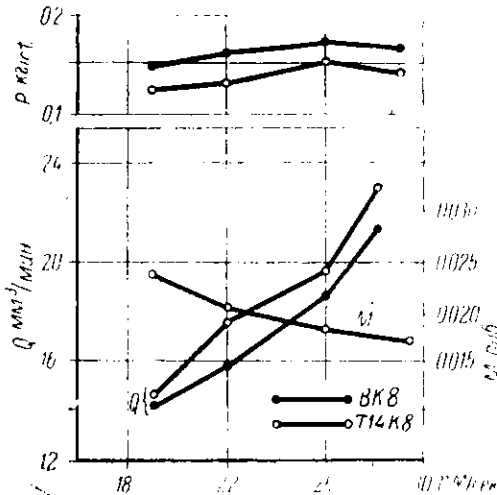
где  $b_0$  — стоимость одного карата алмаза в круге (см. табл. 4, стр. 20).

Итак

$$M = \left( \frac{V_{шт}}{Q} + \tau_0 \right) c + c \frac{V_{шт}}{P_n} \cdot b_0 \text{ руб./изделие.} \quad (40)$$

Как видно из последней формулы, производительность и работоспособность алмазного инструмента оказывают непосредственное влияние на экономические показатели процесса. В свою очередь,  $Q$  и  $P$ , в каждом конкретном случае связаны с применяемыми режимами резания и характеристикой алмазного инструмента. От этих же параметров зависят и технологические показатели процесса, в первую очередь, чистота и качество обработанной поверхности. Поэтому выбор характеристики круга и назначение режима резания должны производиться не произвольно, а с учетом их влияния на экономические и технологические показатели процесса алмазной обработки.

Рассмотрим первоначально влияние на упомянутые показатели элементов режима алмазного шлифования применительно к обработке твердых сплавов. С увеличением скорости вращения круга  $v$  (фиг. 19) производи-



Фиг. 19. Влияние скорости вращения алмазного круга  $v$  на производительность  $Q$ , работоспособность  $P$ , удельный расход  $q$  алмазного круга и себестоимость операции  $M$ . Плоское шлифование торцом круга АС25, связка Б1, концентрация 50%;  $v_{ш} = 2,5$  м/мин;  $t = 0,03$  мм, размеры обрабатываемой поверхности пластин  $12 \times 8$  мм<sup>2</sup>.

тельность процесса возрастает почти линейно. Однако работоспособность инструмента имеет некоторый сравнительно вялый максимум, так как темп износа инструмента опережает темп роста производительности алмазного круга. Это, по-видимому, объясняется прежде всего высокими температурами на режущей поверхности зерна при высоких  $v$ .

Результаты экспериментов по определению наибольшей температуры на поверхности контакта между изделием и кругом в зависимости от скорости вращения последнего приведены на фиг. 20. Как видно, при скоростях  $v > 26$  м/сек температура

при обработке сплава ВК8 приближается к опасным для алмаза значениям, что вызывает небольшое падение работоспособности круга (фиг. 19).

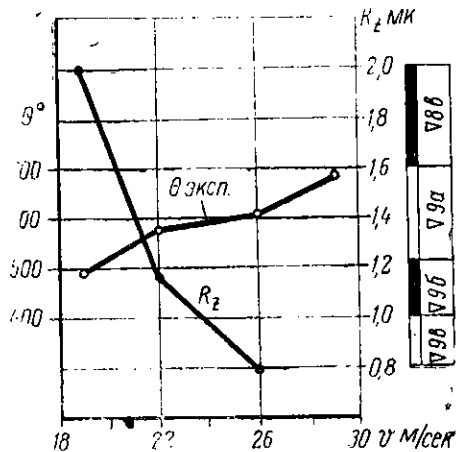
Оценим экономичность работы и выберем скорость вращения круга в конкретных условиях, воспользовавшись изложенной выше методикой расчета. Пусть, например, необходимо с пластины Т14К8 удалить алмазным шлифованием объем  $V_{шт} = 30$  мм<sup>3</sup>. Пола-

гая время, не связанное с машинным (закрепление и снятие изделия и т. д.)  $t_0 = 0,1$  мин., минутную зарплату рабочего  $c = 0,008$  руб./мин. и стоимость одного карата алмаза в круге  $b_0 = 2,1$  руб. (табл. 4), пишем по формуле (37):

$$M = \frac{0,24}{Q} + \frac{72}{P_v} + 0,0008 \text{ руб./изделие.}$$

Пользуясь выражением (37) и данными фиг. 19, можем построить кривую для себестоимости операции  $M$  в зависимости от скорости вращения круга. Как видно, несмотря на некоторое снижение работоспособности, повышение скорости круга (в условиях примера) экономически оправдано. Оно тем более целесообразно, что чистота обработанной поверхности (фиг. 20) с увеличением  $v$  улучшается.

Пример, рассмотренный выше, как правило, оказывается типичным для диапазона скоростей круга до 30 м/сек. Здесь почти всегда с увеличением  $v$  показатели процесса алмазной обработки улучшаются. Более высокие скорости круга ( $v = 40 \div 45$  м/сек) не всегда целесообразны. С увеличением скорости снижается работоспособность инструмента, а чистота поверхности может и не улучшиться. Это видно из табл. 7, в которой приведены результаты испытаний по обработке резцов с пластинками из сплава Т14К8 алмазными кругами на бакелитовой связке зернистостью АС5 и концентрацией  $K = 50\%$ .



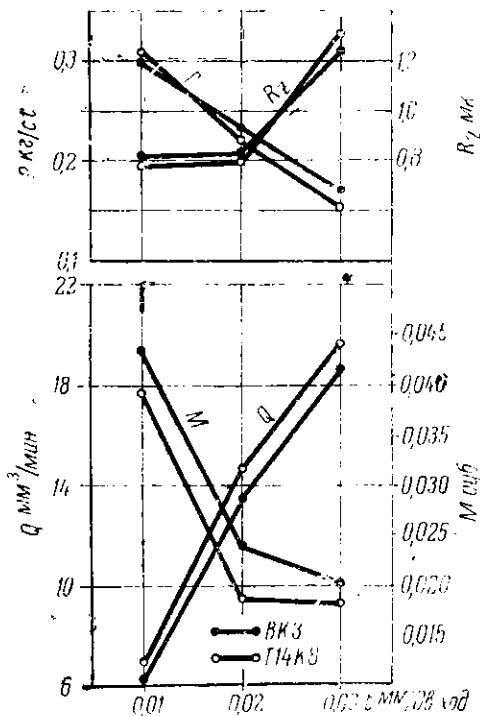
Фиг. 20. Влияние скорости вращения алмазного круга на высоту неровностей обработанной поверхности и наибольшую температуру на поверхности пластины  $\theta_{\text{эксп}}$  при шлифовании твердого сплава Т14К8. (Условия те же, что и для фиг. 19).

Таблица 7

Средняя высота неровностей и класс чистоты резцов, обработанных алмазным кругом, в зависимости от скорости вращения последнего

$v$	$R_a$ мк	Класс чистоты
28	0,96	} $\nabla 9$
36	0,92	
45	1,41	
52	1,22	

Как видно, в этих испытаниях, выполненных непосредственно в производственных условиях при работе на универсально-заточном станке, модернизированном для получения высоких скоростей вращения шпинделя, класс чистоты поверхности с увеличением  $v$  не меняется, но высота неровностей при  $v=45$  и более м/сек существенно возрастает. На высоких скоростях (6000—8000 об/мин) возникают вибрации шпиндельной группы, стола и других узлов станка, отражающиеся на чистоте поверхности. Высокие скорости вращения алмазных кругов неудобны также и тем, что при  $v > 36$  м/сек охлаждающая паста или жидкость под действием центробежных сил срываются с круга. Скорости 40—50 м/сек нежелательны с точки зрения техники безопасности, так как могут быть случаи отрыва алмазосодержащего слоя от корпуса круга.



Фиг. 21. Влияние глубины резания на производительность  $Q$ , работоспособность  $P$ , удельный расход алмазного круга  $q$ , наибольшую высоту неровностей  $R_2$  и себестоимость операции  $M$ . А

Условия те же, что и для фиг. 19, но  $v=26$  м/сек.

$\Theta_{\max} = 210^\circ$  до  $\Theta_{\max} = 720^\circ$  при переходе от  $t=0,01$  мм к  $t=0,03$  мм.

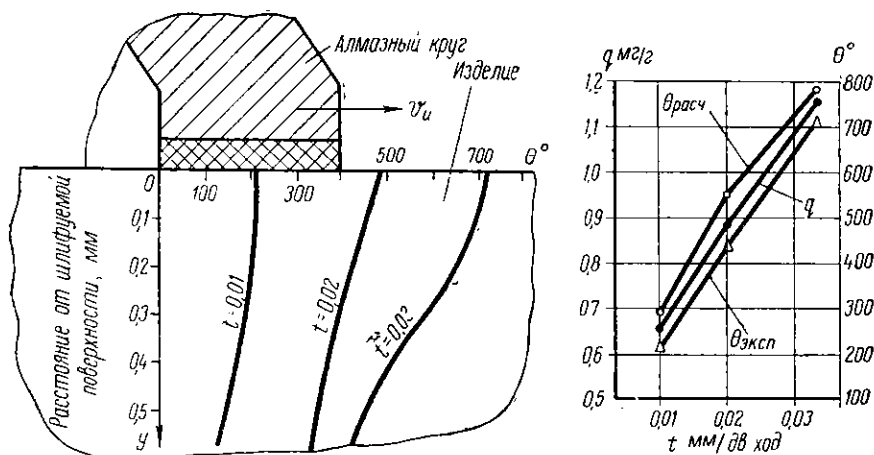
На фиг. 22 справа приведен график, где в зависимости от  $t$  даны расчетные значения температур на рабочей поверхности зерна, найденные по формуле (29). Здесь же указаны значения температур, измеренные закладной термопарой. Последние, естественно,

Таким образом, при обработке твердых сплавов целесообразно использовать скорости вращения алмазных кругов в пределах  $v = 25 \div 35$  м/сек.

Переходим к рассмотрению влияния глубины резания (вертикальной подачи на один двойной ход изделия или стола). На фиг. 21 приведены результаты исследований, относящиеся к обработке твердых сплавов BK8 и T14K8. Как видно, производительность процесса с увеличением  $t$  возрастает, однако резко снижается работоспособность круга. Это становится понятным, если обратиться к результатам исследования закона распределения температур по глубине пластины, приведенным на фиг. 22. Температура на поверхности изделия (при  $y=0$ ) возрастает от



ниже, чем расчетные, хотя бы потому, что закладная термопара регистрирует некоторую среднюю температуру малого участка поверхности обрабатываемой пластины. Бажно отметить, однако, что характер изменения  $\Theta_{расч}$  и  $\Theta_{эксп}$  от  $t$  вполне идентичен.



Фиг. 22. Слева — распределение температур по глубине шлифуемой пластины из сплава ВК8 в зависимости от глубины резания при плоском шлифовании торцом алмазного круга АС25, связка Б1, концентрация 50%:  $v = 26$  м/сек,  $v_u = 2,5$  м/мин, размеры обрабатываемой поверхности пластины  $12 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Справа — расчетные значения температур на рабочей поверхности алмазного зерна  $\Theta_{расч}$ , наибольшие измеренные температуры  $\Theta_{эксп}$  и удельный расход алмазов  $q$  для тех же условий.

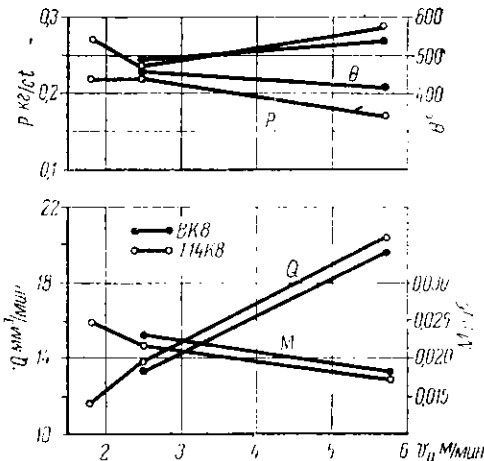
Не менее важно заметить, что удельный износ круга  $q$  мг/г строго следует за температурой, что еще раз указывает на наличие тесной связи между эксплуатационными показателями и теплофизикой процесса алмазного шлифования.

Интенсивное снижение работоспособности круга с увеличением  $t$  отражается на экономических показателях процесса. Из графиков, приведенных на фиг. 21, видно, что себестоимость операции резко снижается при увеличении  $t$  от 0,01 до 0,2 мм, а затем несущественно изменяется. Если обратить внимание также на то, что высота неровностей на обработанной поверхности с переходом в область  $t > 0,02$  мм начинает резко увеличиваться, то можно прийти к выводу, что область глубин резания, превышающих 0,02 мм, в рассматриваемых условиях нецелесообразна.

Этот результат хотя и получен нами при рассмотрении экспериментов, проведенных в конкретных условиях, согласуется с рекомендациями, приводимыми обычно в литературе [17—19]. Величина  $t = 0,02$  мм, как правило, близка к верхним пределам глубин резания, рекомендуемым для различных видов шлифования твердых сплавов алмазными кругами.

Это не значит, однако, что во всех случаях необходимо придерживаться глубины резания  $t=0,02$  мм. В зависимости от конкретных условий производства и требований к изделиям могут применяться глубины резания  $t=0,005 \div 0,02$  мм. Каждый раз, однако, особенно в условиях крупносерийного и массового производства, для установления оптимального значения  $t$  желательно проводить технико-экономический анализ, подобно тому, как это было сделано нами выше.

Продолжая рассмотрение влияния элементов режима резания на технологические и экономические показатели процесса алмазного шлифования, остановимся на влиянии скорости изделия  $v_u$ .



Фиг. 23. Влияние скорости продольной подачи изделия  $v_u$  на производительность  $Q$ , работоспособность  $P$ , температуру  $\theta$  и себестоимость шлифования  $M$ . Условия те же, что и для фиг. 19, но  $v = 26$  м/сек и  $t = 0,02$  мм.

сплавов плоским шлифованием, по-видимому, целесообразно придерживаться диапазона скоростей  $v_u = 1 \div 3$  м/мин.

При круглом шлифовании твердых сплавов скорости вращения изделия, как это рекомендуют различные авторы [18, 20], должны быть выше и находиться в пределах  $v_u = 10 \div 20$  м/мин. Возможность повышения скорости по сравнению с плоским шлифованием здесь объясняется другой технологической схемой процесса и, в частности, значительно меньшими размерами площадки контакта между алмазным кругом и изделием.

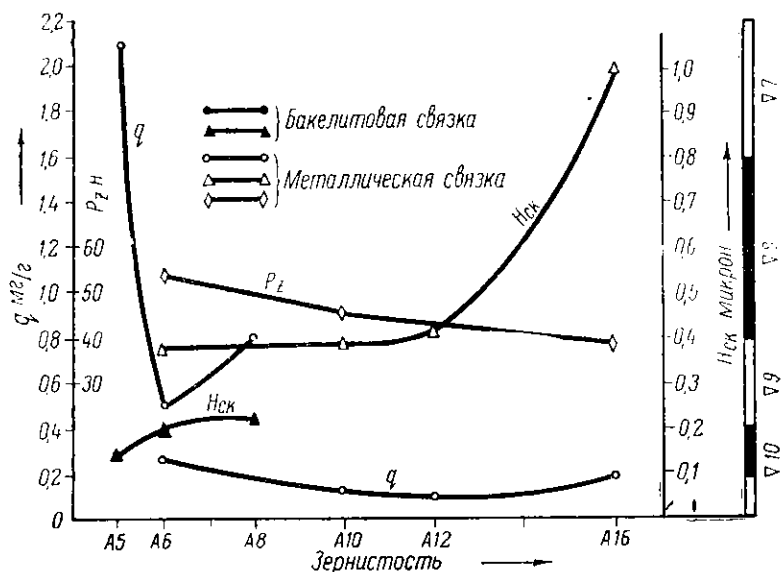
Рассмотрим далее влияние характеристики круга на технологические факторы процесса алмазного шлифования. Из свойств круга наибольшее влияние оказывают размеры зерен, концентрация алмазов и материал связки.

В НИИалмазе [21] исследовалось влияние зернистости кру-

На фиг. 23 показано изменение некоторых параметров процесса при обработке твердых сплавов торцом чашечного алмазного круга. Сравнивая линии фиг. 23 с аналогичными линиями фиг. 21—22, замечаем, что скорость подачи изделия меньше влияет на производительность, работоспособность круга и себестоимость операции, чем  $t$ . Однако опыт показывает, что при высоких скоростях  $v_u$  на поверхности обрабатываемых материалов, особенно малотеплопроводных (например, T14K8) может появляться сетка микротрещин. Поэтому при обработке твердых

гов из натуральных алмазов при плоском шлифовании твердого сплава ВК20 периферией круга на станке 371М. Изучались удельный расход алмазов и чистота обработанной поверхности при постоянном режиме резания:  $v=30$  м/сек,  $v_u=3$  м/мин, поперечная подача круга  $s_{\text{поп}}=0,5$  мм/ход, глубина резания для кругов на бакелитовой связке  $t=0,01$  мм и на металлической  $t=0,02$  мм. Шлифование проводилось с обильным охлаждением 3% содовым раствором.

Результаты этих экспериментов приведены на фиг. 24. Как видно из фиг. 24, применение кругов с малыми размерами зерен вле-

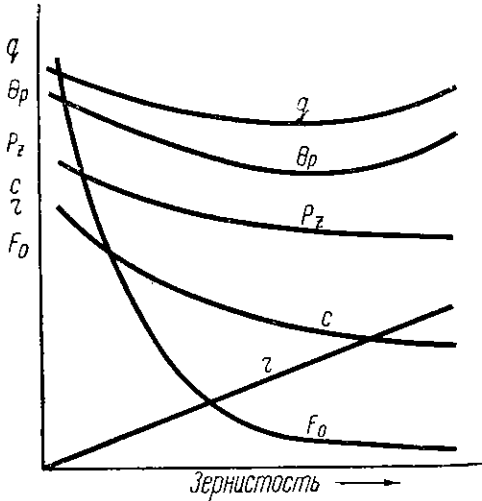


Фиг. 24. Влияние зернистости алмазного круга на удельный расход алмазов  $q$  и среднеквадратичную высоту неровностей  $H_{ск}$  при плоском шлифовании твердого сплава ВК20 периферией круга АПП  $200 \times 10 \times 75$  [17, 21]. Концентрация круга на бакелитовой связке—50%, на металлической—100%. Режим резания:  $v = 30$  м/сек,  $v_u = 3$  м/мин; поперечная подача  $s_{\text{поп}} = 0,5$ ; мм/дв. ход, глубина шлифования  $t = 0,01$  мм (для бакелитовой связки) и  $t = 0,02$  мм (для металлической). Производительность процесса постоянная для каждого из видов кругов.

чет за собой несколько больший расход алмазов, чем кругов с зернами большего размера. К сожалению, диапазон зернистостей, использованных авторами рассматриваемого исследования, особенно для кругов на бакелитовой связке, очень узок, что не позволяет дать анализ влияния зернистости с достаточной полнотой.

Однако рассмотрение расчетной формулы для температуры отдельно взятого зерна позволяет дать некоторое объяснение полу-

ченным в НИИ Алмазе экспериментальным данным. Изменение зернистости круга по-разному влияет на различные величины, входящие в формулу (29), как это видно из нижеследующих рассуждений и фиг. 25. По мере увеличения размеров зерна быстро уменьшается значение критерия Фурье. Расчет показывает, что при этом значение коэффициента



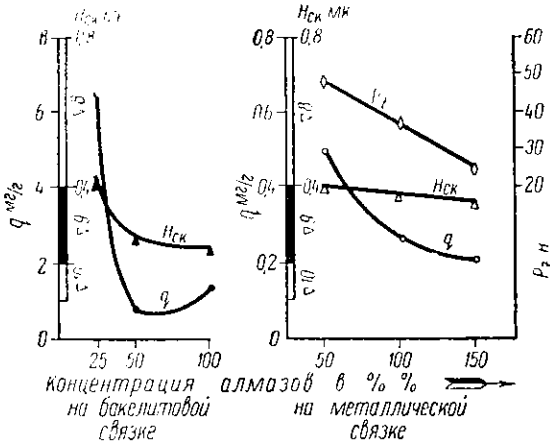
$$c = \frac{A}{0,35 + \lambda_u A},$$

Фиг. 25. Качественная картина изменения различных параметров, поясняющая характер изменения удельного расхода алмазов при работе кругами различной зернистости.

как правило, снижается. Это должно привести к снижению температуры, а, следовательно, и к снижению удельного износа алмазного круга  $q$ . Исследования [17] показывают, что сила  $P$  с увеличением размера зерна также снижается, за счет чего должно происходить снижение температуры и расхода  $q$ . Но, с другой стороны, в формулу (29) входит размер зерна  $r$ , с увеличением которого возрастает температура, а с нею и удельный расход

Противоположные направления влияния этих факторов и отражаются на общем течении кривой для  $q$  с изменением зернистости круга. На некотором участке этой кривой темп снижения произведения  $cP_z$  превалирует над темпом возрастания  $r$ . Температура снижается, снижается расход алмазов. При дальнейшем увеличении размеров зерен темп снижения  $cP_z$  начинает отставать от темпа нарастания  $r$ . Возрастает температура, возрастает износ круга. По-видимому, определенную роль играют, помимо теплофизических, и другие факторы. В частности, процесс выкалывания зерен из связки с увеличением размеров зерна ведет к потерям большего количества алмазов, так как каждое зерно массивнее. Но более массивные зерна, возможно, лучше удерживаются связкой, что влияет на расход в противоположном направлении.

Существенное влияние на технологические и экономические показатели процесса оказывает концентрация алмазов в круге. На фиг. 26 приведены результаты исследований, выполненные в НИИ Алмазе [17, 21]. При постоянной производительности изучались некоторые показатели процесса плоского шлифования твердого сплава ВК20 периферией алмазных кругов на бакелитовой и металлической связках.



Фиг. 26. Влияние концентрации на удельный расход алмазов  $q$  и среднеквадратичную высоту неровностей [17, 21]. Плоское шлифование твердого сплава ВК20 периферией круга зернистостью А6. Режим резания:  $v = 30$  м/сек;  $v_u = 3$  м/мин,  $t = 0,03$  мм;  $s_{\text{поп}} = 0,5$  мм/дв. ход. Производительность  $Q = 30$  мм<sup>3</sup>/мин.

Как видно, с увеличением концентрации удельный расход снижается, причем особенно резко при работе кругами на бакелитовой связке. Это явление можно объяснить, если сопоставить влияние концентрации на расход алмазов и на температуру отдельно взятого абразивного зерна. Из формулы (29) видно, что изменение концентрации влияет на температуру главным образом через величину  $\frac{P_z}{K^{2/3}}$ . На

фиг. 26 справа приведена зависимость силы  $P_z$  от концентрации для кругов на металлической

связке [17] для тех же условий, для которых определялся расход  $q$ . Согласно фиг. 26, с увеличением концентрации сила  $P_z$  уменьшается. Если перенести линию  $P_z = f(K)$  в логарифмическую систему координат (фиг. 27), то получим ориентировочно

$$P_z \approx c_1 \cdot K^{-0.6}.$$

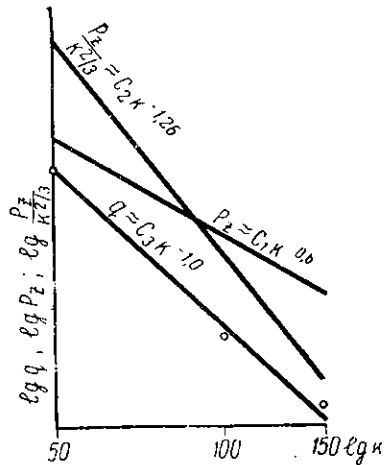
Следовательно, отношение  $\frac{P_z}{K^{2/3}}$  может быть представлено в данном случае в виде

$$\frac{P_z}{K^{2/3}} \approx c_2 \cdot K^{-1.26}.$$

Если теперь перенести в логарифмическую систему координат линию  $q = f_1(K)$  из фиг. 26, то получим

$$q \approx c_3 \cdot K^{-1.0}.$$

Как видно, показатели в отношении  $\frac{P_z}{K^{2/3}}$  и в зависимости  $q = f_1(K)$  — величины достаточно близкие, что еще раз позволяет



Фиг. 27. К пояснению зависимости между удельным расходом  $q$  и концентрацией алмазов в круге  $K$ .

отметить связь между расходом алмазов и температурой рабочей поверхности зерна.

Сопоставление линий, характеризующих удельный расход алмазов для кругов на бакелитовой и металлической связках (фиг. 24 и 26), показывает, что при одной и той же производительности процесса шлифования (для условий, приведенных на фиг. 26, производительность составила  $Q=30$  мм<sup>3</sup>/мин) металлическая связка способствует более экономному расходованию алмазов. Так, при концентрации  $K=50\%$  расход алмазов (фиг. 26) составляет: для кругов на бакелитовой связке  $q=0,73$  мг/г, для кругов на металлической —  $q=0,5$  мг/г; при  $K=100\%$  соответственно  $q=1,3$  мг/г и  $q=0,2$  мг/г. Вместе с тем чистота обработанной поверхности при прочих равных условиях получается выше, если применяется бакелитовая связка.

Металлическая связка более прочно удерживает зерно, чем бакелитовая, и, следовательно, зерно может работать с большей степенью притупления. Это снижает удельный расход алмазов, но вместе с тем ухудшает качество поверхности изделия.

Следовательно, круги на металлической связке при обработке твердосплавных изделий целесообразно применять главным образом для шлифовальных работ, а круги на бакелитовой — для доводочных.

#### ОХЛАЖДЕНИЕ, СМАЗКА И ОЧИСТКА КРУГОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Мы уже на ряде примеров показали, что температура рабочей поверхности зерна влияет на экономичность процесса алмазной обработки. Следовательно, обеспечение теплоотвода от круга является важной задачей. Особенно это относится к работе кругами на металлической связке, где вследствие высокой теплопроводности в круг уходит значительное количество тепла, образуяся при шлифовании.

Важно, однако, не только тепловой эффект, но и смазывающее и моющее действия охлаждающе-смазывающих сред. Тонкая пленка смазки на рабочей поверхности круга способствует снижению трения между зёрнами алмаза и обрабатываемым материалом, а также между материалом и связкой. Это, в свою очередь, уменьшает схватывание материала изделия со связкой и режущими зёрнами.

Существенным является моющее действие охлаждающе-смазывающих сред. В процессе шлифования в рабочей зоне возникают отходы — стружка, частицы разрушенных зёрен и связки. Их надо вовремя и активно удалять из зоны контакта круга с изделием, с тем, чтобы препятствовать засаливанию круга. Особенно важно это для металлических кругов, так как связка здесь пластичная, сравнительно легко размазывающаяся по поверхно-

сти изделия и рабочей поверхности зерен. Если своевременно не удалять продукты шлифования из зоны резания при работе кругами на металлической связке, то алмазные зерна покрываются пленкой из металла связки и теряют возможность активно резать. Возрастает трение между кругом и изделием, повышается температура шлифования, растет износ круга, появляются прижоги и трещины на обработанной поверхности изделия.

При алмазном шлифовании нашли применение следующие методы охлаждения и смазки:

- а) покрытие рабочей поверхности круга пастой;
- б) охлаждение и смазка распыленной жидкостью;
- в) полив струей охлаждающей или охлаждающе-смазывающей жидкости.

Первый метод состоит в периодическом покрытии рабочей поверхности круга пастой, состоящей по весу из двух частей вазелинового масла и одной части парафина. Паста обеспечивает смазку трущихся поверхностей алмазного зерна, снижает силы резания и тем самым способствует понижению температуры за счет снижения теплообразования в зоне резания. Непосредственное охлаждающее и моющее действия пасты незначительны. Поэтому пасту целесообразно применять лишь для кругов на органической связке, поскольку для последних моющее и непосредственное охлаждающее воздействие среды не столь важны, как для кругов на металлической связке.

Преимущество способа охлаждения зоны резания пастой состоит в его простоте. Паста наносится на рабочую поверхность алмазного круга тампоном. Не требуется никаких устройств для подвода и отвода охлаждающей среды. Эффект от применения пасты для смазки и охлаждения кругов на бакелитовой связке виден из табл. 8 и 9.

Таблица 8

**Влияние смазки и охлаждения пастой или распыленным маслом на основные показатели процесса алмазного шлифования твердых сплавов**

Круг АЧК 125×10×3×32 — АС25—Б1—50—24. Режим работы:  $v=26$  м/сек,  $v_{ch}=2,5$  м/мин,  $t=0,02$  мм. При охлаждении распыленным маслом расход воздуха — 6 м<sup>3</sup>/час, расход масла — 2 ÷ 3 г/час. Размеры шлифуемой поверхности 12×8 мм<sup>2</sup>.

Показатель процесса	ВК8		Т14К8		
	всухую	распыл. масло	всухую	паста	распыл. масло
Силы резания $P_z$ ньютонов . . .	70	49	62	59	44
$P_y$ » . . .	116	93	112	117	81
Производительность $Q$ мм <sup>3</sup> /мин . . .	13,45	15,8	13,9	13,8	14,6
Работоспособность $P$ кг/сч . . .	0,23	0,32	0,22	0,36	0,33
Удельный расход $q$ мг/г . . .	0,87	0,62	0,91	0,56	0,61

Таблица 9

Влияние охлаждения и смазки на наибольшую температуру поверхности изделия при плоском шлифовании твердых сплавов

Круг АЧК  $125 \times 10 \times 3 \times 32$  — АС25 — Б1 — 50 — 24. Режим работы:  
 $v = 26$  м/сек,  $v_u = 2,5$  м/мин.

Охлаждение	ВК8		Т14К8	
	$t=0,02$	$t=0,03$	$t=0,02$	$t=0,03$
Без охлаждения . . . . .	490°	720°	470°	610°
Пастой . . . . .	—	630°	360°	—
Распыленным маслом . . . . .	450°	530°	—	470°

Из данных, приведенных в этих таблицах, следует, что применение пасты приводит к снижению силы  $P_z$  в большей мере, чем силы  $P_y$ . Это понятно, так как снижение трения между зернами и изделием отражается прежде всего на тангенциальных силах.

Уменьшение сил  $P_z$  с применением пасты приводит к понижению температуры на  $12 \div 25\%$ , что в свою очередь ведет к снижению удельного расхода алмазов. Нельзя не обратить внимание на то, что простое мероприятие — покрытие рабочей поверхности круга пастой — позволяет снизить расход алмазов на  $30 \div 40\%$ , то есть существенно улучшить экономические показатели процесса. К сожалению, на ряде предприятий алмазные круги на бакелитовой связке все еще работают без смазки, и предприятия на этом, естественно, несут излишние расходы.

В табл. 8 и 9 приведены также результаты исследований по применению охлаждения распыленным маслом (масляным туманом). В этих исследованиях была использована переносная установка, сконструированная по типу установок Горьковского автозавода и Горьковского политехнического института [22, 23]. Воздушная струя под давлением 4 атм с расходом  $6 \text{ м}^3/\text{час}$  распыливалась  $2 \div 3$  г масла в час и через сопло диаметром 2,5 мм подавалась в зону шлифования.

Воздушно-масляная струя обеспечивает интенсивную смазку режущих зерен, поскольку частицы масла в распыленном состоянии, двигаясь с большой скоростью, имеют, по-видимому, возможность проникать непосредственно на контактную площадку между кругом и изделием. Воздух, движущийся с большой скоростью, хорошо охлаждает круг. Таким образом, снижение температуры при использовании воздушно-масляной струи является результатом как косвенного (через снижение сил и теплообразования), так и непосредственного эффекта охлаждения. Результат согласно данным табл. 8 и 9 получается хороший. Температура снижается



на 20÷25% по сравнению с работой всухую, расход алмазов также уменьшается.

Установка для распыления масла компактна, легко устанавливается на столе станка, не требует создания системы подвода и отвода охлаждающей жидкости на тех станках (например, заточных), где такая система отсутствует. В этом — преимущество метода охлаждения алмазных кругов распыленным маслом.

Однако моющее действие воздушно-жидкостной струи весьма невелико. Поэтому применение распыленной жидкости не дает положительных результатов при охлаждении алмазных кругов на металлической связке, где, как уже указывалось выше, моющее действие среды играет первостепенную роль. Распыленное масло (или распыленная эмульсия) не смывает с рабочих поверхностей круга продукты шлифования, а, наоборот, образует с ними своеобразную пасту, засаливающую круг.

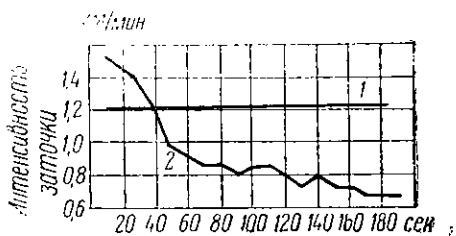
Поэтому при алмазном шлифовании кругами на металлической связке следует применять обильное охлаждение поливом. На практике нашли применение такие жидкости:

1. Керосин.
2. Смесь керосина и жидкого масла (33%).
3. 3% водный раствор соды.
4. Однопроцентный водный раствор триэтаноламина с 0,25% буры.
5. Жидкость НИИалмаза [21]:
  - тринатрийфосфат — 0,6%
  - вазелиновое масло — 0,05%
  - бура — 0,3%
  - кальцинированная сода — 0,25%
  - нитрат натрия — 0,1%
  - вода — 98,7%
6. Жидкость Горьковского автозавода [24]:
  - триэтаноламин — 0,4%
  - нитрат натрия — 0,4%
  - тринатрийфосфат — 0,3%
  - кальцинированная сода — 0,3%
  - бура — 0,5%
  - смачиватель ОП-7 —
    - или ОП-10 — 0,1%
  - вода — 98%.

Керосин обладает весьма хорошим моющим действием и в достаточной мере смачивающим. Поэтому при шлифовании алмазными кругами на металлической связке он обеспечивает хорошие условия для работы режущих зерен и, следовательно, высокую производительность процесса. Это можно видеть из фиг. 28. Охлаждение керосином вне зависимости от времени работы круга обеспечивает интенсивность съема (укорочение) пластинки из

твердого сплава ВК6 примерно в 1,2 мм/мин. Жидкость Горьковского автозавода (ГАЗ) вначале обеспечивает более интенсивный съем, чем керосин. Но через 40 секунд съемы для керосина и жидкости ГАЗ сравниваются, а затем жидкость ГАЗ, которая, по-видимому, хуже очищает круг, обеспечивает меньшие съемы — примерно 0,7 мм/мин.

К сожалению, применение керосина ограничено условиями техники безопасности и охраны труда работающих. Поэтому на практике нельзя применять керосин без создания специальных вентилирующих и защитных устройств.



Фиг. 28. Интенсивность съема металла в мм/мин в зависимости от вида охлаждающей жидкости и времени работы круга [24]. Твердый сплав ВК6, круг АЧК  $75 \times 3 \times 3$  на металлической связке,  $v = 18$  м/сек.

1 — охлаждение керосином; 2 — охлаждение жидкостью ГАЗ.

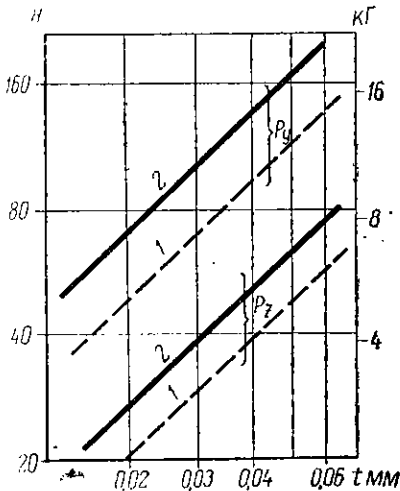
3—5 л/мин. Пока нет еще опыта охлаждения алмазных кругов с подводом в зону резания струи жидкости с повышенным давлением. Но поскольку высоконапорная струя обладает лучшими охлаждающими и моющими свойствами, чем обычная низконапорная, эффект от повышения давления может оказаться ощутимым. В этом направлении следует экспериментировать.

Приведенные выше данные наших и других отечественных исследований согласуются с данными зарубежных предприятий и фирм. Так, например, по данным японской фирмы Осака Диаманд Индастриал [25], срок службы алмазного круга при работе с охлаждением увеличивается более чем на 40% по сравнению с работой без охлаждения. Если условия работы не позволяют применить обильное охлаждение, то фирма рекомендует накладывать на поверхность круга фетр или войлок, смоченные в охлаждающей жидкости.

По данным этой фирмы относительная стоимость процесса алмазного шлифования составляет: при работе с охлаждением — 100%, при полусухой обработке — 147%, при шлифовании без охлаждения — 350%. Охлаждение кругов на металлической связке способствует снижению шероховатостей на обработанной поверхности примерно вдвое.

Японские фирмы рекомендуют применять для охлаждения легкие масла и их водные растворы.

Независимо от применения той или иной охлаждающе-смазывающей среды алмазные круги нуждаются в периодической очистке рабочих поверхностей, что подтверждается данными, приведенными на фиг. 29. Р. Г. Махкамов [16] проводил измерение сил резания при работе алмазными кругами на бакелитовой связке с чистой рабочей поверхностью, а затем теми же кругами после некоторого времени эксплуатации.



Фиг. 29. Силы резания при работе алмазными кругами [16].

1 — с очищенной рабочей поверхностью; 2 — после некоторого периода эксплуатации (съем около 0,5 см<sup>3</sup> твердого сплава);  $v = 11$  м/сек;  $v_{\text{т}} = 1,5$  м/мин, зернистость А8.  $K = 50^{\circ}/\text{о}$ , связка бакелитовая.

Силы  $P_z$  и  $P_y$  при работе кругами с чистой рабочей поверхностью оказались примерно в 1,4 раза ниже. Естественно, что более низкой оказывается и температура шлифования, улучшаются все технологические показатели процесса.

Чистку алмазных кругов на органической связке можно производить пемзой вручную при вращении круга с рабочей скоростью. При сильном засаливании можно применять правку круга брусками из зеленого карборунда, однако доводить круги до интенсивного засаливания не следует. Японские фирмы [25] рекомендуют производить чистку периферии алмазных кругов на бакелитовой связке мелкозернистой наждачной шкуркой, свернутой в трубку, а торца круга — на чугунной или стеклянной плите, погруженной в абразивную суспензию с порошком зеленого карборунда зернистостью 6. Правку кругов с бакелитовой связкой рекомендуется

при необходимости проводить брусками КЗМ40М1К.

Алмазные круги на металлической связке можно очищать от пленки металла связки, затягивающей алмазные зерна, химическим путем. Для этого алмазный круг помещают в разбавленную азотную кислоту на некоторое время, продолжительность которого зависит от толщины пленки. Далее производится нейтрализация в растворе соды и нитрата натрия [21].

Иностранные фирмы рекомендуют чистку и правку алмазных кругов на металлической связке производить кругом из КЗ зернистостью 6—12 при скорости 1 м/сек при обильном охлаждении и легком прижатии. Могут применяться бруски КЗ зернистостью 16—38, твердостью С1—М1 на керамической связке [25].

## ШЛИФОВАНИЕ ЧУГУНА И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ АЛМАЗНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ И ПОРОШКАМИ

Промышленностью накоплен значительно меньший опыт шлифования легированных сталей и чугуна алмазными инструментами и порошками, чем обработки алмазами твердых сплавов. Объясняется это специфическими трудностями, возникающими при обработке сталей и чугуна алмазами.

Как мы уже отмечали, с вязкостью обрабатываемого материала возрастают усилия шлифования. Вязкость сталей и чугунов значительно выше, чем твердых сплавов, что вызывает повышенную нагрузку на алмазные зерна и, естественно, более высокие рабочие температуры. Немаловажную роль, по-видимому, играет и способность алмаза диффундировать в железо и растворяться в нем при высоких температурах. Поэтому алмазные зерна при шлифовании сталей и чугунов работают в значительно худших условиях, чем при обработке твердых сплавов. Это приводит к повышенному удельному расходу алмазов, а также к не всегда приемлемым результатам в отношении производительности процесса и чистоты обработанной поверхности.

Природа и свойства шлифующих зерен в алмазных кругах пока не могут быть нами изменены (надежды возлагаются на боразон). Следовательно, решение задачи об обеспечении рациональных и производственно-целесообразных условий обработки сталей и других легированных материалов алмазами лежит в отыскании соответствующих связок и методов смазки — охлаждения для алмазных инструментов.

Так, например, при внутреннем шлифовании закаленной стали ШХ15 хорошо зарекомендовали себя алмазные круги на никелевой связке. На ордена Ленина Четвертом Государственном подшипниковом заводе успешно прошли испытания круги типа АГЦ диаметром 2,7 и 5,5 мм при внутреннем шлифовании колец подшипников на автоматах. Применялись круги из натуральных алмазов зернистостью АМ28, АМ40 и 45 и из синтетических зернистостью АСМ40 и АС5.

При шлифовании отверстий диаметром 3 мм круг диаметром 2,7 мм совершал 90 000 об/мин, что создавало скорость  $v = 12,5$  м/сек. Продольная подача круга составляла  $v_p = 0,9$  м/мин, скорость вращения изделия  $v_d = 23,3$  м/мин. За каждый двойной ход снимался слой толщиной  $t = 0,001$  мм. Цикл шлифования составлял 45 сек, часовая производительность — 80 изделий.

Опыт показал, что при этих режимах овальность и конусность отверстия не выходили за пределы 1—2 мк, ожоги и другие дефекты поверхности отсутствовали. Круги из натуральных алмазов зернистостью АМ28 обрабатывали в среднем 150 колец, причем у 90% изделий чистота обработанной поверхности была не ниже  $\nabla 7$ , а у остальных 10% —  $\nabla 9$ . Переход к зернистости АМ40

повысил стойкость кругов до 220 колец, но чистота поверхности ухудшилась:  $\nabla 10$  имели 25%,  $\nabla 9$  — 63% и  $\nabla 8$  — 12% изделий.

Круги из натуральных алмазов зернистостью А5 имели стойкость в среднем 170 колец, причем чистота обработанной поверхности в партии распределялась следующим образом:

$\nabla 10 \div \nabla 9$ —30%;  $\nabla 9$ —55%;  $\nabla 9 \div \nabla 8$ —10% и  $\nabla 8$ —5%.

Круги из синтетических алмазов зернистостью АСМ40 показали более низкую стойкость, чем круги из натуральных алмазов — в среднем 84 кольца. Чистота поверхности изделий в партии составляла  $\nabla 10$ —30%;  $\nabla 9$ —70%. Круги АС5 также имели стойкость примерно в 1,7  $\div$  1,8 раза более низкую, чем круги из натуральных алмазов. Распределение изделий в партии по чистоте поверхности здесь также было несколько менее благоприятным:  $\nabla 10 \div \nabla 9$ —20%;  $\nabla 9$ —55% и  $\nabla 8$ —25%.

При шлифовании отверстий диаметром 6 мм стойкость кругов из синтетических и натуральных алмазов оказалась примерно одинаковой, чистота обработанной поверхности у всех 100% изделий не выходила за пределы  $\nabla 8 \div \nabla 9$ , овальность и конусность составляли 4—5 мк. Скорость круга при этом применялась  $v=24$  м/сек, скорость вращения изделия —  $v_d=46,5$  м/мин. Остальные элементы режима резания были такими же, как и при обработке отверстий диаметром 3 мм.

Как видно из результатов испытаний, при обработке малых отверстий оказалось возможным успешно применять круги из синтетических и натуральных алмазов на никелевой связке. Несколько хуже результаты при обработке отверстий диаметром 6 мм. Здесь получасовой срок службы круга не удовлетворял производство, не удовлетворяло и качество поверхности. Однако, вероятно, изменив характеристику круга и режим работы, можно будет и здесь добиться удовлетворительных результатов. Возможно, улучшить результаты помогут круги на керамической связке, которые иногда рекомендуют для шлифования сталей [25].

Во французской технической печати опубликованы [26] данные об испытании алмазных кругов при обработке ванадиевых сталей. Для экспериментов были отобраны алмазные круги пяти характеристик и быстрорежущие ванадиевые стали семи марок с содержанием ванадия от 1 до 12%. Сопоставление производилось с результатами шлифования тех же сталей корундовыми кругами.

Алмазные круги, применявшиеся в этих испытаниях, были плоского прямого профиля диаметром 180 мм и шириной 13 мм. Они содержали зерна синтетических (АС12) или натуральных (АС8) алмазов при стопроцентной концентрации. Применялись керамическая и бакелитовая связки. Производилось плоское шлифование заготовок размером 150  $\times$  38 мм<sup>2</sup> периферией круга при охлаждении растительным маслом с водой в пропорции 1:80. Режимы работы  $v=10$ —30 м/сек;  $v_n=11$ —19 м/мин;  $t=0,013 \div 0,025$  мм.

Испытаниями установлено, что быстрорежущие стали с высоким содержанием ванадия и штамповые стали более экономично шлифовать алмазными кругами на керамической связке, чем корундовыми абразивными кругами. Эти работы можно выполнять кругами АС12 с концентрацией 100%. Круги на бакелитовой связке зернистостью АС8 рекомендуются для тонкого шлифования и доводки, так как они удовлетворяют высоким требованиям к точности размеров и геометрической формы изделий. Исследования в НИИЛ также показали целесообразность применения алмазных кругов на бакелитовой связке для доводки изделий из закаленной быстрорежущей стали.

Если шлифование алмазными кругами изделий из материалов, содержащих железо, не нашло еще широкого применения в производстве, то обработка этих изделий на финишных операциях — хонингование, суперфиниш, доводка — уже уверенно внедряется на ряде предприятий.

Алмазные бруски успешно применяются на московском автомобильном заводе им. Лихачева (ЗИЛ) для хонингования чугунных гильз, картеров, отверстий в стальных шестернях и других деталях. В ряде случаев процесс хонингования заменил процесс окончательного шлифования, поскольку алмазные бруски могут обеспечивать не только высокую чистоту поверхности, но и исправлять погрешности в форме отверстий в пределах до 10 мк. При обработке изделий из серого чугуна ЗИЛ рекомендует применять бруски зернистостью АС5—АС20 на металлической связке. Концентрация алмазов в алмазоносном слое — 50%. Режим работы: скорость вращения хона  $v = 8,4 \div 23,7$  м/мин в зависимости от размеров обрабатываемого отверстия, скорость возвратно-поступательного движения хонинговального инструмента  $v_u = 2,4 \div 7,7$  м/мин. Удельное давление брусков  $p = 6 \div 10$  кг/см<sup>2</sup>. Снимаемый припуск по диаметру 0,04 — 0,05 мм, охлаждение керосином. В этих условиях в результате хонингования можно получить точность формы отверстий в пределах 2—3 мк и чистоту поверхности  $\nabla 10$  [27].

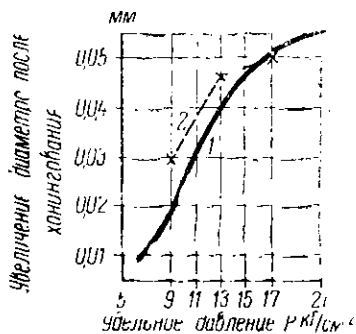
При хонинговании изделий из закаленной стали рекомендуется процесс хонингования проводить в две операции. Предварительная обработка: бруски АС25—АС20 на металлической связке, концентрация 50%. Режимы работы:  $v = 39,3$  63,3 м/мин;  $v_u = 5,3 \div 7,7$  м/мин;  $p = 4 \div 6$  кг/см<sup>2</sup>, припуск 0,06—0,25 мм на диаметр изделия, охлаждение керосином. Чистота поверхности получается в пределах  $\nabla 7$ . Окончательное хонингование: бруски АС8, на металлической связке, концентрация 50%. Режимы работы по скоростям вращения и подачи те же, что и для предварительной обработки, но рабочие давления ниже —  $p = 2 \div 4$  кг/см<sup>2</sup>.

Под окончательное хонингование оставляется припуск 0,02—0,03 мм. Охлаждение керосином. В результате обработки получается изделие с чистотой поверхности  $\nabla 8$  и выше [27].

Как видно из приведенных выше данных, особенностью хонин-

гования алмазными брусками являются более высокие давления прижатия брусков к обрабатываемой поверхности. Радиальные давления при работе алмазными брусками в два и более раза превосходят давления, применяемые обычно при работе абразивными брусками.

При алмазном хонинговании давление в значительной степени определяет съем металла с изделия и точность геометрической формы отверстия. На фиг. 30 приведены данные новороссийского



Фиг. 30. Интенсивность съема металла при хонинговании тракторных гильз в зависимости от давления на бруски [28].

завода «Красный двигатель», где проводилось хонингование гильз [28]. Материал гильзы — хромофосфористый чугун твердостью HB229-241. Диаметр отверстия гильзы 125 мм, длина 292 мм. Использовались бруски 50%-ной концентрации на металлической связке М1 из синтетических (АС10) и натуральных (А10) алмазов. Окружная скорость хона  $v=63$  м/мин, скорость возвратно-поступательного движения  $v_u=16,5$  м/мин. Время хонингования 40 сек. Охлаждение керосином. Как видно из фиг. 30, при  $5 \leq p \leq 15$  кг/см<sup>2</sup> объем обрабатываемого металла при работе синтетическими алмазами почти линейно зависит от давления. При дальнейшем повышении давления

съем увеличивается менее интенсивно (кривая 1, фиг. 30).

Бруски из натурального алмаза обеспечивают несколько больший съем металла, чем бруски из синтетических алмазов при  $9 \leq p \leq 13$  кг/см<sup>2</sup> (кривая 2).

Проведенными испытаниями установлено, что с увеличением удельного давления изменяется чистота обработанной поверхности изделий. При  $p=5$  кг/см<sup>2</sup> поверхность получается с чистотой  $\nabla 7a$ , следы предшествующей обработки устраняются не полностью. Повышение давления до  $p=9$  кг/см<sup>2</sup> обеспечивает уменьшение шероховатости и улучшает чистоту поверхности до  $\nabla 7b$ . При дальнейшем увеличении давления шероховатость поверхности вновь несколько возрастает, но чистота не выходит за пределы  $\nabla 7a$  даже при  $p=21$  кг/см<sup>2</sup>.

Могут быть увеличены и окружные скорости хона. Как видно из табл. 10, в которой приведены режимы хонингования, рекомендуемые НИИалмазом [27], они могут доходить до  $v=65$  м/мин при скоростях возвратно-поступательного движения инструмента  $v_u=4,5 \div 11$  м/мин.

Стойкость алмазных брусков значительно (в 100—120 раз и более) превышает стойкость абразивных, что резко повышает однородность продукции и способствует росту производительности труда. Резание алмазными зернами происходит легче, чем

Таблица 10

Характеристика брусков и режимы работы при алмазном хонинговании  
(по данным НИИАлмаз'а)

Обрабатываемый материал	Требуемая чистота поверхности	Бруски		Удельное давление $P$ кг/см <sup>2</sup>	Режим работы	
		Зернистость	Концентрация		$v$ м/мин	$v_a$ м/мин
Чугун серый	▽7—▽8	A5	50	12	65	11
	▽9—▽10	AM40	50	12	65	11
	▽10—▽11	AM20	50	12	65	11
Сталь ШХ15 и другие HRC ≥ 60	▽7	A25	100—150	3	25 ÷ 32	4,5 ÷ 6
	▽9	A5	100—150	3	25 ÷ 32	4,5 ÷ 6
	▽10—▽11	AM20	50	3	25 ÷ 32	4,5 ÷ 6

абразивными, температуры, возникающие в процессе алмазного хонингования, ниже, чем при абразивной обработке. В связи с меньшими силами и температурами точность изделий при алмазной обработке оказывается выше. Однако точность и чистота поверхности изделий зависит не только от характеристики брусков и элементов режима резания. Для получения надлежащих результатов следует особое внимание уделить подготовке брусков и хоны в целом. Бруски должны подвергаться тщательной обработке и проверке, затем после сборки в хон — обрабатываться в сборе на круглошлифовальном станке кругами из зеленого карбида кремния зернистостью на 2—3 номера крупнее зернистости алмаза бруска, либо приработкой по отверстию изделия (можно бракованного) до тех пор, пока в хонинговании не начнет участвовать около 90% цилиндрической поверхности брусков.

Серьезное внимание должно также уделяться точности изготовления основных деталей хонинговальной головки.

Мы рассмотрели опыт некоторых отечественных предприятий по хонингованию алмазными брусками. Аналогичные данные приводятся и в зарубежной технической литературе [29]. Например, на отдельных предприятиях установлено, что алмазные хонинговальные бруски имеют значительно большую стойкость по сравнению с брусками из карбида кремния при хонинговании отверстий в чугунных цилиндрах, стальных втулках и т. д. При этом, несмотря на высокую стоимость алмазных брусков, применение их быстро окупается. Так, при обработке отверстий чугунных цилиндров твердостью HB 250—300 ранее применялись бруски из карбида кремния зернистостью примерно A4. Их стойкость составляла 500 отверстий. Алмазные же бруски зернистостью A5 обрабатывали 80—100 тысяч изделий.

В отечественной и зарубежной промышленности начато применение алмазных брусков для суперфинишной обработки наружных поверхностей.



На ЗИЛе суперфинишем обрабатываются опорные поверхности валов.

В зарубежной печати [30] описывается опыт применения алмазных брусков для обработки валков стана холодной прокатки. Валки диаметром 41,5 мм и длиной 690 мм обрабатывались с точностью по диаметру 2,5 мк при среднеквадратичной высоте неровностей  $H_{\text{ск}}=0,05 \div 0,1$  мк ( $\nabla 11 - \nabla 10$ ). Применялись алмазные бруски на вулканитовой связке, совершающие осциллирующее движение при вращающемся валке. Обработка ведется с охлаждением смесью из десяти частей минерального масла и одной части керосина. После обработки брусками валки полируют алмазной микронной пастой.

Алмазные пасты, упомянутые выше, могут успешно применяться для окончательной доводки стальных изделий в тех случаях, когда требуется высокая чистота обработанных поверхностей.

Большой опыт в этом отношении имеет ордена Ленина Четвертый Государственный подшипниковый завод, который сам изготавливает пасты и шкурки, содержащие алмазные порошки. Рассмотрим некоторые результаты применения паст и шкурок, полученные на 4ГПЗ.

Алмазные пасты с порошком зернистостью АМ40 применялись при полировке дорожек качания (желобов) наружных колец подшипников. Под полирование изделия подавались после шлифовки с чистотой поверхности  $\nabla 9$ . Паста с алмазным порошком наносилась на ленту из бязи, полировка производилась при вращении изделия с числом оборотов  $n=4000$  об/мин. В результате полировки 60  $\div$  70% изделий имели чистоту поверхности желоба  $\nabla 11$ , остальные — не ниже  $\nabla 10$ , тогда как при прежнем технологическом процессе (полирование абразивной пастой) было не более 2  $\div$  30% изделий, имевших чистоту поверхностей  $\nabla 11$ .

На 4ГПЗ проводились испытания шкурки с алмазным порошком при доводке желобов и бортов наружных и внутренних колец подшипников, изготовленных из жаропрочной стали ЭИ347. Внутренние кольца подшипников поступали на доводку желобов после шлифования с чистотой обработанной поверхности  $\nabla 8$ . Доводка производилась на специальных станках в две операции: 1) брусками из зеленого карборунда зернистостью 4 на керамической связке, твердостью СМ1—М3 и шкуркой ЭБЗ на бумажной основе и 2) брусками из зеленого карборунда зернистостью М28 на керамической связке, твердостью М2—М3 и шкуркой с алмазным порошком АС4 или АСМ40. Обработка производилась при скорости вращения изделия  $v_d=68$  м/мин, усилие прижима бруска 15—18 кг и числе качаний последнего 500 в минуту. Охлаждение осуществлялось веретенным маслом № 2. Чистота поверхности изделий после такой обработки устойчиво находилась в пределах  $\nabla 10 - \nabla 11$ , хотя износ брусков и расход алмазов при обработке

жаропрочной стали были бóльшими, чем при обработке изделий из ШХ15.

Важно отметить, что применение алмазных паст и шкурочек позволило заводу резко снизить брак и улучшить качество продукции. Только за счет применения алмазов на доводке и полировке колец подшипников завод в 1963 году получил экономию более 90 тыс. рублей.

Алмазная доводка используется и в практике зарубежных предприятий. В Англии [31] фирма Engis выпускает алмазную пасту двенадцати различных марок с размерами зерен от 0,1 до 90 мк для обработки мягких и твердых материалов. Паста каждой зернистости имеет свою окраску. Доводка обрабатываемых поверхностей (например, рабочих поверхностей пресс-форм) производится вручную или механически с помощью мягких притиров или щеток из войлока, нейлона и т. д. При чистовой доводке используются пасты с зернами размером 25 мк, при окончательной — размером 1 мк, при сверхдоводке — 0,25 мк. Для точного дозирования пасты, подаваемой на обрабатываемую поверхность, применяется специальный шприц [32]. Корпус последнего для предохранения от коррозии обрабатываемых поверхностей изготовлен из литого нейлона, а поршень — из неопрена.

В зарубежной практике нашли применение специальные доводочные диски для алмазной обработки изделий [33]. Они предназначены для обработки поверхностей различных материалов, к изделиям из которых предъявляются высокие требования в отношении точности и чистоты. Диски изготовляют из пористой ткани (пенопластмассы), содержащей до 50% различных химикатов. Структура ткани представляет собой переплетение коротких волокон, между которыми имеется большое количество пор, используемых для размещения алмазных зерен. Материал диска размягчается в ацетоне, метилкетоне или толуоле, что обеспечивает возможность придания дискам разнообразной формы. Нерабочим торцом диск крепится к металлическому корпусу, причем крепление осуществляется простым прижатием, так как нерабочий торец имеет специальный адгезионный слой.

Такие диски эффективно применяются при доводке калибров, клапанов, пяток микрометров, полупроводниковых кристаллов и других изделий.

Мы вкратце рассмотрели опыт отечественных и зарубежных предприятий по применению алмазных шлифовальных инструментов и паст для обработки чугунов и легированных сталей. Большие резервы повышения качества изделий (в частности, снижение остаточных напряжений в ответственных деталях, резкое повышение срока службы машин) ставят перед учеными и производственниками важные задачи — отыскать пути эффективного применения алмазных шлифовальных кругов, расширить область применения алмазных брусков и паст при обработке легированных сталей и сплавов. На сегодняшний день эти задачи еще не решены

в полной мере, но нет сомнения, что эксперименты и практика работы с алмазными инструментами различных характеристик, режимами работы и методами охлаждения позволят найти необходимые решения в ближайшее время. Для этого нужна настойчивая работа на каждом предприятии и в каждой исследовательской лаборатории.

### ШЛИФОВАНИЕ И РАЗРЕЗКА АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

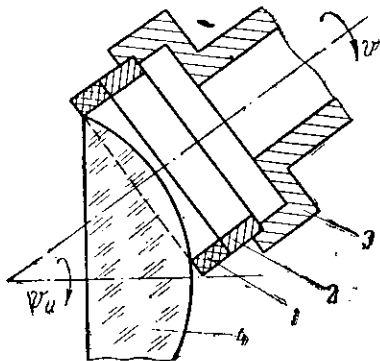
В связи с бурным развитием техники получили широкое распространение новые материалы с особыми свойствами, такие как полупроводники, магнитострикционные ферриты, ситалы, стеклопластики, различные виды керамики и пластмасс. Более широко стали применять и другие неметаллические материалы (например, стекло). Для ряда конструкций не удастся ограничиться только заготовительными операциями, так как требования к качеству поверхности и точности размеров изделий этими операциями не могут быть обеспечены. Отдельные из используемых в промышленности неметаллических материалов (например, германиевые полупроводники и др.) стоят дорого и при обработке и резке на части следует стремиться к минимальным потерям. В большинстве своем все перечисленные материалы обладают высокой износостойкостью, твердостью и хрупкостью, что весьма затрудняет или делает практически невозможной их обработку лезвийным инструментом. Поэтому при изготовлении изделий из этих материалов находит все более широкое применение обработка алмазными инструментами.

Алмазные инструменты по своей природе и конструкции отлично приспособлены к обработке неметаллических материалов. Начать с того, что отношение твердости и прочности режущего материала к этим же характеристикам обрабатываемого материала здесь, как правило, достаточно высоко. Силы резания и температуры при обработке неметаллических материалов ниже, чем при обработке металлов, что позволяет алмазными инструментами снимать значительные слои материала за каждый проход. Устойчивость формы, сохраняемая алмазными инструментами в процессе эксплуатации, содействует получению чистых и точных поверхностей, а облегченное резание устраняет одну из главных причин брака при изготовлении изделий из неметаллических материалов — трещины на обработанной поверхности, осыпание, выкрашивание и сколы на кромках и краях деталей.

Алмазными инструментами давно пользуются при обработке изделий из стекла. Так, например, на промышленных предприятиях нашей страны нашли применение режущие трубки с алмазными зернами для обработки сфер на оптических деталях (фиг. 31). Режущая трубка состоит из алмазоносного слоя 1 и безалмазного слоя 2. Трубка укрепена в стальном корпусе 3 и вращается со скоростью по периферии  $v=5\div 7$  м/сек. Изделие

4 также вращается со скоростью по периферии  $v_u = 0,2 \div 0,4$  м/мин. Съем стекла за один оборот изделия  $t = 0,4 \div 0,6$  мм.

Алмазосный слой трубок содержит зерна из натуральных алмазов зернистостью А12 на медно-оловянно-свинцовистой металлической связке. В последнее время проводилось испытание



Фиг. 31. Схема обработки оптического стекла алмазной трубкой.

трубок с алмазными зернами АС12 из синтетических алмазов. Оказалось, что трубки с 50%-ной концентрацией синтетических алмазов работали неудовлетворительно, а трубки с  $K = 100\%$  позволили получить удовлетворительный результат, но производительность процесса была на 60% ниже, чем при работе трубками с зернами из натуральных алмазов. По-видимому, предстоит дальнейшая работа по отысканию зернистости, связки и режимов работы, при которых можно было бы осуществить замену дорогостоящих натуральных алмазов значительно

но более дешевыми синтетическими.

Все шире используют в различных устройствах магнитострикционные ферриты, которые получают обычно методами порошковой металлургии. Ферриты представляют собой твердые, но очень хрупкие материалы, что практически исключает обработку изделий из них другими инструментами, кроме шлифовальных кругов. Ферриты сравнительно легко обрабатываются карборундовыми кругами на керамической связке, но при этом на поверхности и у краев изделий могут образовываться микротрещины и сколы, что приводит к браку, доходящему до 30—40%.

Задача по обработке ферритов может быть решена при использовании алмазных шлифовальных кругов. Ниже излагаются материалы работы по применению алмазных кругов для обработки магнитострикционных ферритов, выполненной В. А. Федотовым в НИИ Алмазе [34]. Автор рассматриваемой работы исследовал влияние зернистости, концентрации и режимов работы алмазных кругов на производительность процесса, удельный расход алмазов и качество поверхности.

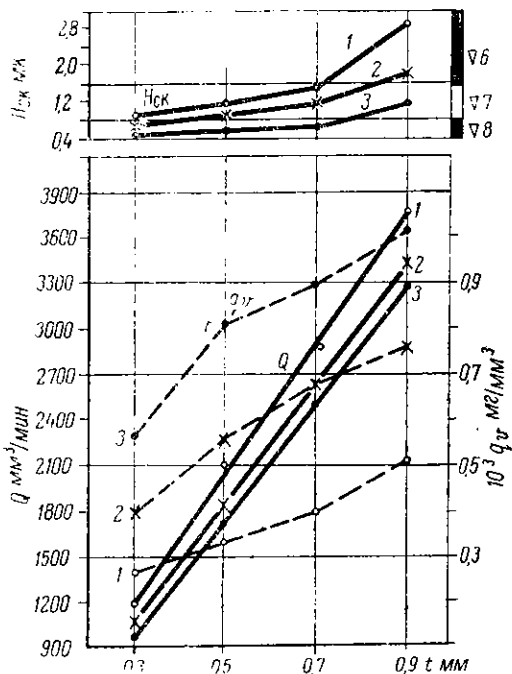
На фиг. 32 приведены зависимости от глубины резания  $t$  производительности  $Q$ , объемного удельного расхода алмазов  $q_v$  и среднеквадратичной высоты неровностей на обработанной поверхности  $H_{ck}$ , построенные по данным, приведенным в работе В. А. Федотова. Они относятся к плоскому шлифованию феррита периферией кругами АПП  $200 \times 10 \times 3$  на металлической связке при концентрации  $K = 100\%$  и нижеследующих элементах режима резания:  $v = 27$  м/сек;  $v_u = 8$  м/мин;  $s_{\text{пол}} = 0,6$  мм/ход.

Рассматривая эти графики, заметим прежде всего, что общий характер зависимости производительности и удельного расхода алмазов от глубины резания  $t$  при обработке феррита такой же, как и при обработке твердых сплавов. Это свидетельствует о наличии общих закономерностей процесса шлифования алмазными инструментами, которые одинаково проявляются при обработке разнообразных материалов. Численные значения  $Q$  и  $q_v$  при обработке феррита, конечно, отличаются от численных значений этих величин при обработке других материалов.

Обращают на себя внимание весьма малые объемные удельные расходы алмазов. Так, например, снимая слой толщиной  $t=0,5$  мм при упомянутых выше других параметрах режима резания, из круга А16 расходуем  $q_v=0,34 \cdot 10^{-3}$  мг/мм<sup>3</sup>. Это значит, что, израсходовав 1 карат алмаза, в круге можно снять объем феррита  $6 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup>, то есть обработать 1000 плиток размером  $20 \times 30$  мм<sup>2</sup>, если с каждой снимать припуск в 1 мм. На обработку каждой из плиток будет затрачено около 0,3 минуты машинного времени.

Высокая производительность процесса сочетается с достаточно высоким качеством обработанной поверхности. Как видно из верхней части фиг. 31, чистота поверхности при  $t=0,5$  мм не выходит за пределы  $\nabla 7$ . Уменьшение размеров зерна, то есть переход от А16 к А10 и А8 вызывает некоторое снижение производительности, повышение удельного расхода алмазов, но одновременно способствует улучшению чистоты обработанной поверхности.

Как уже указывалось выше, данные фиг. 32 относятся к кругам на металлической связке при концентрации алмазов  $K=100\%$ . Переход к кругам  $K=50\%$  сравнительно мало отражается на производительности процесса, но резко увеличивает удельный расход

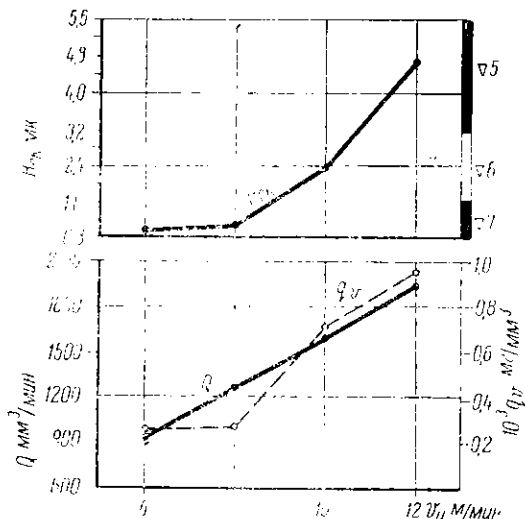


Фиг. 32. Производительность  $Q$ , удельный расход по объему  $q_v$  и чистота обработанной поверхности в зависимости от глубины резания  $t$  и зернистости круга при шлифовании ферритов [34].

1—круг А16; 2—круг А10; 3—круг А8.

алмазов — в 2,2 раза при  $t=0,3$  мм и в 3,3 раза при  $t=0,9$  мм. Поэтому НИИалмаз рекомендует работать кругами 100%-ной концентрации.

На фиг. 33 приведены графики, также построенные по данным В. А. Федотова. Как видно, увеличение скорости подачи изделия  $v_u$ , как и при обработке твердых сплавов, вызывает не только увеличение  $Q$ , но и рост удельного расхода  $q_v$ .



Фиг. 33. Производительность  $Q$ , удельный расход по объему  $q_v$  и чистота обработанной поверхности в зависимости от скорости продольной подачи изделия  $v_u$  при шлифовании ферритов [34].

При  $v_u > 8$  м/мин резко ухудшается чистота обработанной поверхности, удельный расход возрастает, а при  $v_u = 12$  м/мин на обработанной поверхности появляются следы дробления.

Таким образом, наиболее благоприятной является скорость стола  $v_u = 8$  м/мин.

В НИИалмазе [34] исследованы процессы алмазного шлифования и других неметаллических материалов. В табл. 11 приведены некоторые рекомендации по режи-

мам работы и характеристике кругов, вытекающие из этих исследований.

В табл. 11 для плоского шлифования приведены скорости продольного хода изделия  $v_u$ , поперечные подачи на ход стола  $s_{\text{поп}}$ , а для круглого шлифования — скорость вращения детали  $v_d$  и скорость продольного хода стола  $v_u$ . В последней графе таблицы показаны классы чистоты поверхности, которые получаются при рекомендуемых режимах резания.

При механической обработке неметаллических материалов часто одной из трудных операций является разрезка прутков или плит на отдельные заготовки. В этом случае с большим успехом могут быть применены алмазные отрезные круги. Этими кругами разрезают полупроводники (кремний, германий), стекло, керамику, корунд, гранит и другие материалы.

Алмазный отрезной круг состоит из корпуса — тонкого стального диска 1 (фиг. 34) и алмазонасного слоя на металлической связке. Алмазонасный слой может быть выполнен либо в виде сплошного кольца 2, либо в виде сегментов 3. Сегментные круги технологичнее в изготовлении, создают несколько лучшие условия для охлаж-

## Режимы резания и характеристики кругов при алмазном шлифовании неметаллических материалов

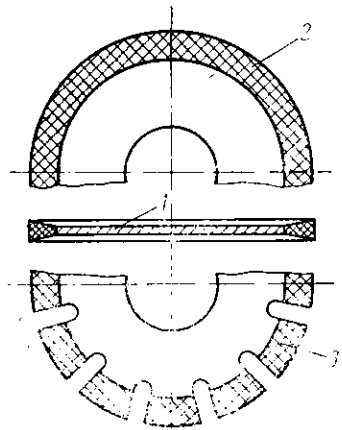
Обрабатываемый материал	Вид обработки	Круг	Режим резания					Чистота поверхности
			$v$ м/сек.	$v_{ch}$ м/мин.	$v_d$ м/мин.	$t$ мм	$S_{поп}$ мм/ход	
Магнито-стрикционные ферриты Силицированный графит	Плоское шлифование периферией круга Круглое шлифование периферией круга	A12 метал. связка, K=100%	27÷35	8	—	0,7	0,6	▽7—▽8
		То же A12—A25 метал. связка, K=100%	26	0,5÷0,6	45—75	0,01	—	▽7
Пьезокерамика	Плоское шлифование периферией круга		27÷35	15	—	0,5	0,5—1	—

дения инструмента и удаления отходов. Однако по прочности и устойчивости при малых размерах они уступают кругам со сплошным слоем.

Инструментальные заводы изготовляют отрезные круги толщиной от 0,1 до 2 мм и диаметром 30 ÷ 400 мм со сплошным режущим слоем и от 1,5 до 12 мм диаметром 200 ÷ 3500 мм — с сегментным.

В нашей стране отрезные круги малых размеров успешно применяются в машиностроении для резки различных неметаллических материалов, а больших размеров — в строительстве для резки гранита, бетона и др. [35].

Отрезные диски с алмазосодержащим слоем используются в ряде стран социалистического лагеря. В Польской Народной Республике, например, для разрезания твердых и хрупких материалов (кремния, различных кристаллов, корунда и др.) применяются диски диаметром 75—100 мм и толщиной 0,3 ÷ 0,4 мм. Отрезаются пластины толщиной в несколько десятых миллиметра. Используются круги зернистостью A16—A20; A12—A16; A10—A12 или A8—A10. Чем тверже разрезаемый материал, тем меньше размер зерна [36].



Фиг. 34. Алмазный отрезной круг; *вверху*—со сплошным алмазосодержащим слоем, *внизу*—с сегментным слоем.

Отрезные алмазные круги применяются в промышленности зарубежных капиталистических стран. Так, во Франции используются сегментные круги, в которых сегменты расположены несимметрично по отношению к толщине корпуса, а через один сдвинуты в сторону одного или другого торца. Получается нечто вроде пилы с разведенными зубцами, что улучшает течение процесса отрезки [37].

В США фирма Do All выпускает алмазные пильные ленты толщиной 0,5 мм. Алмазный слой нанесен на одну кромку металлической ленты [38].

В последнее время отечественной и зарубежной промышленностью освоено производство отрезных кругов с внутренней режущей поверхностью, то есть инструментов в виде колец, внутренняя поверхность которых содержит алмазоносный слой. Такие круги обеспечивают более высокую производительность, чем диски с наружной кромкой, так как они могут быть закреплены в соответствующей оправке и натянуты, как полотно, что обеспечивает большую устойчивость инструмента.

### ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ

В нашей стране успешно применяются электрохимические и электроэрозионные методы обработки изделий, авторами которых являются Б. Р. Лазаренко и В. Н. Гусев.

Электроабразивный метод, предложенный В. Н. Гусевым в 1951 году, отличается высокой производительностью, но не может конкурировать с алмазным шлифованием по качеству поверхности. Однако с появлением алмазных кругов на металлической связке возникла идея одновременно использовать преимущества электроабразивной обработки и алмазного шлифования. Так возник процесс, названный электроалмазной обработкой.

Его сущность [40] состоит в сочетании электрохимического растворения обрабатываемого материала (что обуславливает высокую производительность процесса) с механической обработкой алмазными зернами (что определяет высокое качество и точность изделий).

Схема процесса представлена на фиг. 35. Токпроводящий круг 1 укреплен на шпинделе 2. Шпиндель изолирован от станка неэлектропроводной опорой 3. Конец шпинделя через щетки 4 связан с источником тока 5, так что на круг подается отрицательный полюс тока. Положительный полюс источника 5 подключается к изделию 6, укрепленному тем или иным способом на столе станка. Через канал внутри шпинделя от насоса на разбрызгиватель 7 и оттуда в зону шлифования подается электролит следующего состава: нитрат натрия — 5%, фтористый натрий — 5%, нит-



рит натрия — 0,3%, вода — 89,7%.

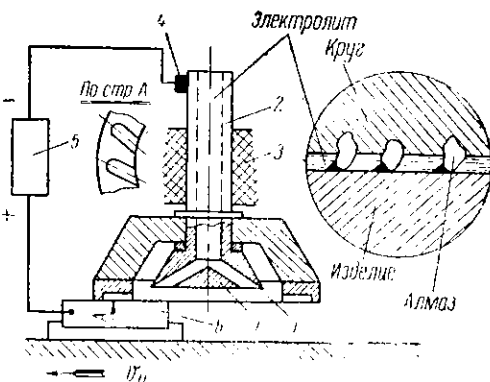
В месте касания круга с изделием происходит анодное растворение обрабатываемого материала, а алмазные зерна удаляют продукты растворения, снимая тонкий слой твердого сплава.

Электрические параметры цепи характеризуются низким напряжением  $4 \div 6$  в, но большой плотностью тока — до  $200 \text{ а/см}^2$ . Высокая плотность тока достигается благодаря малому зазору между токопроводящим кругом и изделием, равному высоте выступающих алмазных зерен и непрерывному обновлению процесса за счет интенсивного удаления прореагировавших продуктов и смены электролита в зоне обработки. Для обеспечения лучшей подачи электролита и удержания его на рабочей поверхности круга на последней делаются канавки глубиной (перпендикулярно к торцу) до 1 мм и шириной до 3 мм. Таких канавок, как показывают исследования, целесообразно делать от 30 до 70 шт. на круге диаметром 150—200 мм [40].

Рекомендуются круги зернистостью АС12—АС8 100%-ной концентрации. Поскольку при электроалмазной обработке срезание шлифуемого материала значительно облегчено, износ алмазного круга намного меньше, чем обычно. Исследования [40] показывают, что удельный износ круга при электроалмазной обработке лежит в пределах  $q=0,02 \div 0,2 \text{ мг/г}$ , а производительность процесса  $Q=100\text{—}200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

Сравнивая эти данные с показателями процесса обычного алмазного шлифования (см. фиг. 24), видим, что процесс электроалмазной обработки более производителен и экономичен. При  $v=20\text{—}25 \text{ м/сек}$ ,  $v_u=6 \text{ м/мин}$ , зернистости АС12,  $K=100\%$ , давлении круга  $4 \text{ кг/см}^2$ , напряжении 6 в, плотности тока  $70\text{—}80 \text{ а/см}^2$  и подаче электролита 6 л/мин можно получить обработанные поверхности чистотой  $\nabla 10\text{—}\nabla 11$ , что также выше, чем при обычной алмазной обработке кругами на металлической связке.

Процесс электроалмазной обработки еще недостаточно изучен, но перспективность его и прогрессивные начала, заложенные в электрохимической технологии, уже вполне ясны. Поэтому целесообразно рекомендовать машиностроительным предприятиям организовать модернизацию плоскошлифовальных станков под элек-



Фиг. 35. Схема процесса электроалмазной обработки. В круге (справа) — участок рабочей зоны.

троалмазную обработку и внедрять этот новый технологический процесс в производство.

## **АЛМАЗНАЯ ЗАТОЧКА И ДОВОДКА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

### **ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАТОЧНЫХ И ДОВОДОЧНЫХ РАБОТ В СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Одной из весьма эффективных областей применения алмазных кругов является заточка и доводка твердосплавных режущих инструментов. Режущие инструменты, оснащенные твердыми сплавами, широко применяются нашей промышленностью. Так, например, из общего количества резцов, потребляемых предприятиями Средне-Волжского совнархоза, более 70% оснащаются пластинами из разнообразных твердых сплавов.

Армирование инструментов твердыми сплавами позволяет, как известно, резко повысить производительность и снизить себестоимость операций по механической обработке изделий. Однако работоспособность твердосплавного инструмента зависит не только от высоких режущих свойств твердого сплава. В значительной степени она зависит от геометрии заточки и шероховатости режущих поверхностей. Можно было бы привести ряд примеров из опыта работы предприятий, когда правильно запроектированный твердосплавный инструмент практически не дает ожидаемого эффекта только вследствие того, что в процессе изготовления (и особенно заточки и доводки) имели место недопустимые отклонения от требований чертежа как по геометрии лезвий, так и по чистоте режущих поверхностей инструмента.

Технический уровень заточных и доводочных операций на ряде машиностроительных заводов все еще невысок. Заточка и доводка твердосплавных резцов, как правило, делается вручную. Уровень механизации заточных станков и приспособлений, применяемых на машиностроительных заводах для других типов и инструментов (фрезы, зенкеры и т. д.), также невысок.

В связи с этим, как правило, отклонения фактических углов заточки от углов, заданных чертежом, у значительного количества инструментов лежат за пределами целесообразных допусков. Проверка, проведенная Научно-производственной инструментальной лабораторией (НПИЛ) на ряде куйбышевских предприятий, показала, например, что при ручной заточке и доводке разброс геометрии резцов по задним углам на отдельных предприятиях лежит в пределах  $5\div 8^\circ$ , а иногда отклонения достигают и  $10^\circ$ .

Между тем исследования и опыт работы показывают, что из-

менение главного заднего угла на  $3\div 5^\circ$  может привести к изменению стойкости инструмента в  $2\div 3$  раза, особенно при обработке легированных материалов.

Такое положение с заточными работами сложилось в промышленности главным образом потому, что при обработке твердых сплавов производители ориентировались целиком на абразивные инструменты — карборундовые круги и доводочные пасты из карбида бора. Абразивная же заточка кругами КЗ затрудняет механизацию заточных работ по трем основным причинам: 1) большой расход абразивов и, следовательно, быстрая потеря кругом первоначального размера, вызывающая необходимость создания сложных механизмов, компенсирующих износ круга при машинной заточке; 2) невысокая производительность машинной заточки, более низкая, чем при ручной заточке инструмента на точилах; 3) наличие трещин на режущих поверхностях твердосплавных пластин при жестком закреплении инструмента.

Последнюю причину оказалось возможным в значительной мере устранить путем применения упругого закрепления твердосплавных инструментов при абразивной заточке [15, 39].

Новые возможности и перспективы поднятия уровня механизации заточных и доводочных работ открываются в связи с применением алмазных кругов. Из раздела «Алмазные шлифовальные инструменты» видно, что линейный износ алмазных кругов, особенно на металлической связке, весьма невелик. Так, например, по данным НИИЛ при плоском шлифовании пластин из ВК8 торцом круга и производительности процесса  $Q=13,5$  мм<sup>3</sup>/мин удельный износ абразива КЗ40СМ1К составил  $q=1010$  мг/г, а алмаза —  $q'=0,88$  мг/г. Удельный вес абразива составляет примерно 2 г/см<sup>3</sup>. Значение  $q'$  характеризует лишь расход алмазов, и, чтобы учесть изменение объема круга в целом, эта величина должна быть пропорционально увеличена. Следовательно, на съем 1 мм<sup>3</sup> твердого сплава расходуется при равной производительности процесса  $W_k=7,3$  мм<sup>3</sup> карборундового круга и  $w_a=0,03$  мм<sup>3</sup> алмазного на бакелитовой связке. При шлифовании 100 шт. пластин из ВК8 размером  $12\times 8$  мм<sup>2</sup> (если с каждой удаляется по 0,2 мм) алмазный чашечный круг размерами АЧК  $125\times 10\times 3$  износится по торцу на 0,016 мм. Абразивный круг аналогичного размера при выполнении той же работы износится на 4 мм.

Как видно, линейный износ алмазного круга на бакелитовой связке в 250 раз меньше, чем абразивного. Еще меньшим окажется износ круга на металлической связке.

Следовательно, необходимость в устройствах, корректирующих установку затачиваемого инструмента, в связи с износом алмазного круга практически отпадает.

Производительность процесса алмазной обработки твердых сплавов также достаточно высока.

Таким образом, есть вполне реальные возможности с помо-

щью алмазных инструментов поднять общий уровень культуры и механизации инструментального производства. Только при такой постановке дела могут быть эффективно использованы на практике все драгоценные свойства алмазных инструментов.

Из изложенного вытекают следующие организационно-технические мероприятия, способствующие применению алмазных кругов для заточки и доводки твердосплавных инструментов.

**Централизация заточки, переточки и доводки инструментов.** Это является одним из важнейших и безусловно необходимых мероприятий. Централизация позволяет выделить для алмазной обработки специализированное оборудование, наладить пооперационную заточку и доводку режущих поверхностей, создать условия для эффективного применения приспособлений и устройств, механизмирующих процессы обработки инструментов.

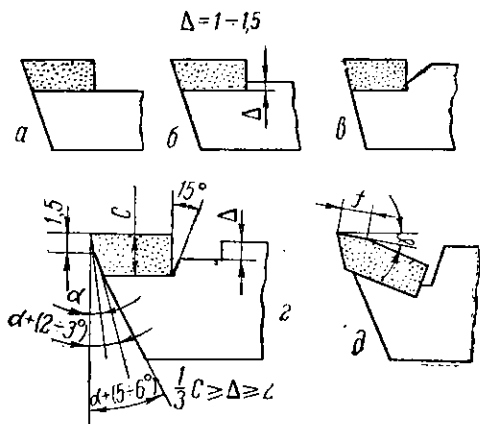
Опыт показывает, что даже в условиях мелкосерийного выпуска продукции, при большой номенклатуре инструментов централизация заточки и переточки инструментов в специальных отделениях при механических цехах или в заточном отделении инструментального цеха экономически целесообразна.

При централизации заточки в условиях мелкосерийного производства может быть использован опыт киевского завода «Большевик» [41]. На этом заводе большинство станочников имеет в своих инструментальных тумбочках набор необходимого твердосплавного инструмента. Получив от мастера задание на следующий день, станочник отбирает необходимый для предстоящей работы инструмент и укладывает его в специальный контейнер. Для каждого токаря, расточника, карусельщика или бригады станочников на заводе изготовлены такие контейнеры для транспортировки режущего инструмента от рабочего места в заточное отделение и обратно. Контейнер с набором инструментов рабочий сдает в заточное отделение. Придя на работу на следующий день, станочник получает в заточном отделении свой контейнер с инструментом, обработанным алмазными кругами.

При такой форме организации алмазной заточки и доводки в цехах обходятся без инструментальных кладовых (имеются лишь пункты обмена сработавшего инструмента на новый).

**Пересмотр конструкций и геометрии, сокращение номенклатуры режущих инструментов.** Алмазная обработка требует внесения некоторых изменений в конструкцию и геометрию режущих инструментов. Это прежде всего вызвано отсутствием в данное время алмазных кругов, которые могли бы одновременно обрабатывать материал режущей пластинки (твердый сплав) и державки (конструкционная сталь). При одновременной обработке пластинки из твердого сплава и стальной державки алмазные круги засаливаются, перегреваются и интенсивно изнашиваются. Поэтому в геометрию инструментов должны быть внесены изменения, обеспечивающие свободную обработку твердосплавной пластины алмазным кругом.

При заточке и доводке передних граней инструментов одним из путей в этом направлении может быть применение свободной припайки твердосплавной пластины. Еще в 1957 году автором с сотрудниками НПИЛ была предложена конструкция резцов (фиг. 36, а), в которых режущая пластина припаяется не в закрытый паз, а свободно [42]. В дальнейшем конструкция паза под пластину из соображений технологичности была усовершенствована (фиг. 36, б) [39]. При свободной припайке пластины улучшаются условия заточки передней грани, так как затачивающий круг соприкасается только с твердым сплавом, что снижает засаливание круга и вероятность появления трещин при заточке. Это полностью относится и к заточке передней поверхности инструментов алмазными кругами.



Фиг. 36. Методы конструирования режущей части инструментов, обеспечивающие при заточке соприкосновение алмазного круга только с твердосплавной пластиной.

Однако в упомянутых выше работах было показано, что свободная припайка пластины имеет не только это преимущество. Резцы со свободной припайкой по сравнению с обычными резцами имеют уменьшенную поверхность для отдачи тепла в державку инструмента, но увеличенную — для отдачи тепла путем конвективного теплообмена с охлаждающей средой. Расчеты показывают, что интенсивность отдачи тепла в местах стыка пластинки с державкой путем теплопроводности значительно меньше, чем интенсивность теплоотдачи конвективным теплообменом с жидкостью. Увеличение размеров поверхности, отдающей тепло охлаждающей среде, приводит к снижению температуры резания и повышению стойкости инструмента.

Свободная припайка снижает напряжения в пластине, так как последняя подвергается деформации при остывании после пайки только за счет припоя по одной поверхности, а не по двум, как это имеет место при обычной (закрытой) форме паза.

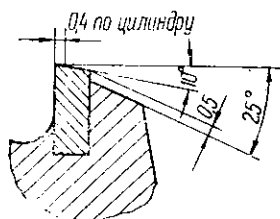
Таким образом, свободная припайка твердосплавных пластин целесообразна как с точки зрения технологичности при абразивной и алмазной заточке, так и с точки зрения повышения стойкости инструмента в работе. Поэтому ряд предприятий в последние годы успешно применил свободную пайку пластин.

На фиг. 36,в показана форма гнезда под пластину, принятая на Государственном подшипниковом заводе им. Куйбышева, а на

фиг. 36, г — рекомендуемая Горьковским автозаводом [24] для инструментов, затачиваемых алмазами.

При невозможности по тем или иным причинам применить свободную пайку, в частности, при работе без охлаждения, когда свободная пайка ухудшает теплоотвод от режущей пластины, может применяться двойная передняя грань (фиг. 36, д). Алмазной обработке в этом случае подвергается лишь площадка длиной  $f$ , державка при заточке не шлифуется. Двойную переднюю грань целесообразно применять и в других случаях, при любом виде крепления твердосплавной пластины к инструменту, так как это содействует повышению производительности заточки и снижению расхода алмазов.

При заточке задних поверхностей инструментов обеспечение рациональных условий работы алмазных кругов достигается либо свешиванием пластины над державкой, либо увеличенными задними углами на корпусе инструмента, либо тем и другим вместе. Свешивание пластины над державкой для резцов показано на фиг. 36, д. Оно применимо и к многолезвийным инструментам. Для разверток, например, рекомендуется геометрия зуба, показанная на фиг. 37 [24], где пластина свешивается над корпусом на 0,5 мм.



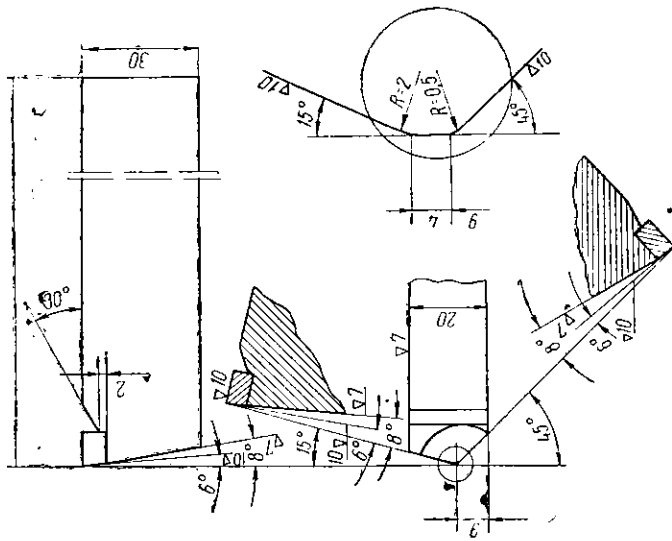
Фиг. 37. Конструкция зуба развертки с твердосплавной пластиной.

Однако свешивание пластины не всегда может быть допущено по условиям работы инструмента, например, для случаев со значительными сечениями среза, когда усилия резания могут привести к открашиванию пластины.

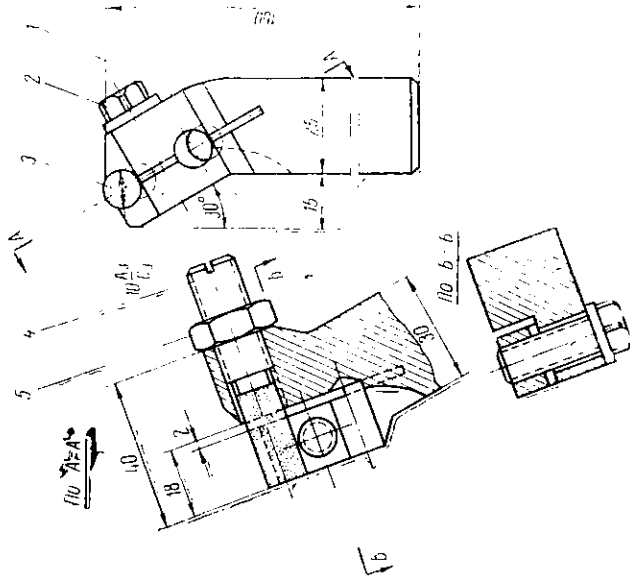
Более универсальным является способ защиты алмазного круга от касания с державкой, показанный на фиг. 36, г. При переточке таких инструментов

следует предварительно подтачивать абразивом державку под углом  $\alpha + (5 \div 6)^\circ$ , а затем уже обрабатывать алмазным кругом твердосплавную пластинку.

Сокращение размеров поверхностей, обрабатываемых алмазными кругами, и изоляция твердого сплава от державки при заточке инструментов могут быть достигнуты также путем перехода от пайки к механическому креплению твердосплавных пластин. Это прогрессивное направление в конструировании инструментов при алмазной обработке дает особый эффект. В частности, успешно могут быть применены резцы с твердосплавными пластинами типа столбиков, расположенных вертикально или горизонтально. На фиг. 38 показан проходной резец, применяющийся на Государственном подшипниковом заводе им. В. В. Куйбышева для обточки колец на станках МР5. На фиг. 39 приведена конструкция резца с вертикальным столбиком, предназначенного для замены этого проходного резца. Столбик диаметром 10 мм зажимается в пружинной державке и получает задний угол за счет установки. Пе-



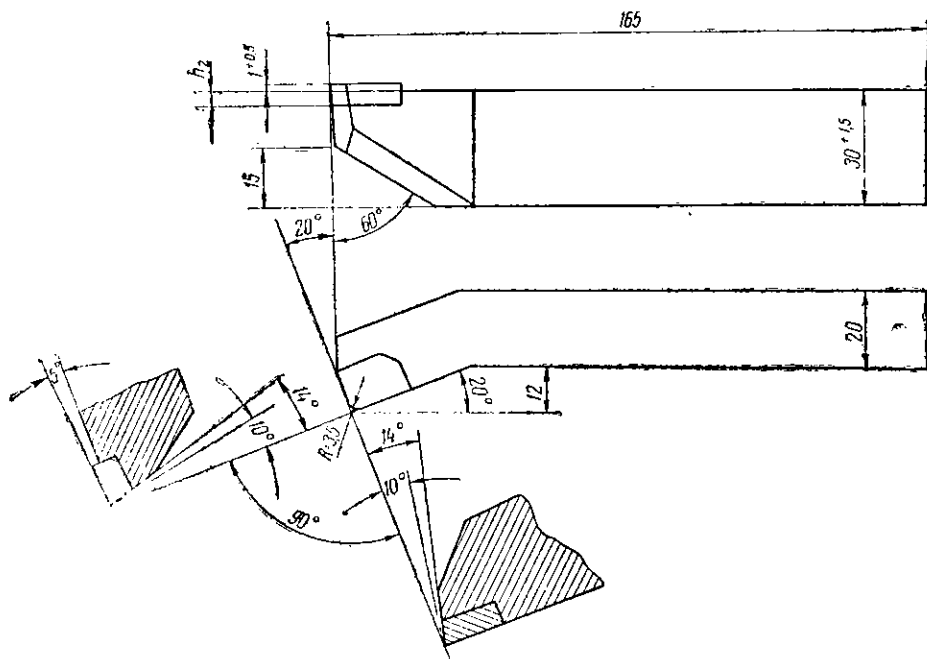
Фиг. 38. Проходной резец для обточки подшлипниковых колец на станках МР5 (завод им. Куйбышева).



Фиг. 39. Резец с вертикальным столбиком, заменяющий проходной резец по фиг. 38.

редний угол может быть получен заточкой торца столбика по плоскости, наклонной или перпендикулярной его оси. При  $\gamma = -\alpha$  торец затачивается перпендикулярно оси столбика.

На фиг. 40 приведен резец для расточки подшипниковых колец, применяемый на том же заводе. Заменяющий резец со столбиком,



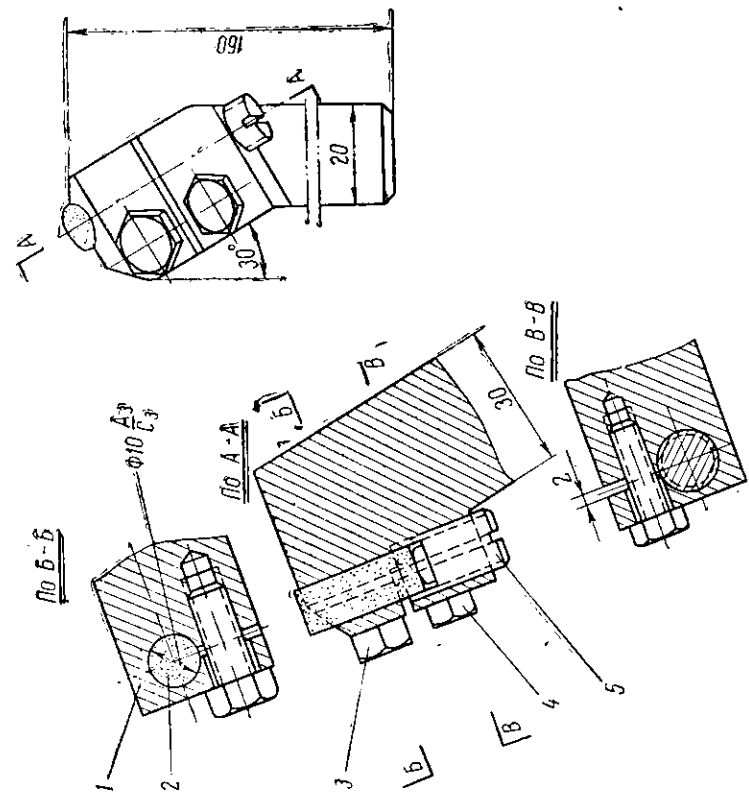
Фиг. 40. Резец для расточки подшипниковых колец на станках МР5 (завод им. Куйбышева).

расположенным горизонтально, показан на фиг. 41. Здесь заточке подвергается только задняя поверхность резца, то есть торец столбика. При  $\gamma = -\alpha$  торец затачивается перпендикулярно оси столбика.

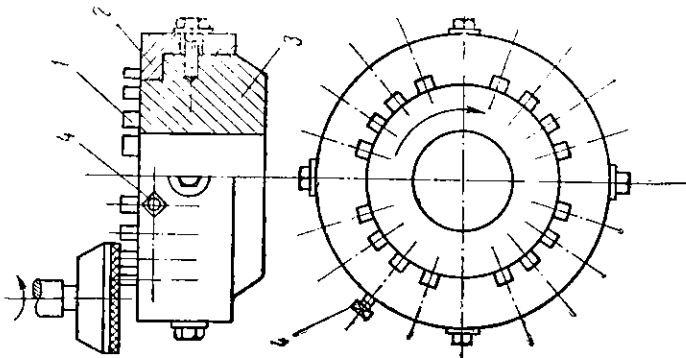
Горизонтальное расположение столбика во втором случае выбрано преимущественно потому, что державка с пластиной помещается внутри обрабатываемой поверхности кольца. Кроме этого, как показывают испытания, выполненные сотрудником НИИЛ И. Я. Козыным, резцы с цилиндрической передней поверхностью создают более благоприятные условия резания с точки зрения усилий и чистоты обработанной поверхности.

Преимущества столбиковых резцов очевидны. Замена режущих элементов может производиться без снятия державок со станка, а сами эти элементы — столбики — однотипны и удобны в заточке. Цилиндрическая поверхность столбиков обрабатывается шлифоваль-





Фиг. 41. Резец с цилиндрической передней поверхностью и горизонтальным столбиком, заменяющий расточной резец по фиг. 40.



Фиг. 42. Приспособление для заточки твердосплавных столбиков (ГАЗ):

1—затачиваемые столбики; 2—направляющее кольцо с гнездами; 3—корпус; 4—заточиваемые болты (по числу столбиков).

нием только один раз — при изготовлении столбика, или совсем не обрабатывается. Переточка же производится только по торцу, причем алмазный круг работает лишь по твердому сплаву.

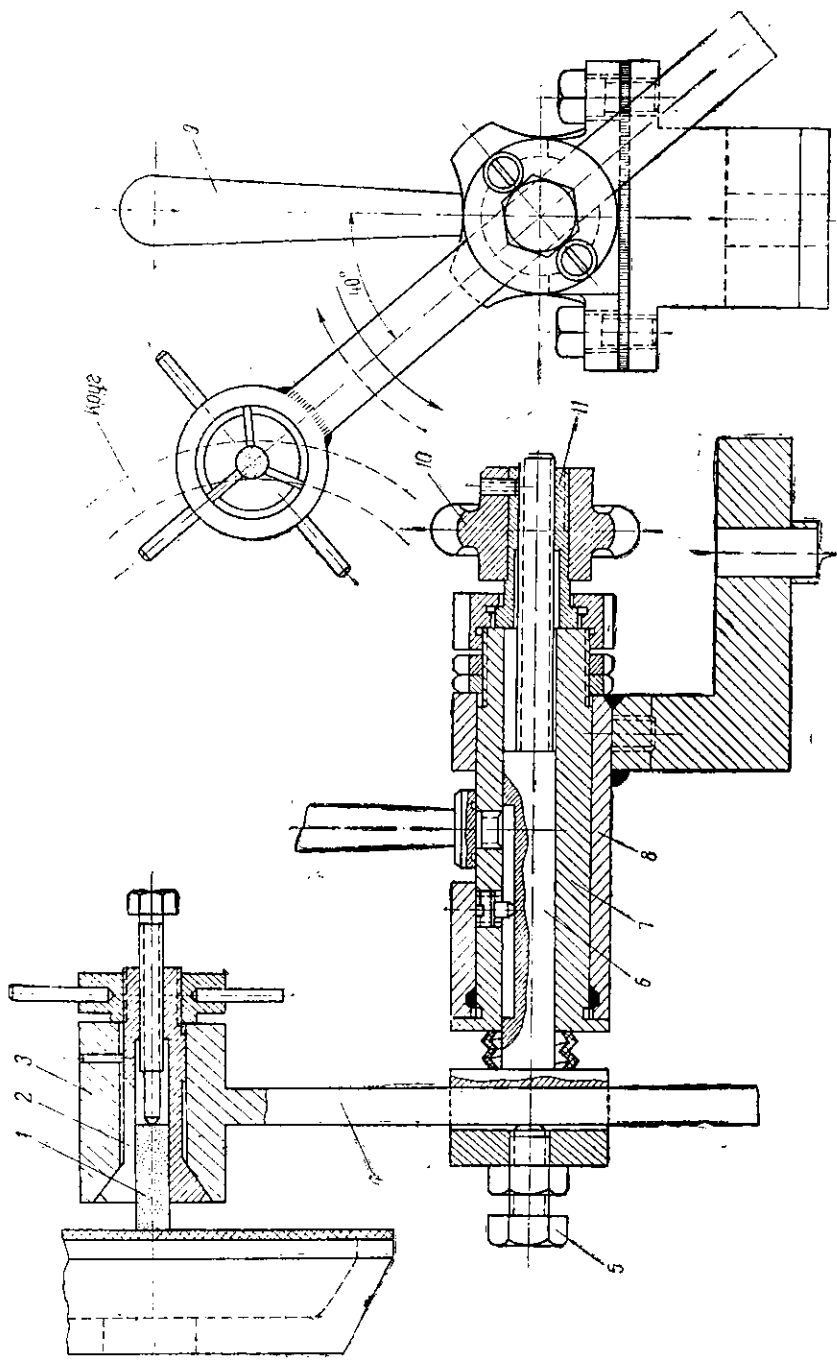
Ввиду однотипности режущих элементов легко может быть проведена механизация заточных и доводочных операций.

На фиг. 42 показана схема приспособления для алмазной обработки твердосплавных столбиков квадратного сечения конструкции ГАЗ [43]. Применение для этой операции алмазных кругов А12, К=100% на металлической связке способствовало повышению производительности процесса заточки и доводки, получению чистоты обработанной поверхности столбика  $\nabla 9$ — $\nabla 10$ . Стойкость резцов повысилась в 1,5—2 раза.

Наглядным примером эффективности столбиковых резцов является результат их внедрения в практику производства ордена Ленина завода «Автотрактородеталь». Проточка седла клапана на этом заводе выполнялась ранее обычным резцом, оснащенным припаянной твердосплавной пластинкой. По предложению сотрудника НИИЛ В. А. Данченко предприятие применило державки с вертикальными столбиками из твердого сплава Т15К6. В результате исследования и длительного опыта работы столбиковыми резцами установлено, что стойкость инструмента резко возросла. Практически резец—столбик за счет заточки и четырех поворотов вокруг оси без вытаскивания его из державки работает полную смену. В связи с этим возрос фактический съем изделий со станка, так как сократилось время на подналадку инструмента. Только за счет времени на замену и подналадку инструмента предприятие экономит в год 1917 часов, то есть 274 человеко-смены. Годовой расход резцов с 5548 шт. (с напайной пластинкой) сократился до 651 шт. (столбиков).

Заточка и доводка столбиков на заводе «Автотрактородеталь» производится централизованно в простом приспособлении, разработанном НИИЛ (фиг. 43). Столбик 1 с помощью цанги 2 закрепляется в головке приспособления 3. Головка заканчивается балкой 4. Регулируя вылет балки и закрепляя последнюю на оси 6 с помощью болта 5, можно обеспечить различную жесткость закрепления столбика при заточке. Ось 6 имеет возможность перемещаться по отношению к шпинделю 7 только продольно, поворачиваясь вместе с ним в корпусе 8. Этот поворот (качание) осуществляется рукояткой 9 и обеспечивает прохождение торца столбика по торцу круга. Подача столбика на круг осуществляется маховичком 10 и гайкой 11, сидящей на конце оси 6.

Применение столбиковых резцов является одним из способов сокращения номенклатуры инструментов, подлежащих заточке и переточке. Сокращение же номенклатуры с целью повышения размеров партий и производительности заточных операций является одним из важных организационно-технических мероприятий при внедрении в производство алмазных шлифовальных кругов.



Фиг. 43. Приспособление для заточки твердосплавных столбиков.

**Подготовка оборудования и механизация заточных работ.** Важнейшим условием успешного применения алмазных инструментов является надлежащая подготовка оборудования. Алмазная обработка предъявляет к заточным и доводочным станкам повышенные требования в отношении точности, виброустойчивости и степени механизации.

Точность заточных станков должна быть такова, чтобы обеспечить биение поверхностей круга, не выходящее за пределы 0,02 мм. Поэтому для нормальной эксплуатации шпиндели таких станков должны иметь биения в пределах согласно таблице 12.

Таблица 12

Осевое и радиальное биение шпинделей заточных станков, применяемых для алмазной обработки инструмента

Способ шлифования	Биение, мм	
	осевое	радиальное
Торцом круга . . . . .	0,003 ÷ 0,005	0,005 ÷ 0,008
Периферией круга . . . . .	0,005 ÷ 0,008	0,003 ÷ 0,005

Требования к виброустойчивости таковы, что амплитуда колебания шлифовальной бабки относительно изделия не должна превышать 0,008 ÷ 0,001 мм [44]. В связи с этим на станке должны быть тщательно отбалансированы быстровращающиеся детали (шпиндели и др.). Двигатели станков, предназначенные для алмазной заточки, должны иметь смещение центра тяжести ротора от оси не более 0,004 ÷ 0,008 мм.

Жесткость шпиндельной группы, измеренная относительно стола станка, должна быть не менее 800 кг/мм.

Основные движения станка — продольная подача стола и поперечная подача должны осуществляться не вручную, а механическим путем. Станки должны иметь систему для подвода охлаждающей среды.

Нетрудно видеть, что подавляющее большинство заточных и доводочных станков, предназначенных для абразивной обработки инструмента, не удовлетворяют поставленным выше требованиям. Только небольшое количество станков типа С-194, давно применяемых в часовой промышленности и рассчитанных на алмазную обработку резцов, удовлетворяют требованиям по точности и виброустойчивости, но не удовлетворяют требованиям механизации движений — перемещение инструмента при заточке здесь делается вручную.

В связи с этим положением план оргтехмероприятий по подготовке оборудования к работе алмазными кругами должен содержать по крайней мере два этапа. Первый этап состоит в простей-

шей модернизации наличного парка заточных и доводочных станков. Здесь прежде всего должна быть произведена модернизация шпинделей станков (повышена точность, жесткость и виброустойчивость). Заметим, что Витебский завод заточных станков серийно выпускает модернизированные для алмазного шлифования головки к универсально-заточным станкам типа ЗА64М.

Опыт НПИЛ и отдельных предприятий Средне-Волжского СНХ показывает, что на первом этапе часто можно ограничиться надлежащей отладкой и регулировкой универсальнозаточных станков без их модернизации.

Завершение первого этапа позволит предприятию начать работу по применению алмазных кругов для заточки и доводки твердосплавных инструментов с закреплением последних в простых приспособлениях или с опорой на подручники.

Однако надо иметь в виду, что первый этап никак не исчерпывает всей работы предприятия по использованию алмазных кругов. Наоборот, этот этап является лишь начальным, подготовительным, по окончании которого, а еще лучше и в период его завершения следует приступить ко второму этапу подготовки оборудования. Здесь необходимо готовить и проводить модернизацию заточных станков, механизировав продольную и поперечную подачу стола, разрабатывать конструкции многоместных приспособлений с гидравлическим или пневматическим зажимом заточиваемого инструмента. Такого типа модернизация универсально-заточных станков ЗА64 и ЗА64М может осуществляться по типовому проекту ЭНИМСа. Аналогичный проект разработан Куйбышевским НИПТИМАШем. Более простая система модернизации с использованием приставной гидрокоробки для продольного хода стола и храпового механизма для поперечной подачи разработана на ордена Ленина Четвертом Государственном подшипниковом заводе.

Одновременно с модернизацией наличного парка следует оснащать производство современными заточными и доводочными станками, например, типа ЗБ642 и 3642. Первый из них имеет гидравлическое перемещение стола со скоростью  $0,2 \div 8$  м/мин, гидрофицированные приспособления, позволяющие автоматизировать заточку ряда инструментов. Число оборотов алмазного круга регулируется бесступенчато в пределах от 1300 до 6500 оборотов в минуту. Имеется механизм толчковой поперечной подачи.

Мукачевский станкостроительный завод выпускает полуавтомат для заточки резцов типа 3624. Шлифовальный круг на этом станке упруго поджат, что позволяет осуществлять нежесткую заточку инструмента. Как при абразивной, так и при алмазной обработке такая заточка снижает напряжения в твердосплавной пластине и устраняет возможность появления трещин.

Подготовка оборудования и приспособлений, механизировавших и автоматизировавших процесс заточки, переточки и доводки инструментов, осуществляемая на втором этапе, позволит наиболее

полно и эффективно использовать алмазные круги в производстве.

**Обеспечение сохранности кромок инструмента после алмазной обработки.** После алмазной заточки и доводки режущие поверхности инструмента получаются чистыми, а режущие кромки — весьма острыми. В связи с этим возникает серьезная задача — доставить инструмент к рабочему месту в том состоянии, в котором он получен после заточки и доводки, без каких-либо повреждений режущих элементов в результате транспортировки. Безусловно, не допускается транспортировка и хранение инструментов «навалом» в ящиках или тележках, так как при этом часть инструмента неизбежно повреждается.

Сохранность режущих кромок инструмента от повреждений при транспортировке может достигаться одним из следующих способов: 1) созданием специальных контейнеров с расположением инструмента в гнездах; 2) применением специальных футляров; 3) покрытием режущих элементов защитными пленками.

Деревянные, а еще лучше пластмассовые контейнеры надежно обеспечивают сохранность инструментов. Однако они, как правило, занимают много места, в связи с чем неудобны для хранения в кладовых.

Специальные футляры занимают меньше места и в ряде случаев оказываются удобными. Так, например, на московском автомобильном заводе им. Лихачева зенкеры, развертки и другие хвостовые инструменты после алмазной обработки помещают либо в специально сшитые футляры из плотной ткани, либо в куски трубок из хлорвинила или другой пластмассы.

Надежную сохранность режущих кромок обеспечивает покрытие инструмента защитными пленками [45]. Защитное пленочное покрытие готовят из следующих компонентов по весу: веретенное масло № 2—53%, дибутилфталат неокислый — 20%, этилцеллюлоза — 27%.

Веретенное масло и дибутилфталат отвешивают в необходимых количествах, выливают в сосуд (ванну), в котором готовят состав, и затем нагревают вместе с ванной до 110—120°. В случае вспенивания масла выдерживают при этой температуре до полного удаления влаги (прекращения вспенивания). Затем жировую смесь нагревают до 160° и при этой температуре небольшими порциями засыпают этилцеллюлозу, непрерывно помешивая. При введении последней порции этилцеллюлозы температуру смеси повышают до 180—190° и выдерживают в течение 30 минут. Теперь расплав готов к работе.

Ванну, в которой готовят расплав, делают сварной с электрообогревом, над ней устанавливают вытяжную вентиляцию.

Заточенный и доведенный инструмент медленно погружают рабочей частью на 2—3 секунды в расплав и так же медленно вынимают из него. На инструменте образуется защитная пленка, толщина которой зависит от массы инструмента, его температуры и времени погружения — выгружения. Тонкая пленка защищает

режущие поверхности от повреждения. Кроме этого, при образовании пленки на покрываемых поверхностях выделяются смазочные вещества, которые дополнительно защищают грани инструмента от коррозии.

Простое устройство для консервации с помощью защитных пленок резко снижает повреждение инструментов при транспортировке. Пленка удаляется автоматически при первом же соприкосновении инструмента с обрабатываемым изделием.

### АЛМАЗНЫЕ КРУГИ И РЕЖИМЫ ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ ЗАТОЧНЫХ И ДОВОДОЧНЫХ РАБОТ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Опыт предприятий и научно-исследовательских учреждений позволяет дать некоторые рекомендации по применению алмазных кругов и режимам работы при заточке и доводке режущих инструментов. В табл. 13 приведены такие рекомендации по данным ВНИИ [19].

Таблица 13

Выбор основных параметров алмазных кругов и режимов работы при заточке и доводке твердосплавного инструмента

Технологические операции	Заточка		Доводка
Параметры кругов и режима			
Связка . . . . .	Металлическая	Бакелитовая	Бакелитовая
Зернистость . . . . .	АС16—АС8	АС16—АС8	АС8—АСМ40
Концентрация, % . . . . .	100	50÷100	50
Режим работы:			
скорость круга $v$ м/сек. . . . .	18÷25	25÷30	25÷35
продольная подача			
$v_n$ м/мин. . . . .	0,5÷1,5	0,5÷1,5	0,2÷0,6
глубина резания $t$ мм . . . . .	0,04÷0,015	0,02÷0,015	0,01÷0,005
Чистота поверхности . . . . .	▽8÷▽9	▽8÷▽9	▽9÷▽11

Украинский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт синтетических сверхтвердых материалов и инструмента рекомендует при работе на заточных станках типа ЗА64М иметь один из двух наборов алмазных кругов [46]. Набор № 1 предназначается для предприятий, где твердосплавный инструмент применяется широко, в большом разнообразии конструкций, типов и размеров. Он состоит из восемнадцати кругов, форма и размеры которых приведены в табл. 14 (по два-три круга). Набор № 2 предназначается для тех

предприятий, где номенклатура и количество твердосплавных инструментов невелики. Второй набор состоит из десяти алмазных кругов. Зернистость кругов выбирается в основном в зависимости от требований, предъявляемых к чистоте затачиваемых и доводимых поверхностей инструмента.

Таблица 14

Комплекты кругов для алмазной заточки и доводки инструментов  
(по данным УкрНИИСМИ)

Назначение	Набор № 1	Набор № 2
Круглое наружное шлифование чашечных резцов, зенкеров, разверток, сверл, протяжек, фрез, фрезерных и расточных головок, плавающих расточных пластин	АПП150×10×3×32	АПП150×10×3×32
Заточка, доводка фасок на передней и задней поверхностях резцов, фрез, фрезерных и расточных головок, расточных пластин, заточка заборных конусов зенкеров, разверток, шпоночных, квадратных и плоских протяжек	АЧК125×5×3×32 АЧК125×10×3×32 АЧК150×10×3×32	АЧК125×5×3×32
Заточка передней поверхности зенкеров, разверток, фрез, протяжек, расточных головок, плавающих расточных пластин	АТ125×3×1,5×32 АТ125×5×1,5×32 А2Т125×3×1,5×32	АТ125×3×1,5×32 А2Т125×5×1,5×32
Заточка и доводка передней поверхности многолезвийного инструмента со спиральным зубом	А3Т125×5×1,5×32	А3Т125×5×1,5×32

Вопросам выбора параметров круга и режимов работы был посвящен целый ряд испытаний, выполненных на многих промышленных предприятиях г. Куйбышева. Рассмотрим, например, слиты работы ордена Ленина Четвертого Государственного подшипникового завода, где значительная часть твердосплавных инструментов переведена на заточку и доводку алмазными кругами. Внедряя алмазную обработку, работники завода прежде всего определили наиболее выгодные условия заточки и доводки инструментов алмазами. Был изучен удельный расход алмазов при заточке резцов из различных материалов. Результаты этих испытаний приведены в табл. 15. Заточка выполнялась на модернизированном универсально-заточном станке ЗА64М кругом АЧК 125×10×3×32—АС8Б1—50—24. Круг периодически смазывался веретенным маслом № 2 и после обработки каждых 25 резцов чистился пемзой.



Влияние материала режущего инструмента и режима резания на удельный расход алмазов и чистоту обработанной поверхности при заточке резцов

Материал режущего инструмента	Режим резания			Удельный расход $q$ , мг/г	Чистота обработки	
	$v$ , м/сек.	$v_n$ , м/мин.	$t$ , мм		$R_z$ , мк	класс
Т14К8 . . . . .	24,8	7,2	0,010	0,43	0,5÷0,7	г 10
	24,8	7,2	0,015	0,70	0,6÷0,8	г 10÷г 9
	24,8	7,2	0,020	1,23	0,8÷1,0	г 9
	13,0	7,2	0,015	1,60	0,76	г 10
	40,8	7,2	0,015	1,9	0,70	г 10
ВК8 . . . . .	24,8	7,2	0,015	1,20	0,9÷1,0	г 9
Т5К10 . . . . .	24,8	7,2	0,015	1,78	1,0÷1,1	г 9
Р18 . . . . .	24,8	7,2	0,015	4,00	0,9÷1,0	г 9
Р10К5Ф5 . . . . .	24,8	7,2	0,015	4,00	0,9÷1,0	г 9

Как видно из этих данных, при работе алмазными кругами зернистостью АС8 может быть получена чистота режущих поверхностей инструмента в пределах девятого-десятого класса.

Удельный расход алмазов больше для вязких сплавов (Т5К10, ВК8) и для более напряженных режимов работы. Обращает на себя внимание тот факт, что изменение скорости круга  $v$  неоднозначно влияет на расход алмазов.

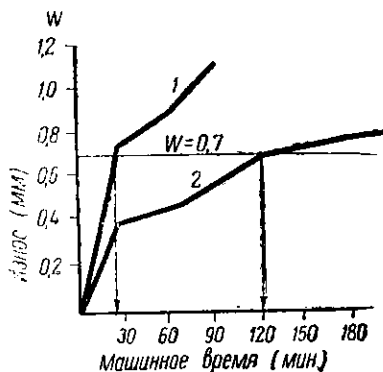
Вначале, при переходе от  $v=13$  м/сек к  $v=24,8$  м/сек, расход резко снижается от  $q=1,6$  мг/г до  $q=0,7$  мг/г. Дальнейшее увеличение скорости круга до  $v=40,8$  м/сек вновь вызывает увеличение удельного расхода алмазов до  $q=1,9$  мг/г. Причины этого явления рассматривались нами выше в разделе «Алмазные шлифовальные инструменты».

Интересно, что алмазными кругами можно получить достаточно высокую чистоту поверхности при заточке резцов из быстрорежущих сталей Р18 и Р10К5Ф5, но расход алмазов здесь в 3,5÷5 раз выше, чем при заточке твердосплавных инструментов. По-видимому, следует и далее работать над исследованием алмазной технологии применительно к быстрорежущим инструментам, тем более, что в отдельных случаях получена значительная эффективность алмазной обработки этих инструментов. Так, например, алмазная доводка спиральных сверл алмазными кругами АС6 дала очень хорошие результаты на киевском заводе «Большевик» [41] — стойкость сверл повысилась в два-три раза. На этом же заводе алмазная доводка плавающих ножей и профильных резцов из быстрорежущей стали позволила в несколько раз повысить стойкость инструментов. На машиностроительных предприятиях Средне-Волжского совнархоза успешно применяется алмазная обработка зуборезных долбляков из сталей Р18 и Р10К5Ф5.

Поскольку мы уже затронули вопрос об эффективности алмазной заточки и доводки режущих инструментов, остановимся на нем подробнее. Опыт предприятий показывает, что твердосплавные

инструменты, обработанные алмазными кругами, имеют в 1,5÷5 раз большую стойкость, чем заточенные и доведенные обычными способами. Сошлемся, например, на опыт того же 4ГПЗ. Производственные наблюдения за работой твердосплавных резцов сложного профиля позволили установить, что стойкость инструмента при алмазной обработке повысилась в 1,5-3 раза, а расход этих инструментов снизился примерно в 2 раза. Все резцы с алмазной заточкой имели нормальный износ без выкрашивания и сколов. (Обратим внимание на этот факт, зафиксированный в производстве, так как он понадобится нам в дальнейшем).

Аналогичный результат получен и в исследованиях, выполненных НИИЛ. На фиг. 44 приведены графики, характеризующие износ по задней поверхности резцов с



**Фиг. 44.** Износ по задней поверхности твердосплавных резцов, заточенных кругом К325СМ1К и доведенных:

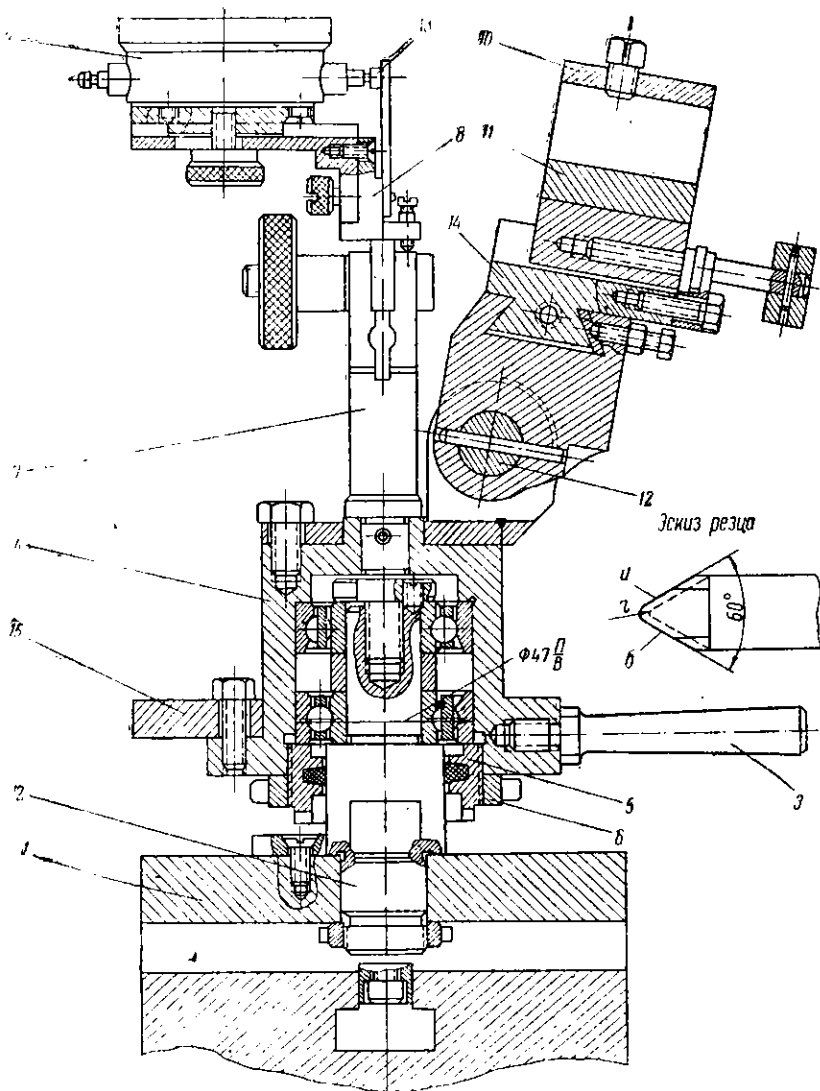
1 — пастой с карбидом бора; 2 — алмазным кругом.

нос по задней поверхности резцов с пластиной Т14К8 при токарной обработке стали ШХ15 со скоростью резания 60 м/мин, подачей 0,6 мм/об и глубиной резания 1,4 мм. Резцы предварительно затачивались кругами К325СМ1К, а затем доводились либо пастой с карбидом бора, либо алмазным кругом зернистостью АС5 с концентрацией 50%, на связке Б1. Как видно, резцы, доведенные карбидом бора (линия 1, фиг. 44), изнашиваются интенсивнее, чем резцы, доведенные алмазным кругом (линия 2). Износ в 0,7 мм резцы, доведенные карбидом бора, получали через 30 мин. машинного времени, а обработанные алмазом — через 120 мин. Изделия с поверхностью в пределах четвертого

класса чистоты в первом случае можно было получать в течение 44 мин., а во втором — 93 мин. машинного времени.

Приведем еще один пример. На Средневолжском станкостроительном заводе одним из лимитирующих инструментов были резцы, применяемые для скоростного многопроходного нарезания резьб на станках КТ38. Для получения надлежащего качества резьбы и стойкости инструмента резцы затачивались карборундовыми кругами и далее доводились лекальным способом. На лекальную доводку боковых сторон и радиуса закругления резца расходовались 30—35 мин.

В НИИЛ было спроектировано и внедрено на Средневолжском станкозаводе приспособление для алмазной доводки этих резцов взамен лекальной обработки. Приспособление, представленное на фиг. 45, предназначается для доводки задних поверхностей на боках профиля и радиуса при вершине резьбовых резцов. Устанавливается оно на универсальнозаточной станок. В плите 1 закреп-



Фиг. 45. Приспособление для алмазной доводки резьбовых резцов по боковым поверхностям и радиусу.

лена ось 2, вокруг которой с помощью рукоятки 3 поворачивается стакан 4, сидящий на шариковых подшипниках.

Регулировка зазоров в опорном узле, обеспечивающая плавное и легкое перемещение стакана 4, осуществляется с помощью гайки 5 и контргайки 6. В стакане 4 закреплена стойка 7, в верхней части которой имеется паз, служащий для размещения откидного кронштейна 8. На этом кронштейне закреплен индикатор часового типа 9 с ценой деления 0,01 мм.

Резец, подлежащий доводке по граням *a*, *b* и радиусу *r* (см. эскиз на фиг. 45), устанавливается в сменной каретке 10 и закрепляется винтами. Каретка выполнена в двух вариантах. Первый из них — для резцов сечением 25×30 мм<sup>2</sup>, второй — 16×16 мм<sup>2</sup>. В каретке предусмотрены сменные вкладыши 11, служащие для правильной установки резцов различных размеров.

Заданное значение заднего угла обеспечивается поворотом резца с кареткой и другими деталями вместе с осью 12.

Перед началом доводки откидной кронштейн 8 устанавливается в вертикальное положение и закрепляется в нем. Резец досылается до соприкосновения со специальным наконечником 13 на индикаторе 9. Наконечник имеет на торце вертикальную риску. Винтом перемещают каретку 14 до тех пор, пока вершина резца совпадет с риской на наконечнике 13. Этим обеспечивается пересечение продольной оси симметрии резца с осью вращения приспособления с тем, чтобы припуск на доводку был примерно одинаковым на каждой из боковых граней резца, а профиль резца — симметричным. Установив резец, стойку с индикатором откидывают. Приспособление имеет выступ 15. Он может быть подведен к одному из двух регулируемых упоров, которые прикреплены к плите 1 (на чертеже не видны). Этим фиксируется поворот стакана 4 в горизонтальной плоскости и осуществляется установка резца для поочередной доводки боковых граней *a* и *b*. Для доводки радиуса *r* стойку с индикатором вновь устанавливают в вертикальное положение. Винтом 10 подают каретку до тех пор, пока индикатор покажет нуль. В этом случае вершина резца располагается на оси качания приспособления. Далее по индикатору отсчитывают величину

$$\Delta = \frac{r}{\sin s} \cos(\alpha_y + \gamma_y),$$

где  $\epsilon$  — половина угла профиля резца;

$\alpha_y$  и  $\gamma_y$  — соответственно задний и передний углы инструмента, измеренные в плоскости продольного наклона.

Доводка резбовых резцов в этом приспособлении занимает 5—7 мин., чистота поверхностей при работе кругом АЧК125×10××3—АС5—Б1—50—24 получается примерно  $\nabla$  10. Стойкость резбовых резцов только за счет перехода от лекальной ручной доводки к алмазной повысилась в 2—3 раза. Резцы получают стабильную геометрию, на пластинках отсутствуют микротрещины и выкрашивания.

Повышение стойкости инструмента, отмечаемое всеми предприятиями, где применяется алмазная обработка, объясняется несколькими факторами.

Первым из них является улучшение микрогеометрии режущих лезвий. Алмазная обработка, как это видно из фиг. 46, резко снижает высоту шероховатостей на поверхностях инструмента [47]. Последние же непосредственно связаны с шероховатостью лезвий.

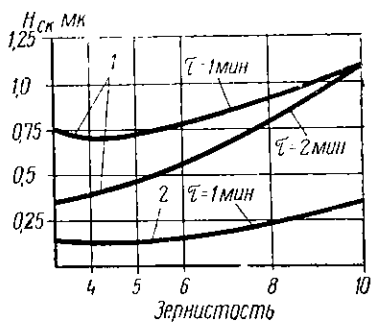
Чисто геометрический расчет показывает [39], что высота неровностей на лезвии инструмента  $R_z'$  связана с высотой неровностей на передней и задней поверхностях инструмента  $R_z''$  соотношением

$$R_z' = 1,41 R_z'' \frac{\sqrt{1 + \sin(\alpha + \gamma)}}{\cos(\alpha + \gamma)}, \quad (41)$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  — задний и передний углы режущего клина.

Высота неровностей лезвия связана с чистотой поверхности граней не только геометрически. Имеется еще и ряд других факторов, таких, например, как скругление кромки, микроразрушение лезвия и другие, которые могут приводить к значениям  $R_z'$  большим или меньшим, чем это следует из расчета по (41). Однако и в таком виде можно заметить, что, уменьшая неровности на режущих поверхностях, мы существенно улучшаем микрогеометрию режущего лезвия. В самом деле, пусть  $\alpha = \gamma = 15^\circ$ . Тогда  $R_z' = 2R_z''$ . Если, например, передняя и задняя поверхности инструмента имеют  $R_z'' = 0,8 \div 1,6$  мк, то есть выполнены в пределах  $\nabla 9$ , то лезвие имеет  $R_z' = 1,6 \div 3,2$  мк, то есть, лежит уже в пределах  $\nabla 8$ . Если мы повысим чистоту поверхностей резца до  $R_z'' = 0,4 \div 0,8$  мк ( $\nabla 10$ ), то на лезвии будем иметь  $\nabla 9$ . Чем меньше высота шероховатостей лезвия, тем меньше очагов концентрации напряжений и разрушения, тем выше стойкость инструмента, тем чище обработанная поверхность изделия. Однако эксперименты некоторых авторов показывают, что даже при равной чистоте обработанной поверхности инструменты, доведенные алмазными кругами, имеют большую стойкость, чем инструменты, доведенные карбидом бора. На первый взгляд это кажется парадоксальным, так как одной и той же чистоте лезвия, каким бы способом она ни была получена, должна соответствовать при прочих равных условиях равная стойкость инструментов.

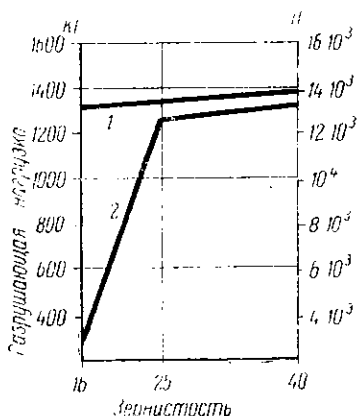
Не следует, однако, забывать, что для работы в столь напряженных условиях, в каких пребывает твердый сплав при резании



Фиг. 46. Зависимость микрогеометрии поверхности твердого сплава Т15К6 от величины зерна и времени доводки [47].

1—карбидом бора; 2—алмазным кругом.

металлов, важна не только шероховатость сама по себе, но и состояние поверхностного слоя режущего материала. Можно предположить, что более острые зерна алмазов, легче срезая слой сплава, создают меньшие местные мгновенные температуры и напряжения, чем более тупые зерна карбида бора. По-видимому, весьма малые разрывы и трещины, которые мы не замечаем при рассмотрении в обычных микроскопы, но которые, несомненно, существуют, менее распространены вглубь и по поверхности, если срезание твердого сплава происходит легче (алмазное зерно), чем если оно идет при больших микродавлениях и температурах (зерно карбида бора). Косвенным доказательством изложенной выше точки зрения являются не только факты уменьшения выкрашивания инструментов, обработанных алмазом (см. выше, стр. 90), но и данные экспериментов, выполненных Б. С. Коршуновым [48], приведенные в виде графика на фиг. 47. Как видно, с уменьшением размеров зерна разрушение шлифованного твердосплавного образца происходит легче. Если бы на разрушающую нагрузку оказывала влияние только высота неровностей на шлифованной поверхности, то линии фиг. 47 шли бы в обратном направлении, так как с увеличением размеров зерна высота шероховатостей возрастает (см. фиг. 46). Следовательно, действуют еще и другие причины, влияние которых с уменьшением размеров зерна оказывается более мощным, чем влияние улучшения чистоты поверхности. Это может быть влиянием напряженного состояния поверхностного слоя. Количество микроразрывов и местные напряжения возрастают с увеличением числа встреч изделия с зернами, то есть с уменьшением номера зернистости.



Фиг. 47. Разрушающая нагрузка в зависимости от зернистости круга и способа шлифования для твердосплавных образцов из ВК8. [48].

1—обработка алмазным кругом; 2—обработка абразивным кругом.

Характерно, что для алмазного круга (линия 1, фиг. 47) уменьшение размеров и увеличение количества рабочих зерен отражается на разрушающих нагрузках сравнительно слабо, так как резание здесь облегчено и состояние поверхностного слоя, по-видимому, здоровое. При абразивной же обработке напряженное состояние в поверхностных слоях с уменьшением размеров зерна резко изменяется вследствие затрудненного процесса резания.

Изложенные выше соображения позволяют сделать заключение, что алмазная заточка и доводка даже при равных шероховатостях на режущих поверхностях могут привести к более

высокой стойкости инструментов, чем абразивная заточка и доводка.

Повышение стойкости инструментов за счет алмазной обработки дает большой экономический эффект. Покажем это простым расчетом. На каждый килограмм твердых сплавов, расходуемых предприятием, рекомендуется планировать расходование 4,5 ст алмазов. Опыт показывает, что израсходование одного карата позволяет получить экономический эффект примерно 12—20 рублей. Следовательно, предприятие, расходующее, например, 400 кг твердых сплавов в год и соответственно 1800 ст алмазных инструментов, может получить экономию 22—36 тысяч рублей в год.

Однако экономический эффект от алмазной обработки не исчерпывается только снижением расхода инструментов. Повышение стойкости позволяет экономить время на смену и наладку инструментов, что очень важно для повышения производительности станков в условиях автоматизированного производства. Повышение стойкости создает также резервы в повышении режимов резания и тем самым способствует росту производительности труда.

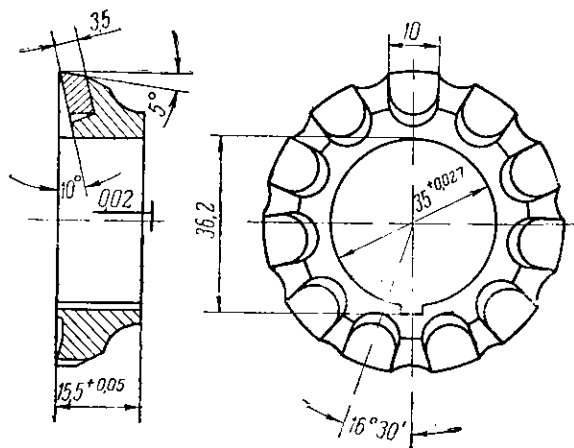
Алмазная заточка и доводка инструмента на первых порах может оказаться более дорогой и менее производительной операцией, чем абразивная. Но на это удорожание надо смело идти, так как экономический эффект от использования алмазно-обработанных инструментов значительно перекрывает расходы на подготовку инструмента и приобретение кругов.

## **НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ И МЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ, ПРИМЕНЕНИЕ КОТОРЫХ СТАНОВИТСЯ ВОЗМОЖНЫМ В СВЯЗИ С ОСВОЕНИЕМ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Процесс алмазной обработки позволяет лучше использовать твердые сплавы там, где они уже внедрены, а также открывает новые области их применения в производстве.

До настоящего времени номенклатура твердосплавных инструментов ограничивалась сравнительно узким кругом наименований — резцы, фрезы, зенкеры, развертки, в небольшом количестве сверла. Более сложные инструменты, такие, как фасонные резцы, протяжки, зуборезные фрезы и ряд других, как правило, не оснащались твердыми сплавами, хотя в этом была необходимость. Объясняется это технологическими трудностями, особенно трудностями шлифования и доводки профилей. Слишком много инструментов шло в брак по трещинам при шлифовании, слишком трудоемкой была любая из операций по обработке мало-мальски сложного профиля на твердосплавной пластине.

Алмазная обработка, как уже указывалось выше, позволяет получить на твердосплавных изделиях высококачественные поверхности без трещин при высокой производительности шлифовальных и доводочных операций. Это открывает совершенно новые возможности



Фиг. 48. Нож сборной твердосплавной протяжки.

перед конструкторами по инструментам и технологиями по механической обработке материалов.

Прежде всего оказывается возможным оснастить пластинками из твердых сплавов инструменты, которые традиционно изготовлялись из быстрорежущих или инструментальных сталей. Возьмем, например, такой инструмент, как протяжки. Из всех протяжек, применяемых в нашей

промышленности, лишь 0,1% оснащены твердыми сплавами. Между тем зубцы протяжки работают главным образом в условиях механического истирания, то есть там, где благоприятные свойства твердых сплавов могут проявиться особенно хорошо. Конечно, протяжка — инструмент с динамической нагрузкой на зубцы, но твердосплавные пластины вполне удовлетворительно работают в условиях фрезерования, где нагрузки на зубцы также достаточно динамичны.

Оснащение протяжек твердыми сплавами является актуальной задачей. На отдельных заводах это уже осуществляется. На Московском заводе малолитражных автомобилей при обработке крышек коренных подшипников коленчатого вала внедрена протяжка с твердосплавными ножами [49]. Протяжка имеет три секции, устанавливаемые последовательно на вертикально-протяжном станке. Каждая секция состоит из оправки, на которой набрано и закреплено 16 ножей. Нож представляет собой кольцевой зуб протяжки (фиг. 48). Корпус ножа сделан из улучшенной стали 40X. Гнезда под пластинки из твердого сплава ВК4 фрезеруют пальцевой фрезой, а пластины напаиваются латунным припоем при нагреве токками высокой частоты.

При обработке изделий из серого чугуна стойкость между переточками у твердосплавной протяжки оказалась в 23 раза выше, чем у протяжки, изготовленной из быстрорежущей стали. Только



за счет экономии на инструменте завод получил выигрыш в 4250 руб.

В литературе приведены и другие конструкции, в частности, твердосплавные протяжки для обработки плоскостей, позволяющие в ряде случаев заменить фрезерование со значительным выигрышем в производительности процесса и себестоимости изделий [50], фасонные твердосплавные резцы, профиль которых обрабатывается алмазными кругами [51], и т. д.

Весьма интересные и широкие возможности для применения сложных твердосплавных инструментов представляет использование для их изготовления пластифицированных твердых сплавов в комбинации с алмазной обработкой.

Как известно, обычно твердые сплавы поставляются предприятиям в виде пластинок или изделий, спеченных уже до рабочей твердости порядка HRA 85—91. При такой твердости обработка пластин возможна только одним из электроэрозионных методов, абразивным или алмазным шлифованием. Однако съем больших слоев твердого сплава, с которым приходится сталкиваться при обработке более или менее сложных профилей, нецелесообразен как по трудоемкости операции, так и по большому расходу алмазов.

Научно-исследовательским институтом твердых сплавов (ВНИИТС) разработан новый способ изготовления инструмента и изделий из так называемых пластифицированных заготовок, сравнительно легко поддающихся обработке обычными металлорежущими инструментами. Суть способа состоит в том, что процесс спекания изделий из твердого сплава разделяется на два этапа.

На предприятии, производящем твердосплавные изделия, обычный процесс изготовления твердосплавной пластины состоит из прессования и спекания, следующих друг за другом. При изготовлении пластифицированных заготовок в исходную смесь при прессовании вводится пластификатор в виде парафина или каучука, и окончательное спекание до получения обычной твердости не производится. Такие «сырые» заготовки, в которых поры заполнены пластификатором, в виде шайб или пластин поставляются машиностроительным предприятиям.

Пластифицированные заготовки в «сыром» виде легко обрабатываются обычным инструментом. Их можно сверлить, фрезеровать, точить, резать, придавая изделию разнообразную форму [52, 53]. После механической обработки и придания полуфабрикату необходимой формы и размеров (с учетом усадки, о которой будет сказано ниже) производится окончательное спекание, придающее изделию необходимую твердость и другие свойства твердых сплавов. Спекание выполняется либо заводами-поставщиками твердых сплавов, либо машиностроительными предприятиями, имеющими соответствующее оборудование. Свойства сплавов, изготовленных из пластифицированного полуфабриката, не отличаются от свойств твердых сплавов, полученных обычным путем.

При механической обработке пластифицированных заготовок следует учитывать усадку, которая будет иметь место при окончательном спекании. Линейные размеры изделий уменьшаются на 20—30%. Для попадания в заданный размер необходимо заранее знать коэффициент усадки. В связи с этим каждая партия пластифицированных заготовок снабжается паспортом, в который записывается этот коэффициент. Опыт показывает, что фактическая усадка не отличается от указанной в паспорте более чем на один процент.

Получив спеченный инструмент, приступают к окончательной обработке алмазными инструментами. Здесь могут быть использованы как стандартные алмазные круги и притиры, так и шайбы или профильные круги из мягких материалов, шаржированные алмазными порошками [53].

Интересный опыт имеют некоторые зарубежные предприятия. Так, фирма Diagrit Diamond Tool (Англия) производит алмазные круги, предназначенные для фасонного шлифования твердосплавных изделий [54]. Эти круги изготавливаются нанесением электрогальваническим путем тонкого слоя (порядка 0,2 мм) алмазных зерен на стальной корпус с фасонным профилем. Круги сохраняют форму в течение длительного времени, обладая хорошими режущими свойствами. Они могут иметь разнообразную форму и размеры, однако с радиусом закругления при переходе от одного участка профиля к другому не менее 0,25 мм.

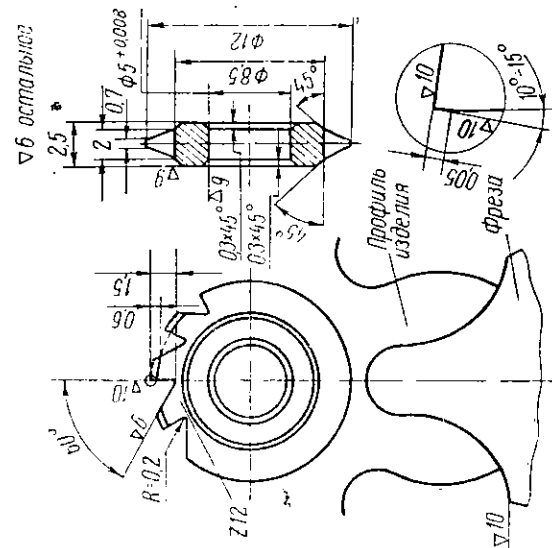
Применение обработанных алмазами инструментов из пластифицированных твердых сплавов дает большой экономический эффект. Сошлемся на опыт куйбышевских предприятий. На заводах применяется ряд малогабаритных инструментов из пластифицированных сплавов. На фиг. 49 и 50 приведены два таких инструмента — зенкер и модульная фреза.

Стойкость зенкера из сплава ВК6М оказалась в 40 раз выше, чем стойкость применявшегося ранее зенкера из P18.

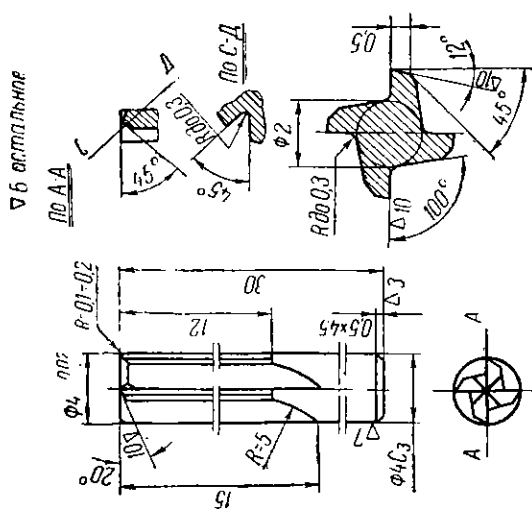
При замене стальных модульных фрез твердосплавными расход инструмента уменьшился в 50 раз, производительность труда только за счет сокращения времени на смену и подналадку инструмента возросла на 15—20%.

На первом Московском часовом заводе из пластифицированных сплавов изготавливают червячные фрезы, стойкость которых составляет 200—250 часов вместо 3—4 часов для стальных червячных фрез. Резко сократился брак, повысилась чистота обработки изделий.

Ряд заводов успешно применяет твердосплавные фасонные дисковые резцы, резьбовые резцы и другие инструменты из пластифицированных сплавов, как малогабаритные, так и относительно больших размеров. Дальнейшее расширение области применения этих инструментов, открывающееся в связи с освоением техноло-



Фиг. 50. Дисксовая модульная фреза для часового производства, изготовленная из пластифицированного сплава ВК6М.



Фиг. 49. Зенкер, изготовляемый из пластифицированного твердого сплава ВК6М.

гни алмазной обработки, составляет важную задачу наших машиностроительных предприятий.

Алмазное шлифование позволяет усовершенствовать конструкции и улучшить эксплуатационные свойства не только режущих, но и измерительных инструментов.

В условиях массового производства при ручном контроле, а также в автоматических и сортирующих контрольных устройствах находят широкое распространение калибры. Высокая точность изделий влечет за собой узкие поля допусков на износ калибров и жесткие допуски на изготовление этих инструментов.

При активном контроле на автоматических станках, а также при контроле во время и по окончании абразивной обработки изделий износ калибров происходит быстро. Это вызывает частую остановку станков для замены изношенных калибров, необходимость изготавливать большое количество их, а также затрачивать значительное время на текущий контроль за размерами рабочих поверхностей инструментов.

Особо остро стоит вопрос об износостойкости калибров, применяемых в точном машиностроении и приборостроении. Так, например, при изготовлении приборных шарикоподшипников допуск на износ калибров-пробок для контроля колец диаметром до 10 мм составляет 2 мк для подшипников классов Н, П, В, и 1,5 мк — для подшипников классов А и С. Повышение точности подшипников, например, переход из класса В в класс А, вызывает увеличение расхода калибров на 25% и одновременное увеличение трудоемкости изготовления этих инструментов.

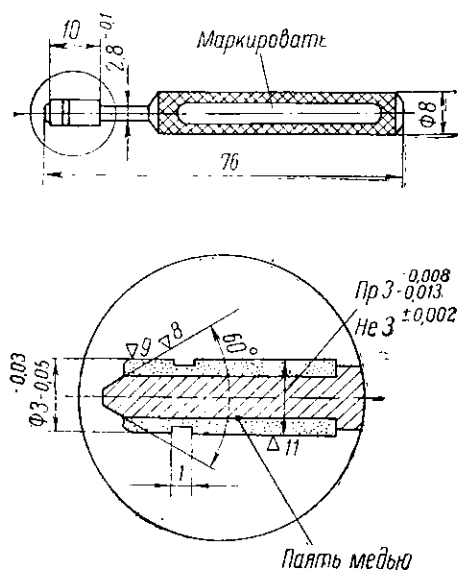
Повышение износостойкости калибров представляет, следовательно, задачу большого производственного значения.

Эффективным способом повышения износостойкости калибров является оснащение их измерительных поверхностей твердыми сплавами. Это было известно сравнительно давно, но до последнего времени твердосплавные калибры не нашли еще широкого применения в промышленности вследствие большой трудоемкости изготовления. Новые возможности открылись в связи с появлением достаточного количества алмазных порошков и инструментов из них. Стойкость калибров может быть повышена в десятки раз, количество их резко сокращено.

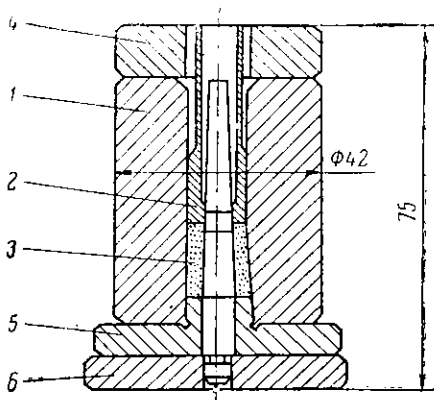
Покажем это на примере работы, выполненной сотрудниками НИИЛ С. Я. Сагаловичем и З. Н. Токаревой на филиале ордена Ленина Четвертого Государственного подшипникового завода.

На заводе при контроле отверстий в приборных подшипниках использовались стальные калибры. Взамен были разработаны калибры-пробки, оснащенные твердым сплавом ВК8 в виде стальных корпусов со втулками из твердого сплава. Пример проходного и непроходного калибров такой конструкции приведен на фиг. 51.

Корпус калибра изготавливается из стали 45. Твердосплавная втулка прессуется из порошка ВК8 в пресс-форме, конструкция которой приведена на фиг. 52. Последняя состоит из стакана 1, пуансона 2, стержня 3, колец 4 и 5 и подкладки 6. Внутренние размеры



Фиг. 51. Калибр, оснащенный твердым сплавом.



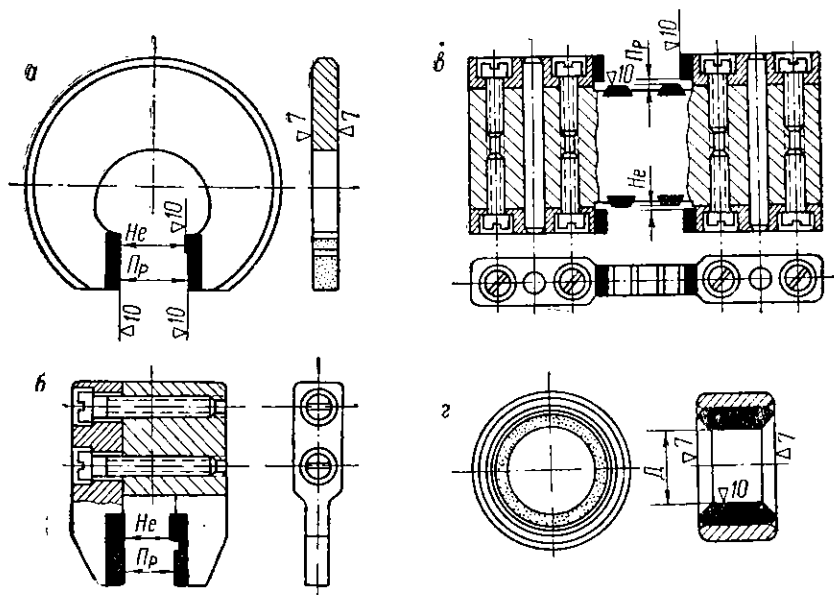
Фиг. 52. Пресс-форма для изготовления твердосплавных втулочек к калибрам.

стакана, диаметр стержня и пуансона принимаются в зависимости от размеров заготовки, которую желательно получить после спекания, с учетом усадки сплава при спекании и припуска на дальнейшую обработку. Твердосплавные втулки напаяются медью на корпус калибров. Далее производится предварительное и окончательное шлифование (последнее в две операции кругами АПП зернистостью АС12 и АС6) и алмазная доводка пастой с порошком АСМЗ.

Длительные испытания в производственных условиях показали, что твердосплавные калибры-пробки при измерении подшипниковых колец в 40—100 раз более стойки, чем стальные. Экономический эффект от этого мероприятия нетрудно подсчитать на примере калибров-пробок диаметром 3 мм. Завод выпускает ежегодно не менее 60 тыс. стальных калибров этого размера, причем каждый из них обходится в 0 р. 50 коп. Твердосплавный калибр (фиг. 51) стоит дороже — 2 р. 00 коп., но стойкость его примерно в

60 раз выше. Это значит, что теперь требуется изготавливать только 1000 шт. калибров в год. Экономический эффект 28000 руб., не считая снижения расходов на промежуточные проверки и аттестацию калибров.

Твердыми сплавами могут оснащаться не только калибры-



Фиг. 53. Мерительные инструменты, оснащенные твердыми сплавами.

пробки, но и другие мерительные инструменты. Твердосплавные пластины могут крепиться механическим путем или пайкой. Несколько конструкций инструментов с напайными пластинами приведено на фиг. 53. На фиг. 53,а представлена обычная скоба с напайными пластинами из твердого сплава. Преимуществом таких инструментов, кроме высокой износостойкости, является привычная форма скобы и ее малый вес, не утомляющий контролера при большом количестве промеров. Недостатком является известная трудность шлифования мерительных поверхностей, особенно когда рабочий размер скобы невелик.

В последнем случае могут быть применены сборные скобы по типу фиг. 53, б. Предварительное шлифование здесь осуществляется раздельно для обеих мерительных ножек. Винты, соединяющие скобу, ставятся на краске или на карбинольном клее.

На фиг. 53, в показана твердосплавная сборная пройма с несколькими пластинами, а на фиг. 53, г — калибр-кольцо, применяемый на сортировочных и других машинах.

Заметим, кстати, что оснащение твердыми сплавами мерительных органов сортировочных устройств и устройств для автоматического контроля может дать большой эффект как в смысле повышения однородности продукции, так и снижения простоев машин под наладкой. Сошлемся на пример подшипникового завода им. Куйбышева. Для этого завода долгое время узким местом были мелкие кольца на машинах для сортировки роликов. Эти кольца изнашивались за два-три дня, их необходимо было заменять новыми. Инструментальный цех завода в большом количестве производил эти точные изделия, но не справлялся с возрастающим объемом работ. Замена стальных колец твердосплавными, обработанными алмазами, повысила стойкость колец с 2—3 дней до 6—8 месяцев. Шлифование внутренней поверхности мерительных колец производится алмазными кругами стопроцентной концентрации на металлической связке зернистостью АС25; доводка — алмазными порошками. Кроме повышения стойкости оказалось возможным повысить чистоту и точность обработки мерительных поверхностей, что весьма важно, так как различие между группами при сортировке роликов составляет 2—3 микрона.

Алмазное шлифование позволяет расширить область применения твердых сплавов не только для оснащения режущих и мерительных инструментов, но и для вспомогательных. Значительно шире теперь могут применяться твердосплавные центра, установочные элементы приспособлений и т. д. На том же подшипниковом заводе им. Куйбышева, например, большой объем занимают операции по бесцентровому шлифованию колец и роликов. Как известно, при бесцентровом шлифовании изделия скользят по направляющему ножу. Стальные закаленные ножи при этом довольно быстро изнашиваются, что влияет на качество и брак изделий. В подшипниковом производстве приходилось ножи на бесцентровых станках менять и перешлифовывать через одну — три смены. Применение твердосплавных ножей, шлифованных алмазными кругами, резко снизило их износ и способствовало повышению производительности операций и качества деталей подшипников.

Трудно сейчас предсказать все те области машиностроительно-го производства, куда могут проникнуть твердые сплавы благодаря освоению алмазных методов обработки. Но уже сейчас можно отметить, что работа в этом направлении даст весьма большой экономический эффект. По объему производства твердых сплавов наша страна занимает первое место в мире. Целесообразно и широко использовать их — важная народнохозяйственная задача. В решении ее большую помощь могут оказать алмазные шлифовальные инструменты.

## АЛМАЗНЫЕ КРИСТАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

### КОНСТРУКЦИЯ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ЗАТОЧКИ

Кристалльные алмазные инструменты изготавливаются пока только из натуральных алмазов, поскольку синтетическим путем не удалось еще получить кристаллов необходимого размера. К числу кристалльных относятся резцы, сверла, фрезы, стеклорезы, алмазные карандаши для правки шлифовальных кругов. В соответствии с направлением данной работы мы остановимся лишь на алмазных кристалльных режущих инструментах, применяемых в машиностроении для обработки деталей из металлов и пластмасс.

Наибольшее распространение получили в промышленности алмазные резцы, применяемые для получения точных цилиндрических и конических поверхностей при высоких требованиях к чистоте и точности обработки изделий.

Для изготовления инструментов используются кристаллы алмаза весом от 0,2 до 1,5 карата, иногда до 2 карат. Чтобы сориентироваться в размерах кристалла, имеющего такой вес, представим его себе в виде кубика. Тогда алмаз весом в 0,2 карата будет иметь сторону кубика, равную, примерно, 2,3 мм, а алмаз весом в 2 карата — 5 мм.

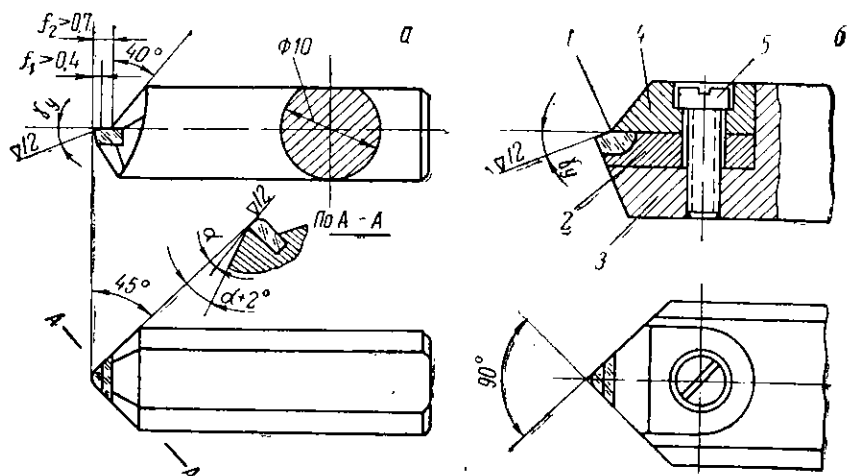
Режущие элементы инструментов образуются из технических алмазов с плотной структурой, не имеющих трещин, раковин и других дефектов, видимых при десятикратном увеличении. Алмазы, подлежащие использованию в качестве режущих элементов, подвергаются также проверке на отсутствие внутренних напряжений. Эта проверка делается путем просвечивания кристалла поляризованным светом. Если в кристалле имеются внутренние напряжения, вызванные теми или иными микровключениями, то в нем видны зоны двойного лучепреломления.

При изготовлении алмазных инструментов следует иметь в виду неоднородность свойств в различных направлениях в одном и том же кристалле алмаза. Дело в том, что вследствие существования в алмазах так называемых плоскостей спайности прочность и твердость их в разных направлениях неодинакова. Поэтому в кристалле имеются так называемые «мягкие» и «твердые» направления. Естественно поставить дело так, чтобы обработку кристаллов производить в «мягких» направлениях, то есть в направлениях наименьшей твердости, а эксплуатацию — в «твердых», обеспечивая этим наименьший износ и наибольшую прочность режущего инструмента. Для определения «мягких» и «твердых» направлений в алмазах служат специальные приборы [5]. Алмазы, отобранные по техническим условиям и соответствующим образом сориентированные, закрепляются в державках механическим путем или пайкой. Преимущество пайки состоит в простоте конструкции и ма-



лых габаритах инструмента. Это можно видеть на примере алмазного реза, представленного на фиг. 54,а. Для пайки применяется серебряный припой ПСр50Кд по ГОСТ 8190-56 с температурой плавления 650—700°.

Недостатком метода крепления алмазов пайкой является нежелательный нагрев кристалла, тем более, что он должен произво-



Фиг. 54. Алмазные резы.

диться многократно, так как для переточки алмаз должен извлекаться из державки. Следует также иметь в виду, что для получения надежной пайки поверхности алмаза и державки должны быть подогнаны друг к другу, что исключает использование кристаллов без трудоемкой обработки опорных поверхностей.

В связи с этим для алмазов размерами более 0,5 карата, как правило, применяется механический метод крепления. Наибольшее распространение получил в настоящее время способ крепления с помощью накладки и специальной вставки. Резец такого типа показан на фиг. 54,б. Алмаз 1 опирается на подкладку 2, изготовленную методом порошковой металлургии. Она прессуется и спекается вместе с алмазом, затем верхнюю часть кристалла освобождают от излишнего металла. Таким путем в подкладке получается отпечаток нерабочей поверхности кристалла. Создается хорошая опора для алмаза. Прокладка спекается из порошка следующего состава: медь — 80%, олово — 15%, свинец — 5%.

Крепление кристалла с подкладкой в державке 3 осуществляется планкой 4 и винтом 5. Такой способ закрепления алмаза освобождает от необходимости обрабатывать нерабочие поверхности кристалла и облегчает заточку и переточку инструмента.

Заточка кристаллов алмаза производится шлифованием и доводкой. В соответствии с руководящим техническим материалом, разработанным НИИ Алмазом [55], шлифование (огранка) алмаза может быть выполнено алмазно-металлическими кругами и чугунными дисками, шаржированными алмазными порошками.

Шлифование алмаза начинается с образования передней поверхности, далее гранятся задние поверхности и вершина резца. Последней операцией является доводка передней поверхности, во время которой снимаются все сколы, выкрашивания и другие дефекты, образовавшиеся на режущих кромках в процессе огранки алмаза. Как уже указывалось выше, обработка алмазов производится в «мягком» направлении, так как в «твердом» направлении алмаз практически не поддается шлифованию.

При шлифовании передней поверхности резца направление вращения шлифовального круга или диска должно быть на режущую кромку, а направление подачи его — навстречу кромке (наибольшее отклонение до  $45^\circ$ ). Это необходимо во избежание сколов алмаза.

Алмазно-металлические круги применяются при предварительном шлифовании кристаллов, когда снимается наиболее трудно обрабатываемая часть алмаза. Эти круги рекомендуются и для шлифования радиусов закругления между кромками в плане алмазного резца.

Применяются круги зернистостью А5—А4, стопроцентной концентрации. После обработки кристалла алмазно-металлическими кругами чистота поверхностей алмаза лежит в пределах  $\nabla 10$ — $\nabla 11$ .

Окончательное шлифование и доводка алмазных кристалльных инструментов производятся чугунными дисками, шаржированными алмазными порошками АМ40—АМ28 (для шлифования) и АМ10—АМ3 (для доводки). Диски изготавливаются из серого чугуна марки СЧ12-28 или ОЧ15-32 по ГОСТ 1412—54.

Скорость шлифования (окружная скорость диска) рекомендуется в пределах  $v=30$ — $40$  м/сек. Диск должен быть хорошо обработан и точно установлен на шпинделе станка с тем, чтобы торцовое биение шлифовального инструмента не превышало 3—5 мк.

После окончательного шлифования и доводки чистота режущих поверхностей кристалла должна находиться в пределах  $\nabla 12$ — $\nabla 14$ .

Геометрические параметры алмазных резцов зависят от вида обрабатываемого материала и характера технологической операции. Передний угол  $\gamma$ , как правило, не делают положительным, с тем чтобы не создавать опасность выкрашивания кристалла. Для обработки мягких материалов (латунь, медь, алюминий, пластмассы) рекомендуется  $\gamma=0^\circ \div (-3^\circ)$ , а для более твердых (титан, бронза и т. д.)  $\gamma=- (3^\circ \div 5^\circ)$ .

С целью упрочнения режущего клина алмазным резцам при-

дают малые задние углы —  $\alpha = 4 \div 6^\circ$  при обработке твердых и  $\alpha = 6 \div 10^\circ$  при обработке мягких материалов. В общем, угол заострения резца  $\beta = 90^\circ - \alpha - \gamma$  должен быть не менее  $80-85^\circ$ .

Главный угол в плане резцов  $\varphi = 30 \div 90^\circ$ , вспомогательный —  $\varphi_1 = 0 \div 10^\circ$ . Иногда используют резцы с углами в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$  (фиг. 54), но при этом радиус закругления между кромками в плане делают достаточно большим ( $r = 0,5 \div 1,5$  мм). Однако следует иметь в виду, что увеличение радиуса закругления резца ведет, как правило, к повышению радиальной составляющей силы резания, что может вызывать вибрации.

Более подробные сведения о геометрии алмазных кристаллических инструментов могут быть получены по результатам соответствующих исследований или по литературным данным [4, 5, 20, 55].

### ТЕПЛОФИЗИКА И ДИНАМИКА ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ТОЧЕНИЯ

Определение температур на режущих поверхностях для алмазных кристаллических инструментов играет особую роль, поскольку, как уже отмечалось выше, за известным пределом температур алмаз теряет режущие свойства.

В связи с высокой твердостью, хрупкостью и диэлектрическими свойствами алмазов, а также ввиду весьма малых сечений среза при работе этими инструментами использование экспериментальных методов определения температур здесь весьма затруднено. В самом деле, применить естественную термопару нельзя, так как алмаз — диэлектрик. Выполнить закладные термопары в изделии с тем, чтобы образовать бегущую термопару в стружке [9], не позволяют весьма малые размеры последней. Заложить термопару в алмаз можно, как это сделали А. В. Руднев и А. П. Добычина [57], но эта термопара вследствие хрупкости инструмента не может быть выведена в рабочую зону резца.

Поэтому весьма большое значение для анализа процесса алмазной обработки приобретают теоретические методы расчета температур и тепловых потоков в зоне резания.

В принципе общий ход процесса точения алмазными инструментами не отличается от хода процесса резания инструментами из других материалов. Это позволяет использовать в интересующем нас случае общие закономерности теплофизики резания, изложенные в прежних работах автора [8, 9].

При этом, однако, следует иметь в виду некоторые особенности алмазного точения и соответственно реконструировать расчетные формулы.

Прежде всего формулы можно упростить, имея в виду, что теплофизические свойства режущего материала известны и не меняются. Мало меняется и геометрия режущего клина. Передний угол алмазных резцов близок к  $0^\circ$ , а задние углы — малы,

что позволяет положить угол заострения резца близким к  $90^\circ$ .

При написании формул следует учесть и некоторые особенности алмазного точения с малыми сечениями среза. Эксперименты, проведенные в НИИЛ, показывают, что при тонком точении может иметь место уширение стружки по сравнению с соответствующим размером среза. Для обычного точения и обычных размеров среза коэффициент усадки по ширине  $\kappa_b$  редко и незначительно отличается от единицы, в связи с чем значения коэффициента усадки по толщине  $\kappa$  и коэффициента усадки по длине  $\kappa_l$  практически совпадают. При точении с очень маленькими сечениями среза величины  $\kappa_b$  и  $\kappa_l$  могут отличаться друг от друга, так как

$$\kappa_l = \kappa \cdot \kappa_b,$$

$$a \quad \kappa_b \neq 1.$$

В связи с изложенным интенсивность источников, представляющих теплоту деформации  $q_d$  и теплоту трения по задней поверхности инструмента  $q_{тз}$  (фиг. 55), можно выразить следующими расчетными формулами:

$$q_d = \frac{3,9}{\sqrt{\kappa^2 + 1}} \cdot \frac{P_{ZO} \kappa_l - P_{NO}}{\Delta \cdot b} \cdot \frac{v}{\kappa_l} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек} \quad (42)$$

■

$$q_{тз} = 3,9 \frac{F_{тз} \cdot \sin \varphi}{l_3} v \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}. \quad (43)$$

В последних формулах:  $P_{ZO} = P_Z - F_{тз}$  и  $P_{NO} = P_N - N_3$  — соответственно главная и нормальная составляющие силы резания без учета сил, действующих на задней поверхности резца: нормальная  $N_3$  и силы трения  $F_{тз}$ ;

$\Delta = s \cdot \sin \varphi$  — толщина среза;

$b = b_0 \cdot \kappa_b$  — ширина стружки, определяемая непосредственным измерением или через расчетную ширину среза  $b_0$  и коэффициент усадки по ширине  $\kappa_b$ ;

$l_3$  — длина контакта по задней поверхности резца;

$t, s, v$  — элементы режима резания.

В формулы (42) и (43) силы подставляются в кГ, длины — в мм, скорость резания в м/мин.

Рассмотрим далее вопрос об интенсивности тепловыделения за счет трения между стружкой и передней поверхностью кристалла. Экспериментальных данных о законе распределения удельных сил трения на площадке контакта длиной  $l_n$  для алмазных резцов в данное время нет. Нет также сведений о характере контакта между стружкой и алмазным резцом. Полагая, что процесс движения стружки по передней поверхности кристалла подчиняется общим закономерностям, имеющим место при

работе другими инструментальными материалами, используем теоретические соображения и расчеты Н. Н. Зорева [1; 56].

Н. Н. Зорев отмечает, что на площадке контакта  $l_n$  происходят два различных процесса. На некоторой части  $c < l_n$  (фиг. 55, стр. 111), начинающейся от кромки инструмента, торможение нижних слоев стружки за счет прижатия ее к инструменту столь сильно, что вызывает вторичные пластические деформации в тонком слое стружки. Напряжения в этом слое достигают сопротивления пластическому сдвигу  $\tau_S$  и внешнее трение стружки по резцу заменяется внутренними сдвигами материала стружки. На участке внутреннего скольжения длиной  $c$  касательные напряжения везде одни и те же — они равны  $\tau_S$ .

За участком внутреннего скольжения следует участок, где нормальные силы не столь значительны, чтобы обеспечить пластическое деформирование надрезцового слоя стружки. Поэтому здесь имеет место внешнее трение, сила трения пропорциональна нормальному давлению.

В соответствии с изложенной выше схемой распределения удельных сил трения на площадке контакта может быть получена формула для расчета полной силы трения  $F_{\text{тр}}$  между стружкой и передней поверхностью инструмента [56]:

$$F_{\text{тр}} = b l_n \tau_S \frac{\left(1 + n \frac{c}{l_n}\right)}{n + 1}, \quad (44)$$

где  $b$  и  $l_n$  — размеры площадки контакта;  
 $n$  — показатель степени в формуле

$$\sigma_{\text{тр}}(x) = A (l_n - x)^n, \quad (45)$$

описывающей закон изменения сил трения на второй части площадки контакта — участке внешнего трения ( $x \geq c$ ).

Для наших расчетов вполне достаточно принять некоторые средние значения  $n$  и  $c/l_n$ , так как небольшие изменения в форме закона распределения сил трения на второй части контакта, как показывают расчеты, практически не отражаются на результатах тепловых расчетов. Поэтому, ориентируясь на данные Н. Н. Зорева, примем  $n \approx 3$  и  $c = 0,5 l_n$ . Тогда вместо (44) и (45) получаем:

$$F_{\text{тр}} \approx 0,625 b l_n \tau_S \quad (46)$$

и

$$\sigma_{\text{тр}}(x) \approx A (l_n - x)^3. \quad (47)$$

Так как в точке  $x = c$  должно иметь место  $\sigma_{\text{тр}}(c) = \tau_S$ , то  $A = \frac{8 \tau_S}{l_n^3}$  и, следовательно:

$$\sigma_{\text{тр}}(x) \approx 8 \tau_S \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^3. \quad (48)$$

Общеизвестны уравнения механики резания, которые при  $\gamma=0^\circ$  приводят к нижеследующему соотношению между силой трения  $F_{\text{тр}}$ , нормальной составляющей усилия резания  $P_N$  и нормальной силой на задней поверхности инструмента  $N_3$ :

$$F_{\text{тр}} = P_N - N_3 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} - N_3 = P_{NO}.$$

Следовательно:

$$\tau_S \approx 1,6 \frac{P_{NO}}{bl_n} \text{ кГ/мм}^2, \quad (49)$$

$$\sigma_{\text{тр}}(x) \approx 12,8 \frac{P_{NO}}{bl_n} \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^3 \text{ кГ/мм}^2. \quad (50)$$

Если экспериментально определены сила  $P_{NO}$  и размеры контактной площадки стружки с передней поверхностью реза  $b$  и  $l_n$ , то интересующие нас  $\tau_S$  и  $\sigma_{\text{тр}}(x)$  могут быть рассчитаны и далее — рассчитана интенсивность теплообразования от работы трения на различных участках контактной площадки. В самом деле, полагая тепловыделение пропорциональным работе трения, пишем для участка  $0 \leq x \leq c$

$$q_0 = 3,9 \frac{v}{k_I} \tau_S = 6,25 \frac{v}{k_I} \cdot \frac{P_{NO}}{bl_n} \text{ кал/см}^2\text{сек}, \quad (51)$$

а для участка  $c \leq x \leq l_n$ :

$$q_{\text{тр}}(x) = 8q_0 \left(1 - \frac{x}{l_n}\right)^3. \quad (52)$$

Переходим к расчету температур, возникающих на контактных площадках инструмента со стружкой и изделием под действием упомянутых выше источников тепла.

В общем виде:

$$\Theta(x) = \Theta_{\text{тр}}(x) + \Theta_d - \Theta_{\text{рп}}(x) \quad (53)$$

и

$$\Theta(y) = \Theta_{\text{тз}}(y) + \Theta_d' - \Theta_{\text{рз}}(y). \quad (54)$$

Здесь  $\Theta(x)$  — температура любой точки контакта «резец—стружка», измеренная на расстоянии  $x$  от режущей кромки (фиг. 55);

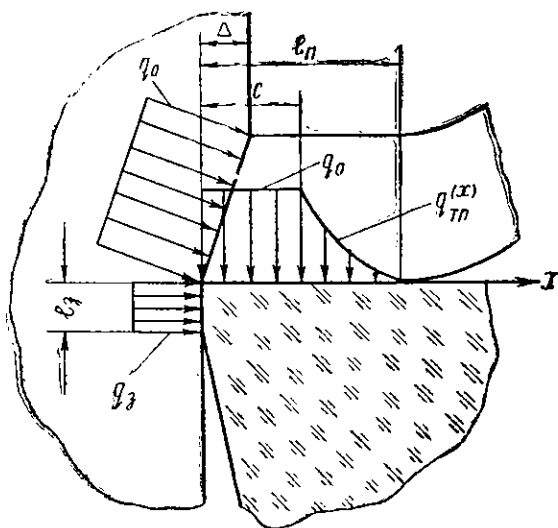
$\Theta_{\text{тр}}(x)$  — повышение температуры этой точки, вызванное трением стружки о переднюю поверхность реза;

$\Theta_d$  — повышение температуры, вызванное распространением той части теплоты деформации, которая уходит со стружкой;

$\Theta_{\text{рп}}(x)$  — снижение температуры точки  $x$ , вызванное оттоком тепла в резец;

$\Theta(y)$  — температура любой точки контакта «резец—изделие», измеренная на расстоянии  $y$  от режущей кромки (по направлению скорости резания);

- $\Theta_d'$  — повышение температуры, вызванное распространением той части теплоты деформации, которая передается изделию;
- $\Theta_{pз}(y)$  — изменение температуры, вызванное теплообменом с резцом.



Фиг. 55. Схема расположения источников тепловыделения при алмазном точении.

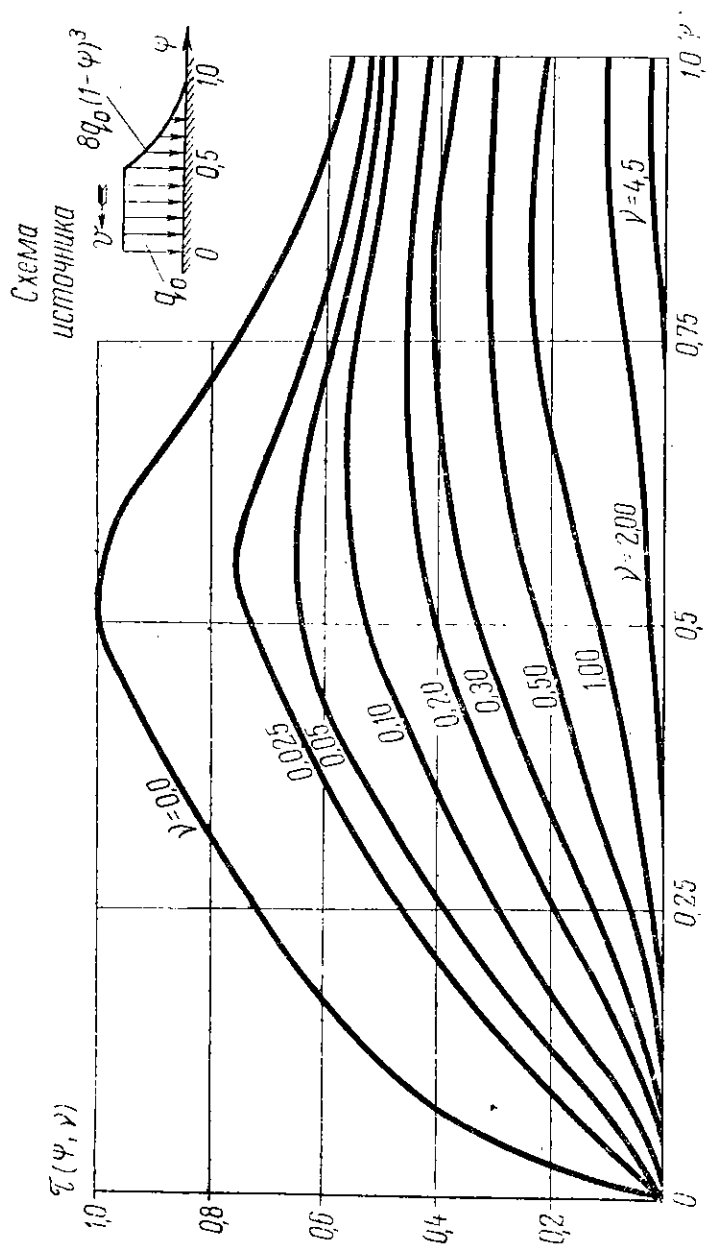
Используя выводы и расчеты, приведенные в опубликованных ранее работах автора [8, 9], а также имея в виду изложенные выше соображения об особенностях процесса алмазного точения, можем написать вместо (53) и (54) нижеследующие формулы:

$$\Theta(x) \approx 0,195 \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \sqrt{\frac{l_p k_l}{v}} (q_0 T_{тп} - 1,41 q_p T_{рп}) + 0,6 \frac{a}{\lambda} b^* q_d \frac{k_l}{v} \quad (55)$$

и

$$\Theta(y) \approx 0,276 \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \sqrt{\frac{l_s}{v}} (q_{тз} - q_s) \tau_s + 0,3 \frac{a}{\lambda} b^* q_d \frac{k_l k_b}{v}. \quad (56)$$

При написании этих формул по сравнению с формулами, приведенными в предыдущих работах автора [9], учтено также, что перенос тепла поверхностью резания в стружку при алмазной



Фиг. 56. График величин  $\tau(\psi, \nu)$ , служащий для определения значений функции  $T_{гп}$ .



обработке не играет существенной роли, а повышение температуры  $\Theta_d'$  может быть для случая работы с тонкими стружками принято примерно равным  $0,5\Theta_d \kappa_b$  ( $\kappa_b$  — коэффициент усадки по ширине стружки).

В формулы (55) и (56), кроме упоминавшихся уже ранее величин, входят:

$a$  и  $\lambda$  — коэффициенты температуро- и теплопроводности обрабатываемого материала соответственно в  $\text{см}^2/\text{сек}$  и  $\text{кал}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ ;

$q_n$  и  $q_z$  — средние интенсивности потоков, образующихся как результат теплообмена соответственно между стружкой и передней поверхностью резца, а также изделием и задней поверхностью инструмента.

$b^*$  — коэффициент, определяющий, какая часть теплоты деформации уносится стружкой; он рассчитывается по формуле

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,94 \frac{k_l}{(k^2 + 1)^{0,25} \sqrt{R_d}}}, \quad (57)$$

где

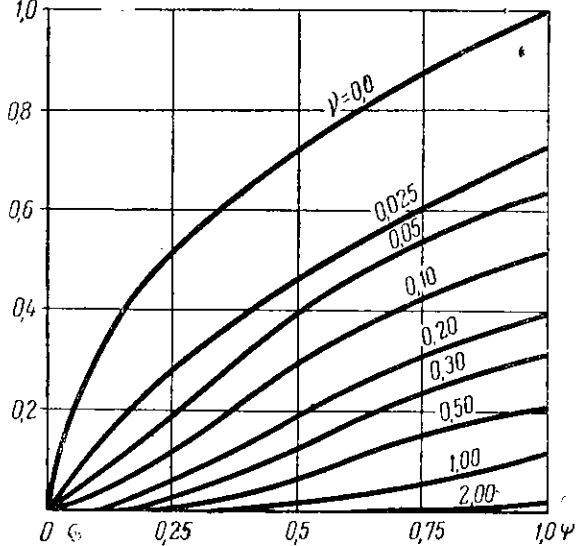
$$R_d = \frac{1}{12} \frac{v \cdot s \cdot \sin \varphi}{a}. \quad (58)$$

В формулы (55) и (56) входят также безразмерные функции  $T_{тп}$ ,  $T_{рп}$  и  $\tau_z$ , значения которых для интересующих точек определяются с помощью графиков, приведенных на фиг. 56 и 57.

Для определения значений  $T_{тп}$  и  $T_{рп}$  вначале рассчитывается безразмерная характеристика

$$R = \frac{1}{6} \frac{v \cdot \Delta^2 \cdot k^2}{a \cdot l_n \cdot k_l}, \quad (59)$$

где  $\Delta = s \cdot \sin \varphi$  — толщина среза, мм.



Фиг. 57. График величин  $\tau_1(\psi, \nu)$ , служащий для определения значений функций  $T_{рп}$  и  $\tau_z$ .

Далее для каждой точки контакта, в которой желательнее рассчитать температуру, определяют безразмерную абсциссу  $\psi = \frac{x}{l_n}$  и безразмерные величины  $\nu = 2Rn^2$  (для  $T_{тп}$ ) и  $\nu_1 = Rn^2$  (для  $T_{рп}$ ). Здесь  $n$  — любое целое число, включая нуль ( $n = 0; \pm 1; \pm 2, \dots, \pm \infty$ ).

По абсциссе  $\psi$  для каждого из значений  $\nu$  определяют величины  $\tau(\psi; \nu)$  по фиг. 56 и далее суммируют их.

$$T_{тп} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \tau(\psi; \nu). \quad (60)$$

Аналогично по  $\psi$  и  $\nu_1$ , пользуясь фиг. 57, получают

$$T_{рп} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \tau_1(\psi; \nu_1). \quad (61)$$

Значения  $n = -\infty$  и  $n = +\infty$  в формулах (60) и (61) поставлены чисто теоретически. Практически в зависимости от качества обрабатываемого материала и режима работы часто бывает достаточно ограничиться значениями  $n$ , не выходящими за пределы  $\pm 3$  или  $\pm 4$ , так как остальными членами сумм можно пренебречь.

Значения функции  $\tau_3$  рассчитываются непосредственно по графику, фиг. 57 по линии для  $\nu_1 = 0$ , причем абсциссы  $\psi$  определяются в этом случае по формуле  $\psi = y/l_3$ .

Покажем пример расчета по формулам (55) — (56), воспользовавшись экспериментальными данными по алмазному точению титанового сплава ВТ4 ( $a = 0,043$  см<sup>2</sup>/сек;  $\lambda = 0,031$  кал/см. сек. град), полученными в НИИЛ. Обработка производилась алмазным резцом с главным углом в плане  $\varphi = 30^\circ$ , передним углом  $\gamma = 0^\circ$ . Режим резания:  $t = 0,04$  мм;  $s = 0,03$  мм/об;  $v = 326$  м/мин. В условиях опыта получены следующие данные:

а) силы резания  $P_z = 0,93$  кГ;  $P_y = 1,96$  кГ;  $P_x = 0,41$  кГ.

б) размеры контактной площадки на передней поверхности резца  $b \times l_n = 0,21 \times 0,60$  мм<sup>2</sup>, по задней поверхности  $b_3 \times l_3 = 0,08 \times 0,1$  мм<sup>2</sup>.

в) размеры сечения стружки  $0,22 \times 0,018$  мм<sup>2</sup>, что позволило установить коэффициенты усадки  $k = 1,3$ ;  $k_b = 2,62$  и  $k_l = k \cdot k_b = 3,4$ .

Подставляя известные величины в формулы (57) — (59), получаем:  $R_d = 9,46$ ;  $b^* = 0,537$ ;  $R = 0,236$ .

Переходим к определению функций  $T_{тп}$  и  $T_{рп}$ . Это сделано в табл. 16. Расчет выполнен для центральной точки контакта между стружкой и резцом ( $\psi = 0,5$ ).

Предварительно рассчитаны значения  $\nu = 2Rn^2$  и  $\nu_1 = Rn^2$  для  $n$  до  $\pm 3$ , по ним и значениям  $\psi$  определены величины  $\tau(\psi; \nu)$  и  $\tau_1(\psi; \nu_1)$ , занесенные в табл. 16. При определении функций

$$T_{тп} = \sum_{n=-3}^{n=+3} \tau(\psi; \nu)$$

$$T_{\text{рп}} = \sum_{n=-3}^{n=+3} \tau_1(\psi; \nu_1)$$

значения  $\tau$  и  $\tau_1$  для  $n = \pm 1$ ;  $n = \pm 2$  и  $n = \pm 3$  берутся дважды, так как в суммы входят значения для  $n = +1$  и для  $n = -1$ , для  $n = +2$  и для  $n = -2$  и т. д. Так,  $T_{\text{тп}} = 1,00 + 2(0,22 + 0,03) = 1,5$ .

Таблица 16

Пример расчета значений функций  $T_{\text{тп}}$  и  $T_{\text{рп}}$  для точки  $x = 0,5l_{\text{п}}$  ( $\psi = 0,5$ ) при алмазном точении титанового сплава ВТ4 ( $R = 0,236$ )

$n$	$\nu$	$\tau(\psi; \nu)$	$\nu_1$	$\tau_1(\psi; \nu_1)$
0	0	1,00	0	0,71
$\pm 1$	0,472	0,22	0,236	0,16
$\pm 2$	1,89	0,03	0,945	0,02
$\pm 3$	4,24	$\approx 0$	2,12	$\approx 0$
$T_{\text{тп}} = \sum_{n=-3}^{n=+3} \tau(\psi; \nu) = 1,5$			$T_{\text{рп}} = \sum_{n=-3}^{n=+3} \tau_1(\psi; \nu_1) = 1,07$	

Подставляя известные величины и результаты расчетов в формулы (55) и (56), получаем для условий примера:

$$\Theta(0,5l_{\text{п}}) = 0,103(1,5q_0 - 1,41 \cdot 1,07q_{\text{п}}) + 0,0047q_{\text{д}}$$

и

$$\Theta(y) = 0,0323(q_{\text{тз}} - q_3)\tau_3 + 0,0061q_{\text{д}}$$

Рассчитаем интенсивности теплообразующих потоков по формулам (42), (43) и (51); примем ориентировочно, что сила трения на задней поверхности  $F_{\text{тп}} = 0,05$  кГ, а нормальная сила  $N_3 = 0,1$  кГ, тогда  $P_{\text{ZO}} = 0,93 - 0,05 = 0,88$  кГ,  $P_{\text{NO}} = \sqrt{1,96^2 + 0,41^2} - 0,1 \approx 1,9$  кГ.

Следовательно,

$$q_{\text{д}} \approx 79000 \text{ кал/см.}^2\text{сек;}$$

$$q_0 \approx 9020 \text{ кал/см.}^2\text{сек;}$$

$$q_{\text{тз}} \approx 5000 \text{ кал/см.}^2\text{сек.}$$

Таким образом, для нашего примера:

$$\Theta(0,5l_{\text{п}}) = 1760 - 0,1555q_{\text{п}} \quad (62)$$

Рассчитаем также температуру в крайней точке контакта по задней поверхности кристалла. Для нее  $\psi = 1$  и по графику фиг. 57  $\tau_3 = \tau(1; 0) = 1$ . Следовательно, из (54) получаем:

$$\Theta(l_3) = 739 - 0,0323q_3 \quad (63)$$

Численные значения температур могут быть определены, если известны интенсивности тепловых потоков через контактные поверхности инструмента  $q_n$  и  $q_3$ . Задача о нахождении  $q_n$  и  $q_3$

относится не только к данному примеру, она является общей для всех случаев расчета температур при алмазном и обычном точении.

Определение интенсивности тепловых потоков  $q_n$  и  $q_3$  делается путем сравнения для одних и тех же точек на контактных площадках резца температур, рассчитанных отдельно со сторон обоих тел, находящихся в контакте.

Расчет со стороны стружки и изделия показан выше. Он приводит к выра-

жениям (62) и (63) для

примера.

Для расчета температур со стороны резца представим последний как клин с углом заострения  $\beta \approx 90^\circ$  и углом между кромками в плане  $\epsilon \approx 90^\circ$ . В этом случае, используя общие закономерности метода источников [9], можно получить для алмазных резцов расчетные формулы для определения температуры характерных точек  $L$  и  $S$  (фиг. 58) в таком виде

$$\theta(L) = 0,023 (q_n l_n A_n^L + q_3 l_3 A_3^L) \quad (64)$$

и

$$\theta(S) = 0,023 (b_n l_n A_n^S + q_3 l_3 A_3^S). \quad (65)$$

Коэффициенты  $A_n^L \dots A_3^S$ , отображающие влияние на температуру точек  $L$  и  $S$  источников, расположенных на передней и задней поверхностях инструмента, могут быть для резца с углом заострения  $\beta \approx 90^\circ$  определены по графикам на фиг. 59 и 60.

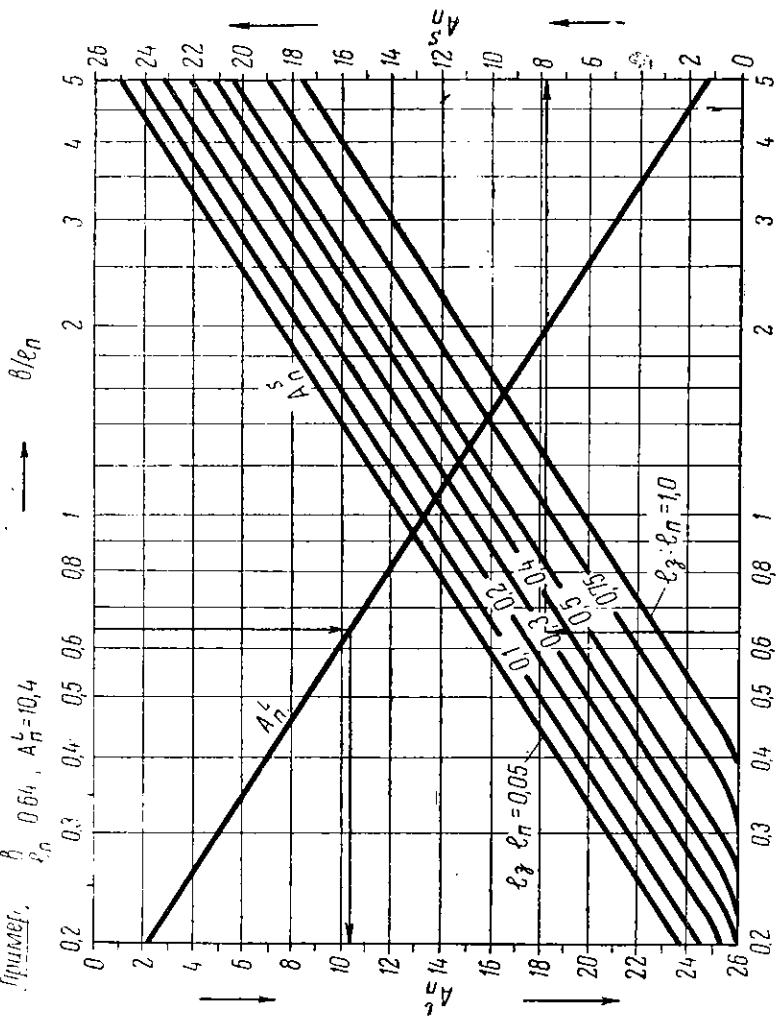
Для нашего примера имеем:

$$\frac{b}{l_n} = \frac{0,21}{0,6} = 0,35; \quad \frac{b_3}{l_3} = \frac{t}{\sin \varphi \cdot l_3} = \frac{0,08}{0,1} = 0,8; \quad \frac{l_3}{l_n} = \frac{0,1}{0,6} = 0,167.$$

По графикам фиг. 59 и 60 получаем:

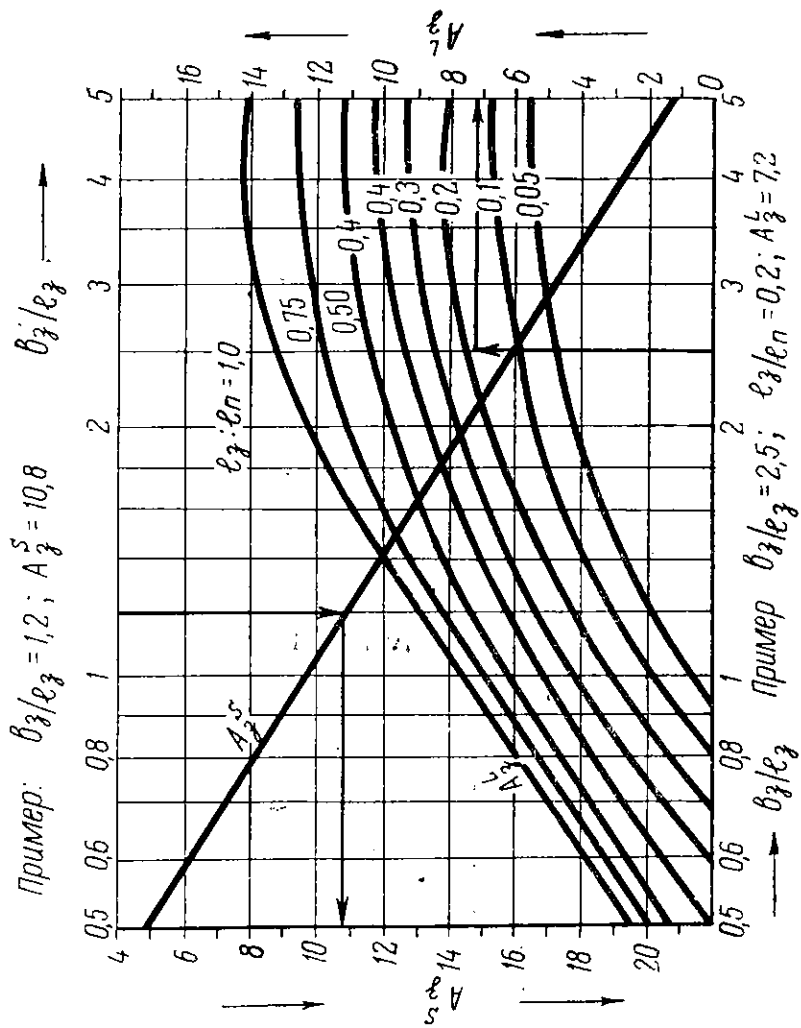
$$A_n^L = 6; \quad A_3^L = 1; \quad A_n^S = 4,7; \quad A_3^S = 8.$$

Пример:  $\beta = 0,64$ ,  $A_{\Pi}^L = 10,4$



Пример:  $\beta / \epsilon_{\Pi} = 0,64$ ;  $\epsilon_z / \epsilon_{\Pi} = 0,3$ ;  $A_{\Pi}^S = 7,8$

Фиг. 59. График для расчета коэффициентов  $A_{\Pi}^L$  и  $A_{\Pi}^S$ .



Фиг. 60. График для расчета коэффициентов  $A_3^L$  и  $A_3^S$ .

Следовательно, для нашего случая ( $l_n=0,6$ ;  $l_s=0,1$ ) по формулам (64) и (65) находим:

$$\Theta(L) = 0,083q_n + 0,0023q_s, \quad (66)$$

$$\Theta(S) = 0,065q_n + 0,0184q_s. \quad (67)$$

Теперь можем приравнять (66) к (62), а (67) к (63), так как точка  $L$  имеет абсциссу  $x=0,5l_n$ , а точка  $S$  имеет  $y=l_s$ . Получаем два уравнения с двумя неизвестными  $q_n$  и  $q_s$ , решая которые находим  $q_n=7316$  кал/см<sup>2</sup>сек и  $q_s=5190$  кал/см<sup>2</sup>сек. Следовательно, при рассматриваемом режиме алмазного точения сплава ВТ4 в центральной точке контакта на передней поверхности расчетная температура составляет:

$$\Theta(L) = 1760 - 0,1555 \cdot 7316 = 620^\circ,$$

а в крайней точке контакта на задней поверхности

$$\Theta(S) = 739 - 0,0323 \cdot 5190 = 571^\circ.$$

Эти значения, конечно, не являются совершенно точными, так как в расчете сделан ряд допущений и в первую очередь принято, что интенсивности теплообмена  $q_n$  и  $q_s$  на каждой из площадок контакта распределены равномерно. Более точные расчеты показывают, что это не так: интенсивности тепловых потоков распределены на каждой из площадок контакта неравномерно, что вносит изменения в результаты расчета температур. Однако для ориентировочных расчетов, как показывает опыт, можно применять изложенный выше метод, так как общий порядок температур, получаемых этим путем, удовлетворительно согласуется с реальными их значениями.

Проанализируем результаты приведенных выше расчетов вместе с данными о расчетных температурах алмазного точения для других материалов и режимов резания. Эти данные приведены в табл. 17 по результатам опытов, выполненных в НИИЛ Л. Е. Батриным и Ю. В. Туралиным под руководством автора.

Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что при работе кристаллами алмаза оба тепловых потока  $q_n$  и  $q_s$  направлены в тело резца. Это существенно отличает процесс алмазного точения от процессов обычного точения другими инструментальными материалами. Как известно, при обычном точении острыми инструментами тепловой поток  $q_n$  направлен в резец, а тепловой поток  $q_s$ , как правило, из резца — в изделие. Высокая теплопроводность алмаза приводит к тому, что здесь оба тепловых потока направлены в инструмент. Особенно интенсивны эти потоки при обработке малотеплопроводного титанового сплава, когда практически вся теплота, образующаяся при резании, может уходить через контактные площадки в тело инструмента.

Столь активный отвод тепла в инструмент является важной положительной характеристикой процесса алмазного точения. Прежде всего он способствует снижению температуры на кон-

Таблица 17

Силы резания, усадка стружки, размеры контактных площадок, тепловые потоки и температуры при алмазном точении (Резец  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\varphi = 30^\circ$ ;  $r = 1$  мм;  $\theta_3 = 2t$ ;  $l_3 = 0,1$ )

Обрабатываемый материал	Режим резания			Силы ( $\kappaГ$ )			Усадка			Размеры контактной площадки (мм)		Тепловые потоки (кал/см <sup>2</sup> ·сек.)		Температуры	
	t	s	v	P <sub>z</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>x</sub>	k	k <sub>b</sub>	k <sub>l</sub>	b	l <sub>n</sub>	q <sub>n</sub>	q <sub>3</sub>	$\theta(L)$	$\theta(S)$
Титановый сплав BT4 . . . . .	0,02	0,03	164	0,45	0,84	0,16	—	—	—	—	0,66	—	—	—	—
	0,03	»	»	0,64	1,11	0,20	1,06	2,08	2,2	0,13	0,70	5740	3900	137	127
	0,04	»	»	0,90	1,79	0,44	1,10	2,30	2,53	0,18	0,82	5050	2470	280	235
	0,05	»	»	1,06	2,47	0,50	1,16	2,50	2,9	0,20	0,90	4328	3670	277	232
	0,04	»	»	204	0,93	1,90	0,39	1,29	2,34	3,0	0,19	0,87	4814	5976	279
Алюминий . . . . .	0,04	»	326	0,93	1,96	0,41	1,30	2,62	3,4	0,21	0,60	7316	5190	620	571
	0,04	»	157	0,30	0,24	0,05	1,71	2,7	4,6	0,22	0,42	628	1460	67	120
	0,05	»	»	0,43	0,35	0,07	2,15	2,6	5,6	0,26	0,41	675	1400	80	137
Бронза . . . . .	0,03	»	156	0,43	1,03	0,18	1,30	3,0	3,9	0,18	0,14	3720	5360	236	190
	0,04	»	»	0,54	1,20	0,19	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,05	»	»	0,64	1,39	0,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	»	0,04	»	0,78	1,50	0,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. В таблице приведены избыточные температуры. Действительные значения температур получим, прибавляя к  $\theta(L)$  и  $\theta(S)$  температуру окружающей среды ( $\approx 20^\circ C$ ).



тактных поверхностях. Так, если бы в условиях примера, для которого мы делали расчет, инструмент был бы не из кристалла алмаза, а из твердого сплава ВК8, то тепловые потоки были бы  $q_n = 4870$  кал/см<sup>2</sup>сек (в резец) и  $q_s = -770$  кал/см<sup>2</sup>сек (в изделие), а температуры:  $\Theta(L) = 1004^\circ$  и  $\Theta(S) = 763^\circ$ , то есть по передней поверхности на 62%, а по задней на 34% выше, чем при алмазном точении. Баланс тепла в условиях примера при точении титанового сплава алмазом: в резец 71%, в стружку 28,7%, в изделие 0,3% от общего количества тепла. При точении сплавом ВК8 — в резец 49%, в стружку 46,8%, в изделие 4,2%. Следовательно, в изделие при обработке алмазом поступает значительно меньше тепла, чем при точении твердым сплавом. Это создает основу для получения малых температурных деформаций изделий в процессе обработки, содействует повышению точности продукции. Что же касается повышенного количества тепла, направляющегося в алмазный резец, то оно не может отразиться на точности изделия за счет тепловой деформации инструмента в большей мере, чем при работе твердым сплавом. Вспомним, что алмаз имеет весьма малый коэффициент линейного расширения, примерно в пять раз более низкий, чем для сплава ВК8. Следовательно, даже при повышении доли тепла в инструменте примерно в 1,5 раза алмазный резец будет изменять свой размер на величину примерно втрое меньшую, чем резец из сплава ВК8. Это также ведет к повышению точности обработки.

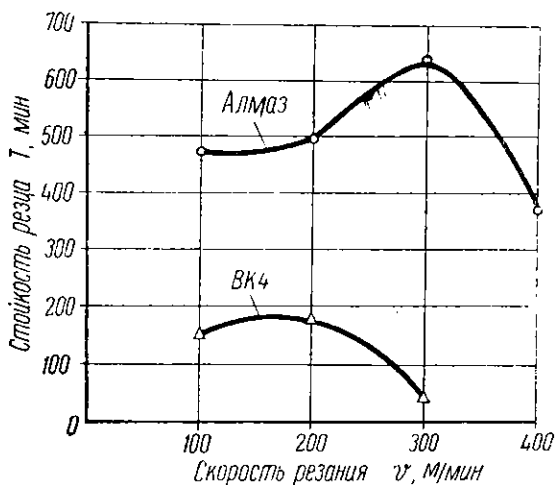
Режимы, приведенные в табл. 17, за исключением случая точения ВТ4 со скоростью резания 326 м/мин, приводят к сравнительно низким температурам. Это свидетельствует о больших резервах повышения скоростей и производительности процесса точения с точки зрения тепловых явлений и износа резцов. В экспериментах, рассматриваемых в табл. 17, скорость резания ограничивалась размерами изделий и кинематическими возможностями станка типа EMUS производства Венгерской Народной Республики, на котором в НИИЛ проводились опыты по алмазному точению. В других случаях скорости резания при обработке алюминия и бронзы могут быть значительно увеличены.

При обработке ВТ4 со скоростью  $v = 326$  м/мин получены температуры, приближающиеся к опасному для алмаза пределу нагревания. Следовательно, при точении титанового сплава не надо применять скорости резания более 300—350 м/мин.

К такому же точно выводу пришли исследователи, изучавшие износ и стойкость алмазных резцов непосредственно.

На фиг. 61 приведен график, заимствованный нами из работы А. В. Руднева и А. П. Добычиной [57], наглядно показывающий, что при точении титанового сплава ВТ3-1 скорость резания  $v = 300$  м/мин является наивыгоднейшей ( $t \times s = 0,04 \times 0,03$ ). Скорости резания  $v = 300$  м/мин в качестве верхнего предела при точении титана имеются и в других рекомендациях [5; 55].

Таким образом, результаты теплофизического анализа хорошо согласуются с результатами непосредственных экспериментов. По-видимому, в дальнейшем, по мере накопления опыта, можно будет анализом тепловых явлений отчасти заменить или сократить дорогостоящие опыты по непосредственному изучению износа и стойкости алмазных резцов.



Фиг. 61. Стойкость алмазного резца и резца из твердого сплава ВК4 в зависимости от скорости резания при обработке титанового сплава ВТ3-1 [57].

Рассматривая табл. 17 далее, можно заметить, что при алмазном точении титана и бронзы радиальная составляющая силы резания  $P_y$  превышает силу  $P_z$ . Только при обработке алюминия силы  $P_y$  меньше  $P_z$ , но и в этом случае отношение  $P_y:P_z$  оказывается значительно большим, чем при обычном точении. Это позволяет сделать вывод о необходимости применять при алмазной обработке инструменты и методы закрепления изделий, обеспечивающие воз-

можно более высокую жесткость системы «станок — приспособление — изделие — инструмент». Повышение жесткости диктуется также необходимостью снижать вибрации и обеспечивать условия для спокойной работы хрупких кристаллов алмаза.

Сравнительно невысокие температуры, имеющие место при алмазном точении, наряду с весьма острым режущим лезвием обеспечивают остаточные напряжения в изделиях в 2—3 раза более низкие, чем при обработке твердыми сплавами.

#### РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ, СТОЙКОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ АЛМАЗНОМ ТОЧЕНИИ

Применяя алмазное точение, как это видно из рассмотрения физики процесса, можно получить высокую точность и качество обработанных поверхностей. Однако эффективно и экономически целесообразное использование алмазных кристаллических инструментов будет иметь место только тогда, когда при подготовке и внедрении в производство этого процесса будут соблюдены необходимые условия в отношении состояния и конструкции оборудования, режимов резания и правил эксплуатации инструмента.

К станкам, на которых производится обработка алмазными резцами, предъявляются следующие основные требования [55]:

а) отсутствие заметных вибраций при точении на рабочих режимах (частота колебаний не выше 30 гц, амплитуда не более 10 мк); станок должен быть установлен на виброустойчивый фундамент, вращающиеся детали станка и приспособлений должны быть тщательно отбалансированы; зубчатые передачи желательно заменить более плавными, например, передачами с помощью бесконечных клееных ремней и т. д.;

б) радиальное биение шпинделя не должно превышать 5 мк, а при обработке особо точных изделий малого диаметра — 2 мк.

в) подача инструмента должна осуществляться плавно;

г) станки, предназначенные для алмазного точения, не должны использоваться для других работ, в частности, для работ с большими нагрузками (обычное точение и т. д.).

Требованиям алмазного точения удовлетворяет ряд станков, выпускаемых отечественным станкостроением. Одним из лучших является станок 1В616, выпускаемый Средне-Волжским ордена Трудового Красного Знамени станкостроительным заводом.

Этот станок, предназначенный для выполнения финишных операций, имеет отдельный привод главного движения, коробку скоростей, установленную в тумбе. Приводной электродвигатель мощностью 2,8 квт установлен на задней стенке тумбы.

Нижний диапазон чисел оборотов (8—200 об/мин) передается шпинделю через перебор, верхний же ряд чисел оборотов (до 1600 об/мин) передается непосредственно от коробки скоростей на шпиндель станка клиновыми ремнями. Реверсирование и торможение осуществляются электромагнитными муфтами, встроенными в коробку скоростей.

Количество скоростей шпинделя — 21, пределы чисел оборотов  $8 \div 1600$  об/мин. Шпиндель станка установлен на опорах скольжения. При выполнении токарных работ движение со шпинделя на коробку подач осуществляется ременной передачей, при этом исключаются зубчатые передачи передней бабки и гитары сменных шестерен.

Коробка подач закрытого типа. Она позволяет осуществлять мелкие продольные подачи в пределах  $0,01 \div 0,6$  мм/об и поперечные в пределах  $0,005 \div 0,33$  мм/об, а также нарезать стандартные резьбы без переналадки сменных зубчатых колес.

Наибольший диаметр обработки над станиной — 320 мм. Расстояние между центрами станка — 500 мм. Обточку можно производить с выключением продольной подачи по жесткому упору. В случае необходимости жесткий упор может быть заменен индикаторными устройствами, обеспечивающими точный отсчет перемещения резца в продольном и поперечном направлениях.

Станок обеспечивает точность обрабатываемой детали в следующих пределах: овальность 0,002 мм, конусность 0,003 мм на длине 170 мм от торца шпинделя.

Кроме станка 1В616 для алмазного точения могут применяться: станки 1Э610 и 1Э616 завода «Станкоконструкция», станки моделей 1К62Т и 1М620 завода «Красный Пролетарий», алмазо-расточные станки моделей 2706 и 2А710 Одесского завода радиально-сверлильных станков.

Из числа зарубежных моделей для алмазного точения могут применяться станки SV18R (Чехословакия), EMUS (Венгрия), VDF, «Кергер» и «Монарх» (ФРГ), «Эксцелло» (США), «Шайлинг» (Швейцария).

Кроме упомянутых станков общего назначения алмазное точение может производиться и на специализированных станках, особенно широко распространенных в часовой и приборостроительной промышленности нашей страны.

Режимы алмазного точения в каждом конкретном случае должны выбираться исходя из свойств обрабатываемого материала, требуемой чистоты обработанной поверхности и жесткости системы «станок — приспособление — изделие — инструмент». Ориентировочные значения элементов режима резания приведены в табл. 18 [55].

Таблица 18

Режимы резания при алмазном точении

Обрабатываемый материал	$v$ , м/мин.	$t$ , мм	$s$ , мм/об.
Алюминий . . . . .	400 ÷ 500	0,01 ÷ 0,15	0,01 ÷ 0,1
Сплавы алюминия . . . . .	500 ÷ 600	0,05 ÷ 0,10	0,01 ÷ 0,08
Латунь . . . . .	400 ÷ 500	0,03 ÷ 0,06	0,02 ÷ 0,1
Баббит . . . . .	400 ÷ 500	0,05 ÷ 0,15	0,02 ÷ 0,1
Бронза оловянистая . . . . .	300 ÷ 400	0,05 ÷ 0,25	0,03 ÷ 0,08
Бронза свинцовистая . . . . .	600 ÷ 700	0,025 ÷ 0,05	0,02 ÷ 0,06
Медь . . . . .	350 ÷ 500	0,01 ÷ 0,30	0,02 ÷ 0,05
Титановые сплавы . . . . .	100 ÷ 300	0,03 ÷ 0,05	0,02 ÷ 0,05
Пластмассы (в том числе стеклотекстолит) . . . . .	500 ÷ 700	0,03 ÷ 0,05	0,03 ÷ 0,06

При этих режимах резания износ инструмента происходит главным образом по задней поверхности кристалла. Критерием притупления следует считать износ по главной задней поверхности порядка 0,15 ÷ 0,2 мм, что позволяет получить наибольший срок службы алмаза при надлежащем качестве обработанной поверхности. Алмазы весом 0,5 ÷ 0,6 карата допускают от 6 до 10 переточек. Стойкость инструмента между переточками может в первом приближении приниматься по формуле:

$$N \approx 1,25 \cdot 10^7 \frac{0,4 + 1,2A}{D \cdot L \cdot t} \cdot K_m \text{ шт.} \quad (68)$$

Формула (68) получена нами в результате обработки опытных данных НИИалмаза [55] и ВНИИ [57]. В нее входят:

$A$  — вес алмаза в каратах;  
 $D$  — диаметр, а  $L$  — длина обрабатываемого изделия, мм;  
 $K_m$  — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и равный:

при точении алюминия, дюраля, баббита	$K_m = 1,0$
» силумина	$K_m = 0,8$
» бронзы НВ < 100	$K_m = 0,9$
» бронзы НВ > 100	$K_m = 0,7$
» титановых сплавов	$K_m = 0,25,$

$i$  — количество проходов,

$N$  — количество изделий, обработанных за период стойкости.

Пусть, например, изделие  $D=20$  мм;  $L=10$  мм обрабатывается резцом с алмазом весом в  $0,7$  ст, причем точение производится в два прохода. За период стойкости будет обработано изделий из силумина:

$$N \approx 1,25 \cdot 10^7 \frac{0,4 + 1,2 \cdot 0,7}{20 \cdot 10 \cdot 2} \cdot 0,8 \approx 31000 \text{ шт.},$$

а из титанового сплава

$$N \approx 31000 \cdot \frac{0,25}{0,8} \approx 9700 \text{ шт.}$$

Существенным элементом правильной эксплуатации алмазных резцов является смазка и охлаждение в процессе резания. Основные требования, предъявляемые к рабочим жидкостям при алмазном точении, состоят в смазке трущихся поверхностей с целью воспрепятствовать образованию нароста. Нарост снижает работоспособность резцов и ухудшает качество обработанной поверхности. Только при обработке прочных материалов и материалов с высокими абразивными свойствами, когда на поверхностях контакта инструмента со стружкой и изделием возникают температуры, опасные для алмаза, существенным является охлаждающее действие жидкостей.

Из числа жидкостей, применяемых на практике, отметим: а) скипидар 30% + керосин 70%; б) сурепное масло 30% + вазелиновое масло 70%; в) сульфифрезол; г) раствор 5 ÷ 10% эмульсола в воде.

При работе алмазными резцами важно соблюдать ряд особых правил эксплуатации инструмента, кроме уже упоминавшихся выше. Прежде всего следует иметь в виду, что алмазные резцы являются точным и весьма хрупким инструментом. Поэтому их следует тщательно оберегать от случайного повреждения во время хранения и эксплуатации. Резец должен подводиться к изделию и отводиться от него при полном числе оборотов шпинделя.

Установка резца ниже центра не допускается вообще, а выше центра изделия — на величину, не превышающую 0,01 диаметра последнего. Необходимо стремиться к минимальным припускам, оставляемым под алмазную обработку, а также к высокой степе-

20. Пер А. Г. Алмазная и тонкая обработка в приборостроении. Оборонгиз, 1963.
21. Гельфанд А. Е., Новгородов А. С., Фотеев Н. К. Обработка твердых сплавов. Машгиз, 1963.
22. Смазочно-охлаждающие жидкости при резании металлов. Под редакцией М. И. Клушина. Машгиз, 1961.
23. Гаврилов Г. М., Пилинский В. И., Иванов Ю. М. Шлифование твердых сплавов с охлаждением распыленными жидкостями. Серия «Передовой научно-технический и производственный опыт» № 6-63-636/125. ГОСИНТИ, Москва, 1963.
24. Лебединский Н. П., Надеждина Н. В., Воронин Ю. Г. Алмазная заточка и доводка твердосплавного режущего инструмента на Горьковском автозаводе. «Станки и инструмент», 1963, № 12.
25. Дегтяренко Н. С. Изготовление и применение алмазного инструмента в Японии. «Станки и инструмент», 1963, № 7.
26. Tagasov L. P.—Le meulage à la meule diamant des aciers à forte teneur en vanadium. «Métallurgie et constr. méc.», 1932, № 11. См. также «Реферативный журнал. Технология машиностроения», 1963, № 6, реферат 6Б691. Изд. ВИНТИ, Москва.
27. Несмелов А. Ф. Алмазные инструменты в машиностроении. Машиностроение 1963.
28. Фрагин И. Е. Хонингование гильз тракторного двигателя брусками из синтетического алмазного порошка. «Станки и инструмент», 1963, № 10.
29. Oterloo H. J. Honing with diamond, «Industr. Diamond Rev.», 1962, № 254. См. также «Реферативный журнал. «Машиностроение», 1962, № 11. Реферат 14Б649. Изд. ВИНТИ, Москва.
30. Diamonds finish mill rolls to close tolerances, «Steel», 1961, № 7, См. также «Реферативный журнал. Технология машиностроения» 1962, № 2, 2Б673. Изд. ВИНТИ Москва.
31. Diamonds compounds for mould finishing. «Intern. Plast. Engng» 1961, № 4. См. также «Реферативный журнал. Технология машиностроения», 1962, № 1. реферат 1Б706. Изд. ВИНТИ, Москва.
32. Журнал «Британская промышленность и техника», 1961, № 5.
33. Neuartige Läppenscheiben aus Kunststoffgewebe für Diamantpasten. «Industrieblatt», 1962, № 3.
34. Федотов В. А. Состояние и перспективы применения алмазного инструмента при обработке неметаллических материалов. Изд. НИИалмаз, Москва, 1963.
35. Василевский В. В. Резание природного камня алмазными отрезными кругами. Изд. НИИалмаз, Москва, 1963.
36. Majewski St.—Przecinaki diamentowometalowe, «Mechanik», 1963, № 1.
37. Leynaert R. Meule de tronçonnage à abrasifs diamantés. Франц. патент, класс В 23 d, 1932.
38. Diamond-edge saw band. «Mach. and Tool Blue Book», 1963, № 4.
39. Резников А. Н., Лимонов И. П., Пилинский В. И., Яшин Г. Г. Режущий инструмент для автоматов и полуавтоматов, Куйбышевское книжное издательство, 1961.
40. Вероман В. Ю. Электроалмазная обработка твердого сплава, «Станки и инструмент», 1963, № 8.
41. Нишпорский А. З., Лавров И. А. Опыт внедрения алмазной заточки и доводки твердосплавного инструмента на киевском заводе «Большевик». Сборник «Алмазная заточка твердосплавного инструмента». Под редакцией В. Н. Бакуля, Киев, 1964.
42. Резников А. Н., Пилинский В. И., Лимонов И. П., Хорьков Л. Н. Резцы со свободной пайкой твердосплавной пластины. Журн. «Машиностроение», 1957, № 2.

43. Архипов Г. А. Алмазная обработка твердосплавного режущего инструмента на Горьковском автозаводе. «Станки и инструмент», 1963, № 5.
44. Цофин Э. Е. Новые станки для алмазной заточки. Сборник «Алмазная заточка твердосплавного инструмента». Под редакцией В. Н. Бакуля, Киев, 1964.
45. Соколовская В. В. Нанесение защитной пленки на инструмент. Изд. ВНИИ, 1958.
46. Комплект алмазных кругов к универсально-заточному станку мод. ЗА64М для заточки твердосплавного инструмента. Гостехиздат Украины, Киев, 1963.
47. Каратыгин А. М., Коршунов Б. С. Применение алмазов при шлифовании, заточке и доводке изделий из твердых сплавов. «Вестник машиностроения», 1961, № 11.
48. Коршунов Б. С. Алмазная обработка режущего инструмента. Изд. НИИалмаз, 1963.
49. Марков Р. И. Новая конструкция протяжки с твердосплавными ножами. Сборник «Высокопроизводительный режущий инструмент». Под редакцией к. т. н. Н. С. Дегтяренко, Машгиз, 1961.
50. Житницкий С. И. Сборная твердосплавная протяжка. Журн. «Станки и инструмент», 1962, № 7.
51. Обработка твердосплавных фасонных инструментов алмазными кругами. «Экспресс-информация», ВИНТИ, 1963, № 7, по журналу «Mach. moderne», 1962, № 644.
52. Ивенсен В. А. Изготовление твердосплавного мелкогабаритного фасонного инструмента из пластифицированных заготовок. Сборник «Высокопроизводительный режущий инструмент». Под редакцией к. т. н. Н. С. Дегтяренко, Машгиз, 1961.
53. Бродский А. М. Малогабаритный твердосплавный режущий инструмент. Куйбышевское книжное издательство, 1962.
54. Electro OPG diamond wheels. «Industr. Diamond Rev». 1962, № 255. См. также реферативный журнал «Машиностроение», 1962, № 18, реферат № 18Б446.
55. Резцы алмазные для продольного точения (РТМ 61—62). Стандартгиз, Москва, 1963.
56. Зорев Н. Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента. Журн. «Вестник машиностроения», 1963, № 12.
57. Руднев А. В., Добычина А. П. Алмазное чистовое точение сплава ВТЗ и стеклотекстолита СТ. Сборник трудов Всесоюзного научно-исследовательского инструментального института, Москва, 1961. выпуск 6—7.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
Основные свойства натуральных и синтетических алмазов . . . . .	6
Алмазные шлифовальные инструменты . . . . .	11
Общая характеристика алмазных шлифовальных кругов . . . . .	11
Теплофизика и динамика процесса шлифования алмазными кругами	23
Влияние элементов режима резания и характеристики круга на про-	
изводительность, экономичность и технологические показатели про-	
цесса алмазного шлифования твердых сплавов . . . . .	44
Охлаждение, смазка и очистка кругов при алмазном шлифовании .	54
Шлифование чугуна и легированных сталей алмазными инструмен-	
тами и порошками . . . . .	60
Шлифование и разрезка алмазными кругами изделий из неметалли-	
ческих материалов . . . . .	67
Электроалмазное шлифование . . . . .	72
Алмазная заточка и доводка твердосплавных режущих инструментов . .	74
Особенности организации заточных и доводочных работ в связи с	
применением алмазных инструментов . . . . .	74
Алмазные круги и режимы шлифования для заточных и доводочных	
работ. Эффективность алмазной обработки режущих инструментов	87
Новые конструкции твердосплавных режущих и мерительных инструмен-	
тов, применение которых становится возможным в связи с освое-	
нием алмазного шлифования . . . . .	95
Алмазные кристалльные инструменты . . . . .	104
Конструкция алмазных инструментов и некоторые вопросы техноло-	
гии их заточки . . . . .	104
Теплофизика и динамика процесса алмазного точения . . . . .	107
Режимы резания, стойкость и особенности эксплуатации инстру-	
мента при алмазном точении . . . . .	122
Литература . . . . .	127



***Арон Наумович Резников***

**АЛМАЗНЫЕ РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ**

Редактор Н. Е. Петропольская

Художник Н. А. Баранников

Технич. редактор В. М. Дурасова

Корректор С. С. Пасешниченко

Сдано в набор 18/VI-1964 года. Подписано в  
печать 3/X-1964 г. ЕО00311. Формат бумаги  
60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Физ. печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 8,52.  
Тираж 3000 экз. Цена 36 коп.

9-я типография им. Мяги управления по печати  
промышленного облисполкома, г. Куйбышев,  
ул. Венцека, 60. Заказ № 2082.

**КУЙБЫШЕВСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО**



*ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:*

**Шариков С. И.**  
**КЛЮЧИ ОТ РЕЗЕРВОВ В НАШИХ РУКАХ**  
Цена 4 коп.

**Скрипкии М. А.**  
**ВНУТРЕННЕЕ ШЛИФОВАНИЕ**  
Цена 4 коп.

**Лятов А. И.**  
**НА УСТАНОВКЕ КОНТАКТНОЙ ОЧИСТКИ МАСЕЛ**  
Цена 3 коп.

**Сорокин И. Н., Сапаровский С. В.**  
**ОБТЯЖКА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ**  
**ВИБРАЦИЙ**  
Цена 10 коп.

**Сб. под ред. М. К. Клебанова**  
**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ**  
**МЕХАНИЗАЦИЯ**  
Цена 47 коп.

36 коп.

КУЛЫШЕВСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
1964