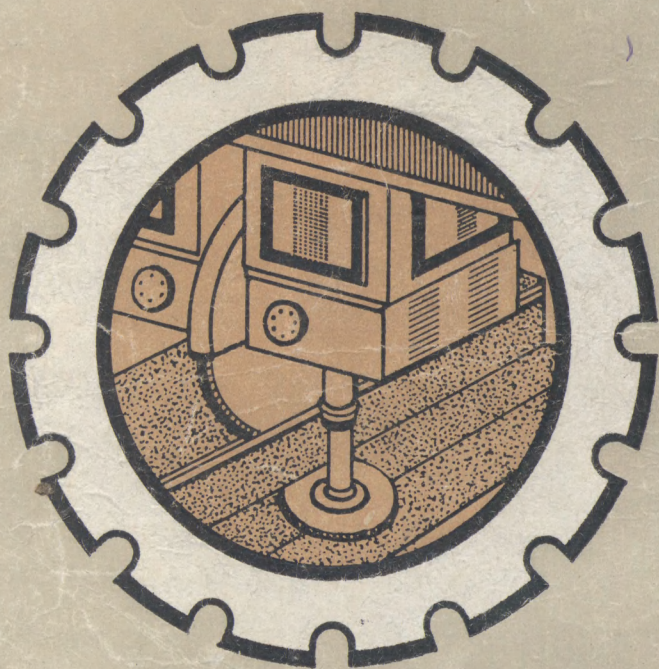


В. А. АЛЕКСАНДРОВ

**ОБРАБОТКА
ПРИРОДНОГО
КАМНЯ
АЛМАЗНЫМ
ДИСКОВЫМ
ИНСТРУМЕНТОМ**

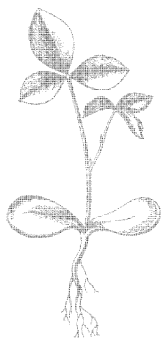


АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. АЛЕКСАНДРОВ

ОБРАБОТКА
ПРИРОДНОГО
КАМНЯ
АЛМАЗНЫМ
ДИСКОВЫМ
ИНСТРУМЕНТОМ

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1979



Scan AAW

Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом /
Александров В. А.— Киев : Наук. думка, 1979.— 240 с

В монографии дан анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований в области алмазно-абразивного резания материалов, а также приведены результаты практического применения прогрессивной технологии обработки природного камня алмазными дисковыми пилами. Описаны наиболее распространенные типы оборудования и конструкции инструмента для распиловки и окантовки облицовочно-декоративных изделий из природного камня. Рассмотрены вопросы теории рабочей поверхности алмазоносного слоя, работы единичных алмазных зерен и их композиций в инструменте. Освещены результаты исследований по выбору рациональной характеристики алмазоносного слоя инструмента и технологических режимов его работы. Представлены практические рекомендации по эффективному применению алмазных дисковых пил и даны примеры расчета технико-экономической эффективности их использования на различных технологических операциях.

Рассчитана на научных и инженерно-технических работников, мастеров и квалифицированных рабочих промышленности строительных материалов, а также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений строительного и горного профиля.

Ил. 70. Табл. 44. Список лит.: с. 231—237 (133 назв.).

Ответственный редактор

А. А. Сагарда

Рецензенты

И. Ф. Вовчановский, Ю. Д. Абрашкевич

Редакция технической литературы

А $\frac{31207-393}{M221(04)-79}$ 398-79. 2504020000

© Издательство «Наукова думка». 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ

Природный камень, обладающий уникальными декоративными свойствами и долговечностью, находит все большее применение в промышленном и гражданском строительстве. Однако до последнего времени его широкое использование ограничивалось неоправданно высокой стоимостью, отражающей низкий уровень технической оснащенности камнеобрабатывающих предприятий и технологии добычи и обработки.

Революционизирующее воздействие на бурный рост камнеобрабатывающей промышленности, как свидетельствует отечественный и зарубежный опыт в этой области, оказало прежде всего использование эффективных типов алмазных инструментов и прогрессивных технологических процессов обработки, созданных на их основе. В историческом аспекте развитие алмазных инструментов следует подразделить на два важных этапа. Начало было положено в XIX веке разработкой метода бурения камня инструментом с закрепленными алмазами, в результате чего появился новый режущий инструмент с чрезвычайно высокой производительностью. Затем, 75—80 лет назад, алмазы как инструментальный материал начали использоваться в дисковых и полосовых пилах для окантовки изделий и распиловки блоков.

Качественные изменения произошли в 50-е годы, когда вместо алмазных зерен размером 2—3 мм на основе достижений порошковой металлургии стало возможным оснащать стальные корпуса инструментов сегментами из дробленых природных алмазов (борт) и металлического порошка. С тех пор алмазные инструменты успешно применяются в сложном процессе обработки камня, причем в первую очередь на операциях окантовки изделий и распиловки дисковыми пилами блоков камня всех пород (известняк, мрамор, травертин, базальт, лабрадорит, сиенит, гранит и др.) и распиловки камня средней твердости и мягкого (известняк, мрамор и подобные материалы) полосовыми пилами.

Определенный прогресс достигнут в развитии таких трудоемких процессов, как распиловка камня алмазными канатными и ленточными пилами, обработка изделий алмазными шлифовальными головками, карьерная добыча блоков преимущественно из известняков и мраморов алмазными дисковыми и канатными пилами, цепными баровыми исполнительными органами.

Основное преимущество алмазных инструментов — прежде всего возможность получения высокой производительности обработки и размерной стойкости, превышающих аналогичные показатели традиционных инструментов на основе карборунда соответственно в 3—5 и 50—100 раз. Например, если производительность окантовки твердых пород камня карборундовыми кругами составляла в среднем 100—150 см²/мин, то алмазными — 400—600 см²/мин. Сейчас не кажется удивительной производительность распиловки мягких пород камня алмазными дисковыми пилами 3000—5000 см²/мин. Значительно повышаются при этом точность выполнения операций и качество обработанной поверхности. При алмазной обработке весьма существенным с точки зрения современных требований является возможность осуществления механизации трудоемких процессов и автоматизации основных операционных циклов.

В последние годы появились и начали развиваться поточные методы изготовления облицовочных изделий из природного камня, что стало возможным также благодаря алмазному инструменту.

Опыт показывает, что комплексное решение вопросов рационального сочетания преимуществ алмазного инструмента одновременно с совершенствованием и созданием нового технологического оборудования обеспечивает наиболее высокие технические и экономические показатели, особенно при массовом изготовлении изделий. Современный прогресс в камнеобрабатывающей промышленности позволяет надеяться, что уже в ближайшее время может быть успешно решена проблема такого высокого уровня производства облицовочной продукции из камня, когда по стоимости она не будет отличаться от искусственных облицовок.

В СССР важным фактором развития работ по совершенствованию процессов обработки камня на основе эффективных типов инструментов различного назначения явилось решение проблемы освоения промышленной технологии изготовления синтетических алмазов (1961 г.), обладающих разнообразными физико-механическими свойствами. Широкая номенклатура синтетических алмазов, некоторые марки которых не только не уступают природным алмазам, но и превосходят их, позволяет дифференцированно подходить к решению той или иной задачи в зависимости от условий обработки и типа инструмента.

В настоящее время процесс алмазной обработки и сопровождающие его явления активно изучаются в лабораториях ряда научно-исследовательских институтов (ВНИИАлмаз, НИИКС, ВНИПИИСтромсырье, ВНИИНеруд, ИСМ АН УССР, Карагандинский и Киевский политехнический институты и др.), передовыми предприятиями страны. Научными коллективами накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал, позволяющий плодотворно работать над совершенствованием и созданием принципиально новых технологических процессов обработки камня.

Одновременно с развитием исследований ведутся и конструкторско-технологические работы по созданию отечественного оборудования (Гипростроммаш, ВНИПИИстромсырье, ВНИИЧеруд, НИИКС, научно-исследовательская лаборатория Беличского экспериментально-исследовательского камнеобрабатывающего завода (БЭИКЗ) и др.), которое сейчас осваивается или уже освоено отечественной промышленностью.

Однако экспериментально-теоретических исследований в этой области все же недостаточно для решения выдвигаемых промышленностью проблем по интенсификации производственных процессов и коренному перевооружению отрасли, особенно применительно к быстро развивающимся и перспективным поточным способам обработки и изготовления продукции.

Основным материалом для данной книги послужили обобщенные результаты исследований, выполненных автором и сотрудниками лаборатории алмазной обработки строительных материалов ИСМ АН УССР, по изучению и разработке эффективных конструкций алмазного дискового инструмента и технологического процесса резания природного камня алмазным дисковым инструментом — одного из наиболее массовых и производительных процессов механической обработки.

Для анализа общего состояния развития процессов обработки камня привлечены последние достижения отечественной школы исследователей, а также зарубежных исследовательских групп и организаций. Более широко представлены разработки ИСМ АН УССР в области теории работы алмазоносного слоя дисковых пил и практические результаты реализации полученных выводов в эффективных конструкциях инструментов и новых технологических процессах обработки. Применительно к задачам практической деятельности камнеобрабатывающих предприятий даны сведения об основных типах современного оборудования, конструкциях алмазных дисковых пил и рекомендации по рациональному их применению.

Следует отметить, что при составлении книги не ставилась задача разработать обобщенные теоретические положения процесса алмазно-абразивной обработки камня. Нет сомнений в том, что в процессе дальнейших углубленных исследований всех аспектов теории и практики рассматриваемых процессов изложенные выводы будут уточняться и совершенствоваться.

Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность сотрудникам ИСМ АН УССР М. Д. Левину, А. П. Пирогову, Д. М. Мифлигу, принимавшим непосредственное участие в разработке и проведении ряда экспериментальных исследований, а также всем сотрудникам, оказавшим большую помощь в выполнении данной работы.

ТЕХНОЛОГИЯ АЛМАЗНОЙ ДИСКОВОЙ
РАСПИЛОВКИ

1. Анализ процессов обработки камня

Горные породы с красивыми окраской и рисунком, отличающиеся необходимой прочностью и погодоустойчивостью, а также достаточно монолитные, чтобы получить из них крупные камни (блоки), могут быть использованы для постройки или облицовки зданий и сооружений. Такие породы называют природным декоративным камнем.

Природный камень можно классифицировать по нескольким признакам: происхождению (генетическая классификация), обрабатываемости (технологическая классификация) и погодоустойчивости (классификация по долговечности). Наиболее важной с точки зрения применения декоративного камня является классификация по технологическим признакам, поскольку она определяет как выбор камня, так и способы его обработки.

По этим признакам камни делятся на три группы: твердые, средней твердости и мягкие.

Твердые камни. К этой группе относятся кварцит, гранит, диорит, сиенит, габбро и лабрадорит, содержащие минералы повышенной твердости, а потому труднообрабатываемые. Такие камни используются для наиболее ответственных сооружений, поскольку высокая погодоустойчивость (200—500 лет) позволяет сохранить облицовку на очень длительное время и в значительной степени удлиняет срок службы отделанных ими зданий. В то же время стоимость обработки твердого камня более высокая, что связано с повышенными затратами труда и материалов; это несколько ограничивает широкое применение.

Кроме кварцита, представляющего собой метаморфическую горную породу, к твердым камням относятся в основном изверженные породы. Поэтому в практике камнеобработки часто не различают разнообразные твердые породы, называя их наиболее распространенным твердым камнем — гранитом.

Различие в цветах твердых камней невелико. Встречаются камни от светло-серого до черного; несколько типов красного и зеленоватого цвета. Рисунок камня, определяемый пространственным расположением составляющих его минералов и, значительно реже, наличием прожилок, довольно однообразен, преимущественно пятнистый. Камень считается более декоративным, если рисунок представляет собой сложный, разветвленный узор; менее декоративны рисунки прямолинейные. Предел прочности при сжатии колеблется в большом диапазоне (1000—4000 кгс/см²), причем он больше для средне- и мелкозернистых структур.

Камни средней твердости. К этой группе относятся породы различного происхождения: изверженные (вулканические туфы), осадочные (известняки, травертины) и метаморфические (мраморы).

Вулканические туфы встречаются самых разнообразных цветов — от светло-розового до черного. Легко обрабатываются; прочность при сжатии 80—200 кгс/см². Туф применяется преимущественно как стеновой материал и отличается чрезвычайной погодоустойчивостью.

Известняки — карбонатные породы органического или химического происхождения. Основной породообразующий минерал — кальцит (CaCO₃); в состав может входить окись магния. При содержании окиси магния 6—12% — это магнезиальный известняк; 12—20% — доломитизированный и свыше 20% — доломит. Цвет известняков светло-серый, встречается и более темный с рисунком. Предел прочности при сжатии 50—600 кгс/см². Более прочные марки известняков используются как облицовочный материал, а более слабые — как стеновой.

Мраморы — поликристаллические горные породы, образованные в результате метаморфизации известняков и доломитов. Породообразующие минералы — кальцит и доломит. Крупнозернистые разновидности менее прочны (700 кгс/см²). Предел прочности мелкозернистых мраморов достигает 1500 кгс/см². Цвет и рисунок мраморов обусловлен присутствием солей железа, марганца (придают

красную и буроватую окраску), мелкозаспыленного гранита (серый цвет) и других веществ. В природе встречаются мраморы разнообразных расцветок: белые, серые, черные и цветные. Наиболее декоративными считаются цветные мраморы.

Мягкие камни. К этой группе относятся гипсовый и тальковый камни, а также некоторые разновидности доломита и известняка-ракушечника. Гипсовый камень — осадочная порода химического происхождения ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Предел прочности при сжатии 300—1000 кгс/см². Камень декоративен (имеются разновидности белого, розового, голубого и других цветов). Применяются в основном для мелких поделок, однако вполне пригоден и для облицовки внутренних помещений и даже фасадов зданий.

Тальковый камень — метаморфическая порода, образующаяся в результате воздействия горячих источников на ультраосновные породы. Весьма разнообразен по расцветке; предел прочности при сжатии около 500 кгс/см². Используется в основном для изготовления художественных изделий: ваз, чаш, статуэток и др.

По запасам и разнообразию природных каменных материалов СССР занимает первое место в мире. Красные и серые граниты Украины, Карелии, Урала и Узбекистана, черные габбро-нориты и габбро-диабазы, ирризирующие, с голубыми включениями лабрадориты Житомирщины (УССР), белые, розовые, серо-стальные и красные мраморы Урала, Узбекистана, Забайкалья, Алтай, Армении и Грузии, серо-коричневые конгломераты Таджикистана, известняки Крыма и Грузии, зеленые змеевики Урала, доломиты Эстонии — таков далеко не полный перечень разновидностей облицовочного камня, имеющегося в нашей стране. Свыше двухсот месторождений его учтено «Балансом запасов полезных ископаемых СССР». Суммарные запасы облицовочного камня только по промышленным категориям ($A + B + C$) составляют более миллиарда кубометров горной массы [71]. Из общего количества 31,2% (423 млн. м³) приходится на группу гранитов и гранодиоритов и 29,5% (400 млн. м³) на мраморы и мраморизованные известняки. Остальные запасы составляют долю других пород камня, также перерабатываемых на облицовочные и другие изделия (туфы, тешениты, габбро, кварцит и др.).

Высокие требования к повышению качества, долговечности и архитектурно-художественному оформлению возводимых в СССР зданий и многочисленных уникальных сооружений способствовали быстрому развитию камнедобывающей и камнеобрабатывающей промышленности. Производство облицовочных изделий из камня в стране

Т а б л и ц а 1

Объемы производства облицовочных и стеновых камней, тыс. м³

Год	Плиты облицовочные из			Стеновые камни и крупные стеновые блоки
	гранита	мрамор..	известняка, туфа и других аналогичных пород	
1965	303,0	262	355	—
1970	443,6	549	870	10793,9
1975	780,0	1070	1510	10548,0
1980	1031,0	2780	3080	12798,0

только в 1965—1975 гг. возросло более чем в три раза; к 1980 г. увеличение объемов выпуска должно возрасти в шесть-семь раз (табл. 1) [39].

Непрерывный рост потребности в облицовочно-декоративных изделиях из природного камня требует ускорения совершенствования технологии и средств его добычи и обработки.

Рабочий процесс, в результате которого камню придают заданные форма и размер, а лицевой поверхности — необходимая фактура, принято называть обработкой камня [69]. Она состоит из ряда операций, выполняемых последовательно различными механизмами. Полная механизация обработки камня является непреложной основой увеличения производительности труда и повышения качества облицовочной продукции при одновременном снижении стоимости ее изготовления.

В камнеобрабатывающей промышленности способы обработки природного камня определяются методом получения фактуры лицевой поверхности. Согласно ГОСТ 9480—69 различают два типа фактур: абразивные и фактуры скалывания. Получение абразивных фактур основано на операции резания, а фактур скалывания — преимущественно на ударных методах обработки. Абразивные фактуры включают следующие виды обработки природно-

го камня: полирование (полированная фактура), шлифование без накатки глянца (лощенная фактура), шлифование абразивами (шлифованная фактура), распиловка полосовыми и канатными пилами (пиленая А фактура), распиловка дисковыми и ленточными пилами (пиленая Б фактура).

Фактуры скалывания включают следующие виды обработки поверхности камня: прорезка гребенкой с твердосплавными резцами (рифленая фактура), воздействие струей высокотемпературного газа (термостойкая фактура), обработка крестовой бучардой (точечная фактура), обработка пластинчатой бучардой или катушей фрезой (бороздчатая фактура).

В промышленности наиболее распространены абразивные фактуры, получаемые резанием. Технологический процесс обработки резанием осуществляется на механизированных предприятиях в две стадии. Первая представляет обработку камня по форме и размерам (разделяется, в свою очередь, на приближенную и точную). Вторая стадия включает фактурную отделку камня, при которой его форма, как правило, не изменяется: обрабатывается только лицевая поверхность изделия — ей придается либо совершенная гладкость с блеском, либо заранее определенная степень шероховатости, зависящая от декоративных особенностей камня и его назначения.

Как показывает анализ структуры себестоимости облицовочных изделий из различных пород камня, наиболее трудоемким процессом (до 40—45% общих затрат) является одна из операций приближенной обработки — распиловка блоков на плиты или бруски-заготовки.

На долю фактурной обработки приходится 25—35%, а окантовки — до 10% общих затрат; стоимость сырья занимает в себестоимости продукции до 20—25%.

Таким образом, технологическая схема изготовления облицовочных изделий из природного камня предполагает наибольшие резервы интенсификации производственных процессов и снижения себестоимости прежде всего на операции распиловки блоков, так как процессы фактурной обработки, несмотря на определенные трудности и многоступенчатость их осуществления (до настоящего времени преимущественно традиционными способами), во многом зависят от качества исходной поверхности распила, определяемого методами первичной обработки. По-видимому, не случайно прогресс в камнеобрабатывающей

промышленности, вызванный широким применением алмазных инструментов, связан в первую очередь именно с этой операцией.

Так, если алмазная распиловка и окантовка природного камня применяется в промышленности уже более 30—35 лет, то процессы алмазного шлифования и полирования начали разрабатываться лишь в начале 70-х годов и до настоящего времени не нашли широкого распространения даже в ведущих странах, занимающихся обработкой камня.

Рассматриваемые процессы резания алмазными дисковыми пилами лежат в основе двух технологических операций изготовления облицовочных изделий из природного камня в стационарных заводских условиях — распиловки и окантовки.

В настоящее время на распиловке блоков наибольшее распространение получили полосовые пилы. При этом распиловка блоков из мрамора и других подобных материалов практически полностью осуществляется алмазным инструментом как за рубежом, так и у нас в стране. Необходимо отметить, что в самом начале развития алмазных инструментов в силу ряда причин полосовые пилы разрабатывались наиболее интенсивно и в короткое время получили широкое распространение. Стимулирующий фактор — относительная простота инструмента и возможность его использования на имеющемся оборудовании, которое только в последние 10—15 лет начало существенно совершенствоваться.

К неоспоримым преимуществам рамных распиловочных станков относится возможность одновременной установки до 40—70 полосовых пил, поэтому распиловка алмазными полосовыми пилами остается одной из основных при обработке пород средней твердости и с экономической точки зрения признается вполне удовлетворительной.

Практика применения таких инструментов отечественной промышленностью и зарубежными фирмами [31, 111, 118, 120] показывает, что производительность распиловки мраморов различных месторождений, травертина, базальта и других пород составляет в среднем 0,3—0,4 м²/ч на одну пилу при ее стойкости 100—300 м². Низкие скорости резания, не превышающие, как правило, 1,0—1,5 м/с, определенные сложности обеспечения установки пыльных лотен в плоскости распила и другое ограничивают возможность полного использования ресурсов алмазного инстру-

мента. Именно эти факторы являются одними из основных причин того, что до настоящего времени проблема эффективной алмазной распиловки гранитов алмазными полосовыми пилами все еще остается нерешенной в мировой практике. Известны лишь некоторые попытки освоить метод распиловки твердых пород камня этим инструментом в производственных условиях [31]. Так, фирмами «Морденти» (Италия) и «Лейритц» (ФРГ) изготовлены опытные образцы вертикальных рамных распиловочных станков, предназначенных для одновременной установки соответственно 10 и 5 алмазных полосовых пил. Проведенные эксперименты показали, что процесс распиловки крайне неустойчив из-за значительного отклонения пропила от плоскости резания («увода» инструмента), особенно при обработке высокопрочных разновидностей гранитов с высоким содержанием кварца. Это отклонение составляет пять и более миллиметров. Относительно стабильно осуществляется распиловка габбровых пород с производительностью до $0,3 \text{ м}^2/\text{ч}$ на одну пилу, хотя и в этом случае не исключается возможность «увода» пилы с последующей деформацией ее несущей основы или разрушением.

В силу указанных причин в мировой практике по-прежнему наиболее распространенным для распиловки твердых пород камня остается способ распиловки стальными перфорированными полотнами с использованием стальной или чугунной дроби. Однако данный способ малопроизводителен (до $0,05\text{—}0,10 \text{ м}^2/\text{ч}$ на одну пилу), характеризуется низким выходом продукции из-за большой ширины пропила ($10\text{—}15 \text{ мм}$), неудовлетворительным качеством поверхности распила (неровности достигают $3\text{—}5 \text{ мм}$ при неплоскости до 10 мм), что предопределяет высокую трудоемкость последующей фактурной обработки.

Существует также метод распиловки блоков алмазными канатными пилами, однако область, где они рентабельны, ограничена. Как правило, этот инструмент на камнеобрабатывающих предприятиях используется при распиловке блоков преимущественно мягких пород камня на плиты различной толщины. Установлено, что экономически оправдано применение алмазных канатных пил в том случае, если производительность распиловки составляет не менее $1,5 \text{ м}^2/\text{ч}$. Это условие соблюдается при обработке известняков, ракушечников, доломитов, мягких разновидностей мраморов. Опыт свидетельствует о том, что уже для

твердых мраморов производительность их распиловки не превышает 1 м²/ч [123].

Распиловка твердых пород камня производится канатными пилами, оснащенными (от одного до пяти) многожильными стальными тросами с использованием в качестве абразива свободных зерен карбида кремния. Канатные пилы легко перенастраиваются на любую толщину блоков, размер которых по длине практически не ограничен, что является одним из недостатков распиловки полосовыми пилами. Существенное достоинство этих инструментов при обработке мягких пород камня — возможность профильного распила. К недостаткам следует отнести большие затраты на обслуживание, сильное загрязнение окружающей среды, значительные габариты установок.

Крайне редко для распиловки применяются алмазные ленточные пилы. Видимо небольшая устойчивость этого инструмента не позволяет применять их широко. Однако имеется некоторый опыт его применения при контурной обработке каменных блоков небольших размеров [111].

В камнеобрабатывающей промышленности наиболее широкое распространение получили способы резания, основанные на применении алмазных дисковых пил, которые являются наиболее производительным инструментом из всех применяемых в этой отрасли. Достаточно высокая жесткость и устойчивость алмазных дисковых пил при незначительной толщине пропила, малые величины торцового и радиального биений и сравнительно низкие удельные давления на обрабатываемую поверхность, а также высокая размерная стойкость позволяют не только значительно улучшить технико-экономические показатели по сравнению с ранее применяемыми карборундовыми кругами, но и коренным образом расширить область их использования и изменить традиционно установившиеся взгляды на возможности дискового резания с точки зрения совершенствования и создания принципиально новых технологических процессов обработки.

На одной из наиболее трудоемких операций — распиловке блоков из природного камня средней твердости и мягких пород — в настоящее время прочно вошли в практику обработки алмазные дисковые пилы средних и больших диаметров — 1000—2000 мм. Особенно интенсивно внедрялся способ алмазной дисковой распиловки блоков больших размеров или некондиционных, для которых

нерационально применение алмазных полосовых пил. Успех данному способу обеспечили в первую очередь высокая производительность и возможность распиловки на плиты различной толщины без каких-либо проблем, связанных с демонтажом и переустановкой инструментов, как для полосовых пил. Практические результаты эксплуа-

Т а б л и ц а 2

Относительная величина стоимости различных методов алмазной распиловки мраморных блоков, %

Блоки	Годовой объем распиловки, м ²	Алмазная канатная пила	Алмазные полосовые пилы	Алмазные дисковые пилы большого диаметра
Крупные	12 000	80	100	—
Попеременно крупные	22 000	82	102	—
Небольшие	6 600	114	187	87
Небольшие с высотой менее 1 м	13 200	103	187	68

тации алмазных дисковых пил на этой операции фирмами «Хегер» (ФРГ), «Диамант борт» (Бельгия), «Дембитцер» (Бельгия), «Винтер» (ФРГ) и многими другими свидетельствуют о высокой работоспособности и экономичности их применения [30, 111, 120, 122, 123, 127]. Так, по производительности распиловки одна пила практически равноценна набору (30—40 шт.) алмазных полосовых пил при сравнительно низком удельном расходе алмазов (0,04—0,06 г/м²). Кроме того, для данной технологической ступени обработки дисковые пилы выгодно отличаются универсальностью применения и мобильностью перехода к выполнению различных операционных циклов при значительно более высокой чистоте, точности распила и простоте обслуживания машины в целом. Значительный интерес представляют материалы фирмы «Диамант борт» [114] о сравнении различных методов распиловки мраморов средней твердости, полученные в результате многочисленных наблюдений (табл. 2).

Обращает внимание следующая тенденция в изменении затрат: при уменьшении размеров обрабатываемых блоков они растут для способов распиловки канатными и полосовыми пилами и уменьшаются для дисковых пил. При

обработке небольших блоков с высотой менее одного метра преимущества алмазной дисковой распиловки достаточно убедительны. Длительное время при распиловке твердых пород камня (в первую очередь гранитов) не повышалась производительность обработки. В силу известных недостатков канатной и полосовой распиловки этот способ обработки на данном уровне технических возможнос-

Т а б л и ц а 3
Технологические режимы резания в зависимости от
вида подачи

Подача	Окружная скорость, м/с	Глубина резания, мм/проход	Скорость подачи, м/мин
Гидравлическая	30	5—10	2—3
Механическая	20	30—60	0,3—0,5

тей не мог привести к радикальным изменениям. В связи с этим усилия исследователей и практиков были направлены на разработку способов, основанных на применении наиболее производительных алмазных инструментов — дисковых пил. Первые опыты, связанные с созданием распиловочных станков и осуществлением технологии алмазной обработки дисковыми пилами большого диаметра (2—3 м), были начаты в 70-е годы во Франции, ФРГ, Норвегии и других странах, однако в течение нескольких лет вопросы ее рентабельности не имели однозначного ответа [31, 114, 121]. В настоящее время на камнеобрабатывающих предприятиях Западной Европы работает около 40—50 станков, оснащенных алмазными пилами большого диаметра. Практические результаты применения указанного способа распиловки показали его преимущества при обработке мягких гранитов, лабрадорита, габбро и других подобных пород камня. Например, на одном из предприятий [121] при распиловке черного гранита достигнута дневная выработка (две смены, машинное время 12—14 ч) 18—22 м², что соответствует производительности четырех канатных станков. Хотя в обоих случаях потребление электроэнергии примерно одинаково, качество распила алмазными пилами несравненно выше. Для размещения станков и приспособлений требуется меньшая площадь. В япон-

ской промышленности для распиловки гранитных блоков широко применяются алмазные дисковые пилы диаметром 2000 мм [130], причем рекомендуемые технологические режимы резания подразделяются в зависимости от привода подачи (табл 3)

Прогресс в создании совершенных конструкций специальных станков с автоматизацией главных и вспомога-

Т а б л и ц а 4

Показатели работоспособности алмазных пил большого диаметра при распиловке гранитов

Гранит	Диаметр, мм	Мощность привода вращения, кВт	Окружная скорость, м/с	Глубина резания, см/проход	Производительность, см ² /мин	Стойкость пилы, м ²
С небольшим содержанием кварца	2000	36,8	28	3,5	650	200—250
Смешанный	2500	55,2	35 *	3,5	700	600—650
С небольшим содержанием кварца	3000	73,5	35	1,5—2,0	400	600—700

Желательно чтобы окружная скорость была 28 м/с

тельных движений, наметившийся в последнее время, позволяет надеяться, что с помощью алмазных дисковых пил будет положительно решена и проблема распиловки самых труднообрабатываемых материалов — высокопрочных гранитов с большим содержанием кварца. Достаточно указать, что уже сейчас в ФРГ такой распиловке подвергается до 80% всех видов твердых пород камня. Высоких показателей при обработке гранитов достигли предприятия, использующие разработки фирмы «Диамант борт» (табл. 4) [123]

Работоспособность инструмента диаметром 3000 мм несколько ниже ожидаемой. На наш взгляд, это объясняется недостаточно правильным назначением технологических режимов работы, что будет освещено в последующих разделах

Уникальные возможности алмазного дискового инструмента в настоящее время все шире реализуются в различ-

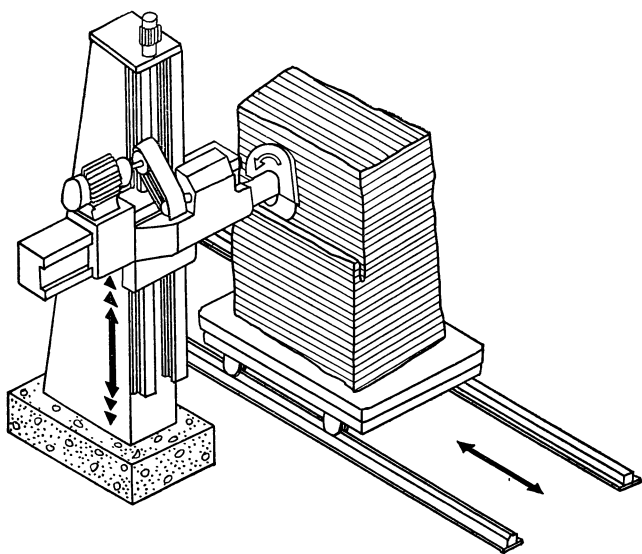
ных технологических приемах обработки природного камня. Например, в Италии сконструирован станок, принципиальная схема которого предлагает распиловку блоков из мрамора, известняка или агломерата на полосы, которые используются как плиты для половых покрытий или как подоконники [32]. Наряду с вертикально установленной пилой диаметром от 900 до 1200 мм в работе одновременно находится и пила диаметром 400 мм. Резка осуществляется на всю возможную для этих инструментов глубину, т. е., как правило, на 250—400 мм. При скорости подачи 1,5—3,0 м/мин производительность достигает 7500 см²/мин. Особо следует подчеркнуть чрезвычайно высокую производительность указанного способа, получившего название «Тальяблокки», которая соответствует производительности 35 алмазных полосовых пил. При больших преимуществах этого способа (до 50 раз) по производительности единичных инструментов износостойкость их практически одинакова. Оценивая оба метода, отметим, что стоимость дискового распиловочного станка значительно меньше; его можно быстрее настроить на различные размеры изделий, уменьшается трудоемкость их последующей обработки.

Помимо известных способов обработки блоков твердых пород камня до требуемых размеров в Японии используется способ, основанный на снятии верхних слоев алмазными дисковыми пилами диаметрами 175—350 мм (рис. 1). При периодическом повторении одной и той же операции — до входа пилы по самый фланец и последующая отбивка молотком — производится полная обработка блока на требуемой поверхности и до необходимых размеров. Расходы на обработку указанным способом составляют 7,50—15 западногерманских марок на 1 м², в то время как при распиловке стальными полосовыми пилами с абразивами или алмазными пилами большого диаметра они равны 20—40 западногерманских марок на 1 м² [130].

Аналогичный технологический принцип используется при выравнивании поверхности мраморных блоков на станке модели VR-66 (Италия) на Газалкентском камнеобрабатывающем комбинате Минстройматериалов УзССР. Операция осуществляется алмазной пилой диаметром 1100 мм, установленной в вертикальной плоскости, и алмазной пилой диаметром 500, установленной в горизонтальной плоскости. Получаемые при этом плиты подвер-

гаются окантовке и используются в качестве облицовочного материала.

Алмазно-дисковые распиловочные станки позволяют выпиливать гранитные плиты практически любой толщины. Получаемая при этом поверхность распила характери-



1 Способ обработки блоков алмазными пилами небольшого диаметра.

зуется высоким качеством, исключаям раздавливание изделий при последующем шлифовании.

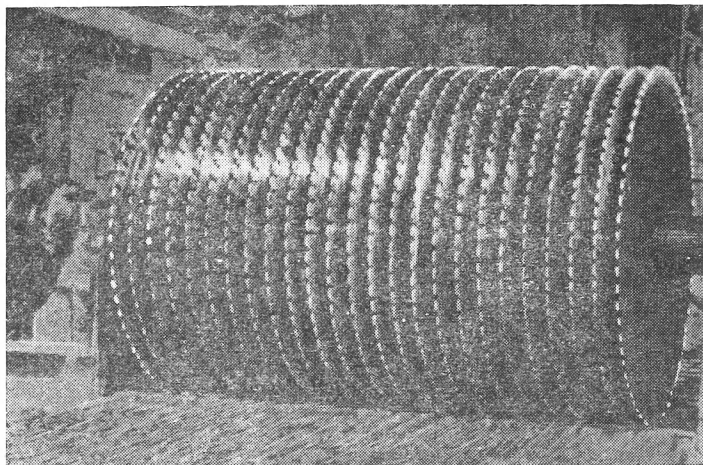
В ФРГ получила распространение алмазно-дисковая технология изготовления гранитных плиток для пола размером $400 \times 400 \times 10$ мм, предложенная фирмой «Винтер» [100]. Гранитный блок вначале разрезается алмазной пилой диаметром 2500 мм на заготовки толщиной 400 мм, которые затем распиливаются алмазной пилой меньшего диаметра — 1250 мм. Все операции носят многопроходный характер; глубина резания за один проход 20—30 мм. Технология обеспечивает, по данным фирмы «Винтер», увеличение выхода продукции на 35% по сравнению с традиционным способом изготовления гранитных плит на рамных станках. Недостаток ее — сравнительно невысокая производительность однодисковых станков.

За последнее время во ВНИПИИстромсырье разработан многопильный станок модели 3970-А со столом, поднимающимся по наклонным направляющим посредством специального механизма. В нем реализован один из путей повышения эффективности алмазно-дисковой распиловки за счет ввода в работу большего числа (до 12—16) инструментов диаметром 800, 1000, 1100 мм и решена проблема регулирования глубины резания несложным техническим устройством. Многостадийная технология изготовления гранитных изделий включает несколько вариантов получения брусков-заготовок толщиной 250, 400 мм распиловкой блоков или отходов на рамных или дисковых станках, распиловку их на плиты и при необходимости — окантовку плиток

Производственные испытания созданных станков на Московском камнеобрабатывающем комбинате Главмособлстройматериалов и Выборгском карьероуправлении Главленстройматериалов позволили выявить ряд преимуществ данной технологии по сравнению с технологией, основанной на применении рамных распиловочных станков. Отмечаются повышение производительности (в два-три раза), лучшее качество поверхности распила, невысокая стоимость оборудования (в три-четыре раза меньше стоимости рамных станков), конструктивная простота, компактность, высокая степень автоматизации рабочего процесса, возможность использования в качестве исходного сырья отходов камнедобычи и камнеобработки [97]. Проектная производительность станка — 2—4 м²/ч (по чистому машинному времени).

Высокие эксплуатационные качества алмазных дисковых пил позволяют осуществить на их основе технологию массового выпуска облицовочных деталей и изделий. Экспериментальные работы ИСМ АН УССР, ВНИИАлмаза, ВНИПИИстромсырье и других организаций [49, 70], а также зарубежный опыт [102, 103] свидетельствуют о больших перспективах алмазного многодискового способа изготовления облицовочной продукции из пород средней твердости и мягких. Применение такой технологии обеспечивает увеличение выхода готовой продукции (до четырех-пяти раз) одновременно с резким повышением производительности, пропорциональным числу одновременно устанавливаемых алмазных пил. Низкая шероховатость распила позволяет довести число последующих

операций по шлифованию и полированию до двух вместо трех-четырех при существующих способах. Себестоимость продукции при этом снижается более чем в два раза. Применение такой технологии стало возможным вследствие унификации облицовочных изделий и упрощения архитектурных форм.



2. Многодисковый исполнительный орган с 25 алмазными пилами.

Многодисковая распиловка осуществляется, как правило, алмазными пилами диаметром 800—1200 мм, число которых устанавливается в зависимости от производственных мощностей предприятий и типов имеющегося оборудования. Так, американской фирмой «Индиана лайметоун компани» для изготовления облицовочных изделий и подоконников используется станок, оснащенный 25 алмазными пилами диаметром 1029 мм (рис. 2). Производительность распиловки достигает $250 \text{ м}^2/\text{ч}$.

На операции подготовки брусок-заготовок, не требующей большого числа одновременно работающих инструментов, используются преимущественно алмазные пилы большого диаметра (1500—3000 мм). Применительно к данному процессу многими фирмами в целях повышения коэффициента использования инструмента создаются двухэтажные станки с алмазными дисковыми пилами,

расположенными друг над другом в вертикальной плоскости, как, например, станок фирмы «Жадем» (Франция), оснащенный двумя пилами диаметром 1500 мм. Двухъярусный станок фирмы «Ханзель Айзенверк» (ФРГ) также оснащен двумя алмазными пилами диаметром 1500 мм, закрепляемыми на двух горизонтальных валах. При этом верхний и нижний валы расположены с некоторым смещением, благодаря чему достигается перекрытие диаметров пил и, следовательно, совмещение пропилов.

За последние годы отечественной промышленностью достигнут значительный прогресс в создании и освоении новых технологических линий на основе алмазных дисковых пил для поточного производства облицовочных изделий и других строительных элементов из природного камня. В Гипростроммаше на основе результатов разработок научно-исследовательских институтов страны и данных зарубежной практики сконструирована такая линия для изготовления облицовочных плит из мрамора. Комплект станков этой линии предполагает последовательное выполнение всех операций до получения готовой продукции, причем основу ее составляет алмазно-дисковая распиловка

разрезка блоков на плиты-заготовки на двухъярусном распиловочном станке СМР-017;

распиловка плит-заготовок на бруски заданных размеров на разбрусочном станке СМР-016;

распиловка брусков на облицовочные плиты на многодисковом станке СМР-004;

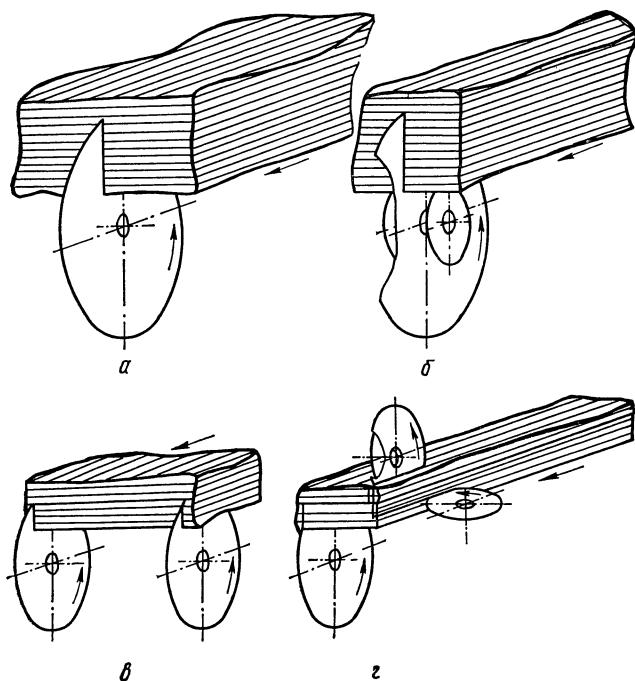
шлифование и полирование облицовочных плит на конвейере СМР-006.

Проектная производительность технологической линии составляет до 300 м² в смену [69]. Для обеспечения надежного крепления плит к крупным панелям при использовании их в индустриальном строительстве вспомогательный вал станка СМР-004 оснащен комплектом алмазных пил малого диаметра, прорезающих пазы в верхнем торце изделий.

Наметившаяся специализация отдельных предприятий и современные тенденции к интенсификации производственных процессов обусловили появление новых технологических схем обработки целевого назначения.

В 1975 г. комбинатом Крымнерудпром Минстройматериалов УССР разработана и установлена на Шархинс-

ком карьере технологическая линия из четырех станков, предназначенная для изготовления ступеней из гранодиорита (рис. 3). Отличительная особенность этой линии — расположение приводных валов с алмазным дисковым инструментом ниже обрабатываемых изделий. Рабочая



3. Схема технологической линии по изготовлению ступеней из гранодиорита на основе алмазно-дисковой распиловки:

а — первая операция; *б* — вторая операция; *в* — третья операция; *г* — четвертая операция

подача осуществляется перемещением стола станков с закрепленным на нем обрабатываемым изделием под действием грузов, а возврат в исходное положение — с помощью гидравлической системы.

Первая операция (станок № 1, рис. 3, *а*) — распиловка на два бруска-заготовки размером 1300 × 800 × 400 мм одной алмазной пилой диаметром 1100 мм на глубину 370 мм. В последующем образованные поверхности распила

будут передней лицевой стороной ступени и базовой основой для дальнейшей обработки.

Вторая операция (станок № 2, рис. 3, б) — получение рабочей поверхности ступеней. Станок оснащен двумя алмазными пилами диаметром 1100 мм, расположенными на соосных валах и получающих вращение от отдельных приводов. На каждом валу устанавливается также по две алмазные пилы диаметром 400 мм. Глубина резания для пил диаметром 1100 мм — 370 мм; 400 мм — 20 мм.

Третья операция (станок № 3, рис. 3, в) — окантовка торцов ступеней (придание размера по длине) двумя алмазными пилами диаметром 630 мм, установленными на отдельных валах, каждый из которых оснащен своим приводом вращения. Глубина резания 120—130 мм.

Четвертая операция (станок № 4, рис. 3, г) — образование плоскости «подступени», передней и задней базовых выборок пилами диаметрами 400 и 500 мм, которые установлены на одном валу, расположенном над изделием, и пилой диаметром 630 мм на втором валу, расположенном под изделием. Глубина резания для пил диаметром 500 мм — 100 мм; 400 мм — 50 мм; 630 мм — 65 мм.

Первоначально на стадии опытной проверки работоспособности поточной линии не было получено положительных результатов. Установленные на всех операциях обработки алмазные пилы на связке М50 серийного производства не обеспечивали заданных технологических параметров работы. Рабочий процесс сопровождался периодической потерей режущих свойств инструмента (через каждые 1,5 м² площади резания). Сменная производительность линии достигала всего 10—12 м.

Исследовательские работы, выполненные ИСМ АН УССР, позволили выявить резервы повышения производительности за счет конструктивных изменений конфигурации рабочей поверхности инструмента (на связке МОЗ), установления рациональных технологических режимов резания и выбора соответствующих характеристик алмазносодержащего слоя. Реализация их на практике одновременно с техническим усовершенствованием станков обеспечила значительное улучшение технико-экономических показателей данной технологии. В результате достигнуто увеличение производительности в 3,5 раза и снижение удельного расхода алмазов в 4 раза.

Накопленный опыт эксплуатации позволяет надеять-

ся, что такие поточные линии при соответствующей модернизации их могут найти широкое применение в камнеобрабатывающей промышленности страны.

В настоящее время в мировой практике процессы окантовки облицовочных изделий из всех типов природного камня выполняются исключительно алмазными дисковыми пилами. На первый взгляд эта операция по трудоемкости может показаться несущественной, однако она в значительной степени определяет интенсивность производства в целом, а в некоторых случаях, как, например, при изготовлении бордюрного камня или обработке специальных изделий, требующих разрезки на большую глубину (до 200—400 мм), является одной из основных. Особенно эффективно применение алмазных пил в тех случаях, когда поверхность распила необходимо в дальнейшем подвергать фактурной обработке.

Одно из основных направлений развития технологии окантовки и соответствующих алмазных дисковых пил — обеспечение максимальной производительности резания.

Заметных сдвигов в решении указанной проблемы добились ведущие западные фирмы объединенными усилиями производителей инструментов и оборудования, а также потребителей. Обобщенный анализ позволяет выделить следующие направления усовершенствования:

— создание оборудования с увеличенной мощностью привода вращения инструмента (до 1,5—2,0 раз);

— интенсификация исследовательских работ по повышению динамической жесткости и устойчивости несущей основы инструмента;

— создание новых типов связок, обладающих повышенными алмазодержанием и стойкостью к абразивному износу, обеспечение инструментальной промышленности алмазным сырьем (природным и синтетическим), а также выбор и обоснование рациональных областей применения этих связок,

— автоматизация главных и вспомогательных движений на операции алмазно-дискового резания.

Иллюстрацией могут служить данные о работоспособности алмазных пил, представленные фирмой «Диамант борт» (табл 5) [123].

Одновременно с этим алмазные дисковые пилы большого диаметра могут быть использованы и при добыче облицовочного и стенового камня в карьерных условиях,

хотя широкого распространения не получили из-за определенных трудностей в создании и эксплуатации соответствующего оборудования. Примерно 10 лет назад технология добычи этим инструментом была разработана в Бельгии [123]. Используются алмазные пилы диаметрами 2000, 2500, 3000 мм, обеспечивая глубину пропила соответственно

Т а б л и ц а 5

Изменение показателей работоспособности алмазных дисковых пил при резании гранита

Технология	Мощность привода вращения, кВт	Окружная скорость, м/с	Максимальная производительность, см ² /мин	Стойкость пилы м ²
Прежняя	1,1	45	300	90
	1,1	45	150	60
Новая	2,2	37	800	120
	2,2	27	500	80

П р и м е ч а н и я. В числителе приведены значения показателей работоспособности для гранита без кварца, в знаменателе — для гранита содержащего кварц. Новая технология — после 70-х годов (прим автора)

800, 1000, 1200 мм. Преимущества алмазно-дисковой добычи блоков природного камня состоят прежде всего в возможности получения высокой производительности (5—7 м²/ч) и блоков большой длины без перемещения станка.

Однако данная технология имеет, как показывает опыт, ограничения в угле наклона разрабатываемых пластов (15°) и требует для успешной работы достаточно транспортных средств для быстрого перемещения станка, а также мостового крана в карьере. На станках с алмазными пилами большого диаметра из пласта продольными и поперечными пропилами выпиливают блоки прямоугольной формы. Доказано, что при небольшой длине поперечных пропилов целесообразно применять врубную машину с цепным исполнительным органом.

Быстрый прогресс в реализации несомненных преимуществ алмазно-дисковой распиловки позволяет предположить, что в недалеком будущем данная технология получит широкое распространение. В этом смысле интересен опыт применения алмазных дисковых пил в западногерманской сланцевой промышленности при подземных разработках пластов [117]. Применявшаяся ранее выемка с исполь-

зованием врубовой машины и последующей разработкой канатными пилами была связана с большим объемом работ по отслоению и разделке блоков. Для более эффективной механизированной добычи сланцевых плит фирма в Эссене разработала пилу-вагонетку (рис 4), которая решила проблему. Конструкция этой установки, основанная на гидравлике, благодаря высокой маневренности позволяет распиливать крутопадающие, наклонные и горизонтальные пласты на длине до 2,5 м.

Установка может работать от электрического и дизельного двигателей. Она состоит из перемещающейся на гусеничном ходу рамы с двумя гидравлическими опорами по торцу. Ширина ходового механизма 1,5 м. В ходовой тележке находятся приводные электрические двигатели для маслососов и гидравлические тяговые двигатели, на ней установлена вращающаяся колонна с откидной консолью. На конце консоли — лафет с устройством для распиловки, где с помощью пяти (со сдвоенным действием) цилиндров и одного вращающегося привода пилу можно устанавливать в любой плоскости резания. Общая длина машины с консолью — 6,2 м, радиус действия по высоте — 5,5 м.

Транспортные салазки вместе с пилой осуществляют возвратно-поступательное движение по направляющим с помощью гидроцилиндров и канатной тяги. Пильное устройство имеет рамную конструкцию, гидравлический качающийся двигатель в нем ($N = 15$ кВт) приводит во вращение алмазную пилу диаметром 800—1000 мм ($n = 900$ об/мин). При глубине резания 280—300 мм скорость



4. Механизированная разработка сланцевых пластов алмазными дисковыми пилами в подземных условиях

подачи составляет 0,4—0,5 м/мин, что по сравнению со стационарными машинами можно считать удовлетворительным. На алмазных пилах толщина сегментов увеличена с 5,5 до 6,5 мм; стойкость инструмента — 600—700 м².

Одно из прогрессивных направлений, разработанное в Карагандинском политехническом институте и институте горного дела (ИГД) им. Скочинского, — использование в качестве инструмента исполнительных органов проходческих машин алмазных дисковых пил. На основании испытаний в промышленных и полигонных условиях их экспериментальных образцов установлено, что исполнительные органы, оснащенные алмазными пилами, в сочетании с отрывниками или ударниками эффективно разрушают горные породы с коэффициентом крепости от 5 до 8 по шкале М. М. Протодяконова [64].

Алмазные дисковые инструменты, установленные непосредственно на валу двигателей, имеют высокую работоспособность (до 0,5 м² щелей в минуту) и высокую стойкость (до 550—600 м² щелей по песчаникам); незначительная сила подачи (до 150—200 кгс на одну пилу) и масса пил с приводом, ввиду отсутствия понижающих редукторов, позволяют создать комбайны высокой производительности и низкой металлоемкости.

2. Конструкция алмазного инструмента

Алмазные дисковые пилы, широко используемые в камнеобрабатывающей и камнедобывающей промышленности, а также на многих операциях резания неметаллических материалов, по конструктивному признаку могут быть разделены на две основные группы: со сплошным и прерывистым режущими слоями.

Дисковые пилы со сплошным алмазосодержащим слоем изготавливаются обычно диаметром от 30 до 400 мм с толщиной корпуса от 0,07 до 3 мм. Основные преимущества этой группы инструментов — повышенная жесткость рабочего слоя за счет его непрерывности, что позволяет изготавливать их минимальной толщины, а также высокое качество резания, особенно при обработке хрупких материалов. Недостатком их является необходимость применения в процессе изготовления сложного крупногабаритного оборудования, что ограничивает возможные размеры пил и, следовательно, сужает область их применения.

Алмазные дисковые пилы с прерывистым слоем (сегментные) получили наибольшее распространение и изготавливаются диаметром от 200 до 3500 мм с толщиной корпуса 1,5—15 мм. Такие пилы состоят из корпуса (несущей основы инструмента), в качестве которого используется обычно закаленная инструментальная сталь 39—44 HRC; на периферии его имеются, как правило, радиальные пазы и закрепляются алмазосодержащие сегменты, изготавливаемые преимущественно методами порошковой металлургии. Следует отметить, что наличие корпуса — основной конструктивный признак, отличающий алмазный инструмент от инструмента из обычных абразивных материалов и обеспечивающий полное использование алмазонасного слоя, в то время как для последнего зажатая в оправке часть не используется.

Сегментные пилы даже больших диаметров могут быть изготовлены на сравнительно простом оборудовании, на их оснащение требуется меньше алмазов, а при работе они потребляют меньше электроэнергии. Эти преимущества, а главное возможность получения инструмента любого диаметра, обеспечивают сегментным пилам чрезвычайно широкую область применения.

Эффективность применения алмазно-абразивного инструмента зависит от правильного выбора характеристики инструмента и режимов обработки, которые определяются свойствами обрабатываемого материала, технологической операцией и техническими данными оборудования. Алмазно-абразивный инструмент характеризуется в первую очередь маркой и формой алмазов, зернистостью, концентрацией, связкой и, конечно, формой рабочей поверхности и конструкцией инструмента.

Наиболее важные параметры характеристики алмазно-абразивного инструмента — свойства применяемых алмазов и связка

Алмазы как инструментальный материал имеют ряд уникальных физических, химических, термических, электрических и механических свойств, чем существенно отличаются от всех известных природных и искусственных абразивных материалов. Алмаз — кристаллическая модификация углерода — отличается от графита, также состоящего из чистого углерода, расположением атомов в структурной решетке. Графит представляет собой слоистую гексагональную (шестигранную) структурную решетку, в то время

как алмаз имеет кубическую кристаллическую решетку, содержащую 18 атомов углерода, из которых восемь расположены в вершинах куба, шесть — в центрах граней куба и четыре — в центрах четырех из восьми кубов, образованных делением элементарной кубической ячейки тремя взаимно перпендикулярными плоскостями. Основные физико-механические свойства алмазов и других абразивных материалов приведены в табл. 6 [72, 98].

В настоящее время около 80% всех добываемых в мире алмазов используется для технических целей и только 20% — как ювелирные. В качестве инструментального материала алмазы нашли наибольшее применение (свыше 80%) в абразивных инструментах, для изготовления которых используются дробленые сортированные алмазы размером до 0,8 мм. Однако объемы применения природных алмазов в технике ограничены их дефицитностью из-за малого числа месторождений и низкого содержания алмазов в алмазоносной породе (не более 0,00001%).

В зависимости от качества, строения и твердости различают три вида технических алмазов: борт, баллас и карбонадо. Борт — непрозрачные сростки мелких алмазных кристаллов неправильной формы, не имеющие определенных плоскостей спайности. Кристаллы этого сорта — преимущественно стального цвета с голубоватым и желтым оттенками, обычно трещиноватые. Из борта изготавливают алмазный абразивный инструмент, а также режущие, правящие и буровые инструменты.

Карбонадо — тонкозернистые агрегаты алмаза овальной формы, плотные (эмалевидные) или пористые (кокс- и шлаковидные), состоящие из массы микроскопических кристаллов. Поверхность у них блестящая со смолистым оттенком, цвет черный, серый и зеленоватый. Кристаллы карбонадо менее хрупки, чем кристаллы борт.

Балласы — шаровидные агрегаты алмаза, большей частью радиально-лучистого строения. По сравнению с бортом балласы прочнее, имеют более твердую оболочку, но менее твердое, крупнозернистое ядро. Баллас и карбонадо используют для изготовления бурового инструмента.

Синтезирование в середине 60-х годов прочных алмазов марок АСВ, АСК и АСС создало необходимые предпосылки для успешного решения проблемы создания надежной сырьевой базы для изготовления камнеобрабатывающих инструментов различного назначения. Синтетические

Таблица 6

Физико-механические свойства алмазов и абразивных материалов

Материал	Плотность, г/см ³	Микротвер- дость, кгс/мм ²	Модуль упругос- ти, кгс/мм ²	Предел прочности кгс/мм ²		Коэффициент теплопровод- ности при 0° С, кал/(см·г·°С)	Удельная теплоемкость, кал/(г·°С)	Коэффициент линейного расширения 1/(°С·10 ⁻⁶)
				при сжа- тии	при изги- бе			
Алмаз	3,48—3,56	10 000	90 000	200 *	21—49	0,350	0,12	0,90—1,45
Карбид бора	2,48—2,52	3700—4300	29 600	180	21—28	0,025	—	4,50
Карбид кремния	3,12—3,20	3000—3300	36 500	150	5—15	0,037	0,14	6,50
Электрокорунд	2,00—2,10	2000—2400	—	76	8—9	0,047	0,18	7,50
Карбид титана	4,93	3200	32 200	385	—	0,058	—	7,42
Кубический нит- рид бора	3,44—3,49	7500—8500	72 000	50	—	—	—	—

* Зависит от марки алмаза и величины зерна

алмазы (АС) почти ничем не отличаются от природных (А). Они имеют одинаковые кристаллическую решетку и ее параметры, плотность, твердость и другие физико-механические свойства. Отличаются они друг от друга формой зерен, характером их поверхности, прочностью и хрупкостью. Синтетические и природные алмазы дополняют друг друга, и каждый из них имеет свои оптимальные области применения

Для изготовления алмазно-абразивного инструмента как из природных, так и из синтетических алмазов используют порошки, полученные дроблением исходного сырья с последующей классификацией по размеру и форме. Порошки представляют собой совокупность алмазных зерен различной величины и формы в виде монокристаллов их осколков и поликристаллов. В отличие от порошков из абразивных материалов алмазные порошки значительно абразивнее и тверже, благодаря чему инструмент, изготовленный из них, имеет высокую работоспособность. К алмазным порошкам предъявляют более жесткие требования по зерновому составу, прочности и абразивной способности, чем к порошкам из электрокорунда, карбида кремния, карбида бора и др.

В Советском Союзе принят и с 1 января 1971 г. введен в действие стандарт на синтетические алмазные порошки (ГОСТ 9206—70), которым впервые в мире регламентируются для шлифпорошков кроме размера зерен их прочность, а для микропорошков — абразивная способность и шероховатость обработанной ими поверхности.

Алмазные порошки делятся на две группы: шлифпорошки с размером зерен более 40—60 мкм, получаемые методом рассева, и микропорошки с размером зерен 40—60 мкм и менее, получаемые методом седиментации и центрифугирования. Контроль зернового состава шлифпорошков в СССР, как и в большинстве стран, ведется с помощью плетеных проволочных сит. При этом зернистость определяется размером в свету контрольных сит, через одно из которых зерна основной фракции алмазного порошка проходят, а на другом задерживаются. Зернистость шлифпорошков обозначают дробью. Например, обозначение алмазного порошка 400/315 показывает, что зерна основной фракции этого порошка проходят через сито с размером ячеек в свету 400 мкм и задерживаются на сите с размером ячеек 315 мкм.

В некоторых странах для определения размера зерен порошков применяется термин «число меш», означающее число отверстий на один погонный дюйм плетеных проволочных сит, используемых для рассева абразивных порошков, в том числе алмазных. Однако надо иметь в виду,

Таблица 7
Прочность при сжатии алмазных порошков, кгс

Зернистость	Марка алмазов					А (по данным работы [99])
	АСО	АСР	АСВ	АСК	АСС	
Широкий диапазон зернистостей						
400/250	—	—	1,18	—	—	—
250/160	—	0,64	0,83	—	—	—
160/100	0,20	0,44	0,60	—	—	—
100/63	0,17	0,32	0,45	—	—	—
63/40	0,15	—	—	—	—	—
Узкий диапазон зернистостей						
630/500	—	—	—	—	6,6	6,3
500/400	—	—	—	2,7	5,4	4,1
400/315	—	—	1,30	2,3	4,6	3,4
315/250	—	—	1,06	1,9	3,8	2,9
250/200	—	0,70	0,90	1,6	3,2	1,8
200/160	—	0,58	0,77	1,4	2,9	—

что число меш на один дюйм не может однозначно характеризовать зернистость порошка, так как оно указывает только на число отверстий, а не на их размер. Размер отверстия сита в свету, а следовательно, и зернистость порошка определяются двумя величинами — числом меш на один дюйм и диаметром проволоки, из которой изготовлено сито. Поэтому при характеристике зернистости числом меш необходимо обязательно указывать страну и номер стандарта. Данные по зернистости порошков для различных стандартов обобщены и представлены в работе [67].

В ИСМ АН УССР создана гамма шлифпорошков (АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС) из синтетических алмазов с широким диапазоном физико-механических и эксплуатационных свойств.

Шлифпорошки синтетических алмазов различных марок, выпускаемые с широким диапазоном зернистостей,

обязательно подвергаются проверке на прочность при одноосном сжатии. Прочность на сжатие порошков должна быть не менее значений, приведенных в табл. 7 [98].

Для оснащения дисковых сегментных пил в нашей стране используется широкий ассортимент природных и синтетических алмазов. В инструментах, выпускаемых серийно, применяются следующие виды природных алмазов:

алмазный концентрат (К) или алмазные зерна (З), полученные после дробления кристаллов. При этом концентрат и алмазные зерна должны быть рассеяны на ситах с сетками № 1,0; 0,8; 0,63; 0,5; 0,4 по ГОСТ 3584—53;

кристаллы алмазов различной формы и их обломки, сростки, а также алмазы, измельченные из однокристалльных инструментов и рассеиваемые на ситах с сетками № 1,2; 1,0; 0,8; 0,7; 0,5.

Для изготовления алмазных сегментов к дисковым пилам конструкции ИСМ АН УССР, регламентированным ТУ88 УССР ИСМ 445—74, используются шлифпорошки синтетических алмазов марок АСК зернистостью от 250/200 до 500/400 и АСС зернистостью от 250/200 до 630/500 по ГОСТ 9206—70.

В настоящее время действующие ГОСТ 16115—70 — ГОСТ 16117—70 («Круги отрезные сегментные алмазные») корректируются в соответствии с последними достижениями научных исследований, требованиями и возможностями промышленного производства. В числе разрабатываемых мероприятий решается также вопрос о включении в новый вариант ГОСТа на алмазные пилы синтетических алмазов марок АСК и АСС.

В зарубежной практике дисковые сегментные пилы оснащаются также как природными, так и синтетическими алмазами, причем в прогрессе, достигнутом в последнее время в области использования инструментов, одним из решающих звеньев являются разработка специальных марок алмазных порошков и четкая дифференциация областей их эффективного применения. Одной из ведущих фирм по производству алмазов — «Де Бирс» (ЮАР) [116] — для обработки камня используется широкий ассортимент алмазных порошков, которые классифицируются по трем основным признакам — размеру зерен, их прочности и форме поверхности. Из природных алмазов известны такие основные марки порошков (в направлении повышения прочности зерен): ЕМВ, ЕМВ-S, Дебдаст; из синтети-

ческих — SDA, SDA85 и SDA100. Зерна EMB имеют развитую поверхность (после многократного дробления), трещиноваты. Они хорошо закрепляются в связке и используются в тех случаях, когда требуются постоянные режущие свойства и точность распила, хотя для инструментов характерен большой удельный расход алмазов. Алмазы EMB-S и Дебдаст имеют более гладкую поверхность и применяются для резания труднообрабатываемых пород камня. Зерна синтетических алмазов характеризуются блочным строением и правильной формой, а их износ происходит микроскопами по трещинам до включений металлов и азота.

Заслуживает внимания разработанный фирмой «Де Бирс» метод определения ударной прочности зерен, который хорошо зарекомендовал себя при контроле качества порошков синтетических алмазов. Метод заключается в выделении из исходного сырья навески в два карата, зерна которой подвергаются в небольшой шаровой ступке точно заданной ударной нагрузке. Полученные данные являются основой для расчета показателя хрупкости контролируемой партии алмазных порошков.

Связки алмазосодержащих сегментов могут быть самых различных композиций, причем из всего многообразия применяемых в современных конструкциях дисковых пил связок следует выделить три основные группы: мягкие медно-оловянные, средней твердости на кобальтовой основе и твердые на основе карбида вольфрама и кобальта.

Наибольшее распространение при изготовлении сегментов получил метод порошковой металлургии, суть которого заключается в том, что смесь металлических порошков с другими компонентами подвергают уплотнению и последующей термообработке (спеканию) при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. В результате процессов диффузии, расплавления мягкоплавких компонентов с образованием растворов спрессованное тело после термообработки приобретает высокую прочность, электропроводность и другие физико-механические свойства, приближающиеся к свойствам аналогичных по составу материалов, полученных литьем. Использование в качестве исходных материалов порошков позволяет формовать в пресс-форме заготовки, точные по форме и размерам, что сводит к минимуму объем механической обработки.

В отличие от метода литья методы порошковой металлургии позволяют создавать композиции, включающие

несплавляемые друг с другом материалы, что и используется при закреплении алмазных частиц в металлической связке. Для повышения прочности закрепления алмазов в пористом слое необходимо использовать материалы, химически взаимодействующие с алмазами во время спекания. При этом прочность удержания обеспечивается не только силами механического закрепления, но и химическим соединением связки с алмазами. Такие связки называются адгезионно-активными.

Прочное закрепление алмазов обеспечивается при применении в качестве основы связки железа, кобальта, никеля, хрома, стали, твердого сплава и т. д. Однако эти материалы в чистом виде в качестве связок не применяются, так как они плохо прессуются при умеренных давлениях, а их термообработка должна производиться при высоких температурах. Поэтому для улучшения прессуемости и снижения температуры спекания в композиции на основе указанных металлов вводят пластичные материалы, такие, как медь, олово и др. Введение этих металлов снижает стойкость связки к абразивному изнашиванию, однако износостойкость алмазного слоя при этом может остаться достаточно высокой, так как введение пластичных материалов в связку приводит при прочих равных условиях к лучшему схватыванию и увеличению прочности удержания алмазных зерен.

Все типы мягких и средней твердости связок изготавливают в пресс-формах из жаропрочной стали при следующей последовательности операций: холодное прессование, спекание в восстановительной среде, горячее прессование (допрессовка во время остывания пресс-формы).

Режим горячего прессования: давление 1,6—6,5 т/см², температура до 850° С [72, 95].

В нашей стране в алмазных дисковых пилах, выпускаемых серийно и предназначенных для обработки природных камней средней твердости и мягких, применяется созданная ВНИИАлмазом связка на медно-оловянной основе М1; в инструментах конструкции ИСМ АН УССР аналогичного назначения — связка на медно-оловянной основе с добавкой окиси железа М3 [22], а для резания твердых пород камня — связка на кобальтовой основе МОЗ [23].

Наиболее твердые и износостойкие связки изготавливаются на основе твердых сплавов, как правило, методом горячего прессования при кратковременном воздействии (до

5 мин) высоких температур, достигающих 1400° С. Время, в течение которого алмазосодержащий слой подвергают высокотемпературному нагреву, строго ограничивается из-за возможного окисления и графитизации алмазов. Алмазосодержащие элементы по этому методу сначала прессуют в стальной пресс-форме при комнатной температуре и давлении до 8 т/см². После этого спрессованный элемент помещают в графитовую пресс-форму, в которой и производится его спекание при давлении до 0,3 т/см².

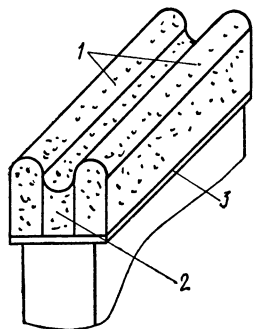
В аналогичных случаях используют также метод пропитки, суть которого заключается в том, что первоначально алмазы смешивают с металлическими порошками, прессуют из полученной смеси пористый брикет, который затем пропитывают расплавленным металлом, температура плавления которого ниже температуры плавления компонентов шихты. Отечественной промышленностью с использованием метода горячего прессования выпускается связка на основе твердого сплава М50, идущая на оснащение дисковых сегментных пил из природных алмазов, предназначенных для резания твердых пород камня.

Концентрация алмаза в объеме алмазосодержащего слоя может быть 25, 50, 75 и 100%. За 100%-ную концентрацию принято содержание алмазов 0,88 г в 1 см³ алмазосодержащего слоя. Указанная величина получена при переводе кубических дюймов в кубические сантиметры (один кубический дюйм равен 16,387 см³) при условии содержания 1,14 г алмаза в одном кубическом дюйме: $\frac{14,4 \text{ г}}{16,387 \text{ см}^3} = 0,88 \text{ г /см}^3$.

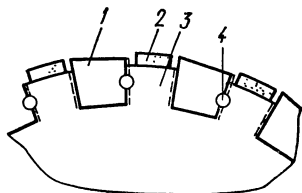
Конструкция рабочей части сегментных пил. За последние 10—15 лет появилось много оригинальных конструкций алмазного дискового инструмента.

Основные разработки по алмазным дисковым пилам осуществляются в направлении совершенствования конструкций алмазосодержащих сегментов и корпусов пил с целью повышения производительности инструмента и его износостойкости. В настоящее время различные конструктивные решения алмазных дисковых пил нашли достаточно полное отражение в различных литературных источниках и патентно-информационных материалах. В связи с этим заслуживает внимания рассмотрение наиболее характерных конструктивных идей, которые в дальнейшем могут быть использованы в процессе совершенствования и создания нового инструмента.

Представляет определенный интерес конструкция многослойного сегмента типа «Сэндвич» (рис. 5) [78]. Внешний слой 1 имеет более высокую концентрацию алмазов (50—100%), чем центральный слой 2 (12,5—25%), основанием которого служит безалмазная подложка 3. Цель такого

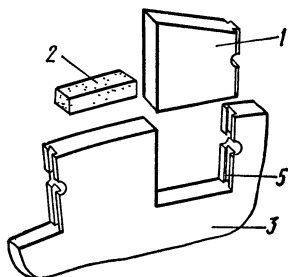


5. Многослойный алмазный сегмент пилы «Сэндвич»



6. Алмазные сегменты с «чистильщиком»:

1 — «чистильщик»; 2 — алмазосный сегмент; 3 — корпус пилы; 4 — заклепка; 5 — паз тела «ласточкин хвост»

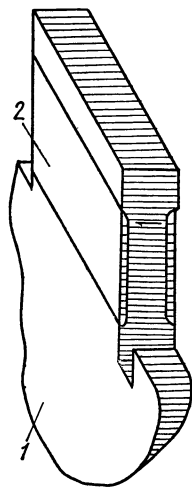


решения — уменьшить энергоемкость резания и снизить удельный расход алмазов. Следует отметить, что данная конструкция сегмента может быть выполнена иначе. без изменения ее сущности (например, увеличение износостойкости внешних слоев сегмента за счет изменения составов связок, марки и зернистости алмазов и т. д.).

Для повышения работоспособности пил разработаны конструкции сегментов с ориентированным расположением алмазных зерен в виде правильных рядов [79] или закрепленных таким образом, что в проекции поперечного сечения режущего венца они попадают на полуокружности, полуэллипсы или на стороны угла, вписанные симметрично в поперечное сечение [87].

Другой способ улучшения работы алмазных зерен [80] — использование в конструкции пилы «чистильщиков» устанавливаемых на 0,02 — 0,03 мм ниже алмазосных сегментов. Основное их назначение — выравнивание рельефа пропила и удаления шлама.

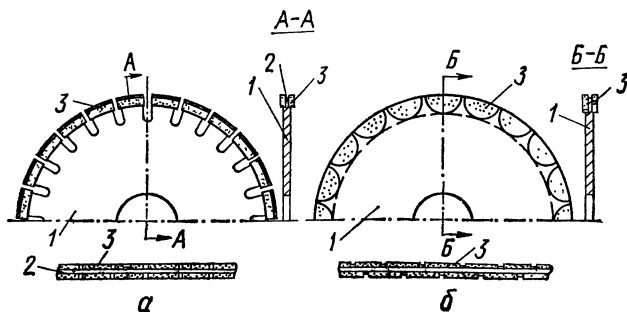
Для повышения стойкости торцевой поверхности пилы против абразивного износа в американских патентах [76, 81] предлагается конструкция пилы (рис. 7) с кольцевыми канавками под сегментами, в которые заделываются износостойкие пластинки. Пластинки после напайки шлифуются до тех пор, пока не совпадут с плоскостью полотна пилы. В одном из патентов [73] предлагается конструкция пилы с периферическим кольцом 2 (рис. 8, а) и с карманами (рис. 8, б) в центре сегмента 3. Помимо увеличения площади пайки это способствует стабилизации сегментов и препятствует вибрации корпуса 1, а также уменьшает энергоемкость процесса резания за счет скола центральных целиков. Алмазные сегменты в этих конструкциях могут располагаться не попарно, а поочередно с разным шагом.



7. Рабочая часть алмазной пилы с износостойкими защитными пластинами (2 на корпусе (1))

Во многих патентах предлагается конструкция сегментов усиленного типа [84, 88] с перекрытием межсегментных пазов и специальными боковыми выточками для удаления шлама.

В одном из американских патентов [82] предусмотрено выполнение сегментов совместно с износостойкими участками, отходящими в сторону от обеих поверхностей диска рядом с его периферией. Благодаря такому расположению



8. Алмазные дисковые пилы в увеличенной площади крепления алмазных элементов.

между сегментами и износостойкими участками происходит накопление шлама, что предотвращает его относительную транспортировку во время вращения инструмента. Такое конструктивное решение исключает возможность «подрезания» корпуса, которое могло бы привести к отрыву абразиво-содержащих сегментов.

Оригинальна конструкция пилы со скошенными алмазными резами, предполагающая исключение возможности срезания алмазных сегментов за счет равнодействующей силы, направленной к центру и прижимающей сегмент к корпусу [74].

Для уменьшения скола кромок изделия рабочая поверхность дискового инструмента с прерывистым алмазонасытым слоем выполнена [20] по спирали Архимеда.

Заслуживают внимания конструктивные решения, предлагающие способы повышения устойчивости пилы за счет водяных струй, подаваемых на корпус под определенным давлением [85]. Подача воды осуществляется через изолированные полости герметичного кожуха. Предполагаемый эффект конструкции — гашение вибрации пилы водяными струями, играющими роль «водяных фланцев».

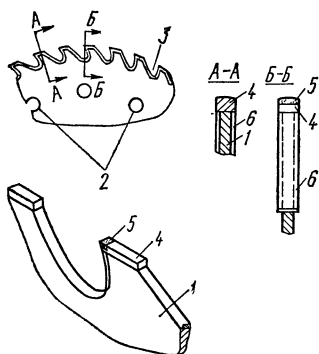
Одним из французских патентов для улучшения способа охлаждения водой предлагается конструкция полой алмазной пилы [85], состоящей из двух склепанных дисков с рядом специальных каналов на периферии пилы для подачи жидкости в зону резания.

В нашей стране разработан ряд оригинальных устройств для охлаждения дисковых пил, однако, как и многие зарубежные решения аналогичного назначения, они, к сожалению, не нашли практического применения.

Анализируя каталоги зарубежных фирм по алмазным пилам, необходимо отметить, что для резания твердых материалов конструкция инструмента предусматривает максимальное сближение алмазонасытых сегментов.

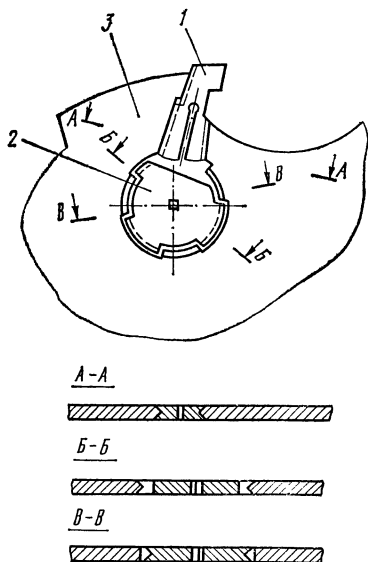
Для обработки пород природных камней средней твердости и мягких известны конструкции алмазных дисковых пил как обычного исполнения с узкими межсегментными расстояниями, так и со ступенчатым расположением сегментов. Например, в пиле «Марк II» [110] применение ступенчатой формы периферийной части снижает энергоемкость процесса распиловки и увеличивает износостойкость при резании мягких и абразивных пород. Такое конструктивное исполнение инструмента решает и проблему выноса мелко-

дисперсных продуктов разрушения, определяющего интенсивность износа алмазонасного слоя. Фирмой «Голконда» (США) [126] также использован принцип ступенчатого расположения сегментов в пиле, в которой впервые применена запрессовка медных заглушек в пазах между сегментами на больших аналогах пил (диаметры 1016, 1219, 1524 мм), что уп-



9. Пилы с уменьшенной алмазоемкостью:

1 — корпус, 2 — облегчающие отверстия, 3 — межсегментные пазы; 4 — сегменты; 5 — алмазонасные элементы; 6 — защитные стальные полоски



10. Замковое крепление рабочих элементов пилы:

1 — резец клиновидной формы с прорезью; 2 — замок с направляющими шлицами; 3 — корпус пилы

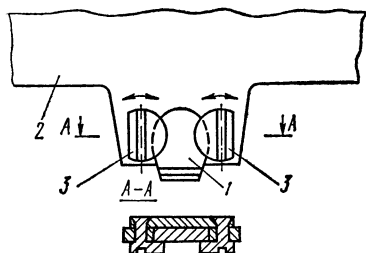
рочняет периферийную часть, уменьшает вибрации и деформации полотна при значительном снижении производственных шумов.

В некоторых решениях инструмента для резания мягких пород камня [77] в целях снижения энергоемкости предлагается рабочую поверхность алмазного слоя довести до минимума. Конструкция пилы (рис. 9) имеет облегчающие отверстия, защитные полоски и алмазные элементы с определенным передним углом резания.

Большое внимание в последнее время уделяется созданию дискового инструмента, в котором надежное закрепление рабочих элементов обеспечивается механическим способом. В этом плане представляет интерес механизм

крепления резцов клиновидной формы в виде замка (рис. 10) с направляющими шлицами, вмонтированного в гнездо корпуса с аналогичными направляющими шлицами и взаимодействующего с тыльной частью резца [19].

Для обеспечения быстрой замены режущих элементов на корпусе пилы в одной из конструкций [21] предусмотрен фиксатор (рис. 11), выполненный в виде двух поворотных головок, имеющих форму дисков со срезами, которые установлены по обе стороны от выемки полотна пилы.



11. Механическое крепление рабочих элементов пилы с фиксатором: 1 — режущий элемент; 2 — корпус пилы; 3 — поворотные головки со срезом

Заслуживает внимания предложенное в одном из французских патентов [86] устройство для крепления алмазных сегментов к корпусу пилы. Каждый сегмент состоит из двух элементов с частью в виде «ласточкиного хвоста», защемляющихся один относительно другого. Один из элементов образует держатель, а другой элемент служит опорой алмазного сегмента. Относительное перемещение двух элементов ограничено в одном направлении упором.

Заслуживает внимания предложенное в одном из французских патентов [86] устройство для крепления алмазных сегментов к корпусу пилы. Каждый сегмент состоит из двух элементов с частью в виде «ласточкиного хвоста», защемляющихся один относительно другого. Один из элементов образует держатель, а другой элемент служит опорой алмазного сегмента. Относительное перемещение двух элементов ограничено в одном направлении упором.

Конструктивные параметры инструмента. Работая в условиях высоких окружных скоростей и обусловленных ими вибраций и динамических нагрузок большой интенсивности, корпуса дисковых пил должны сохранять плоскую форму упругого равновесия и противостоять разрушающему воздействию указанных факторов до полного износа алмазонасных сегментов.

Следовательно, с точки зрения прочности инструмента важнейшими конструктивными параметрами являются толщина корпуса, форма и размеры пазов. Другие конструктивные параметры, влияющие на напряженное состояние в наиболее опасных местах алмазных пил (высота алмазонасного слоя, определяющая при прочих равных условиях срок службы пил, ширина и длина сегментов, расстояния между ними), также во многом определяют работоспособность инструмента и экономичность его применения.

Учитывая сравнительно небольшой объем исследовательских работ в области обоснования рациональных

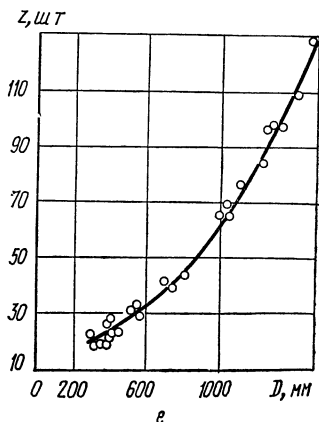
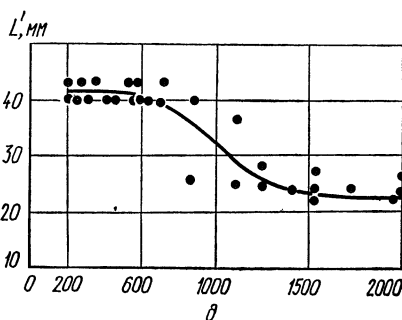
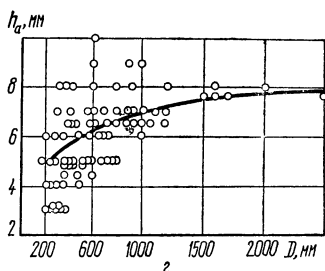
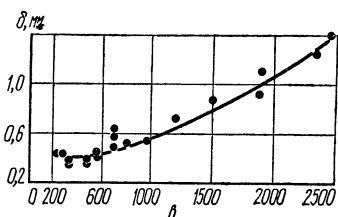
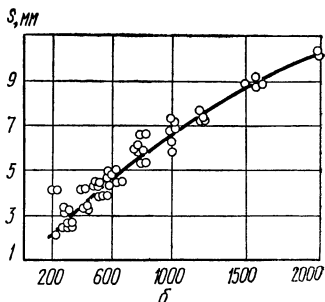
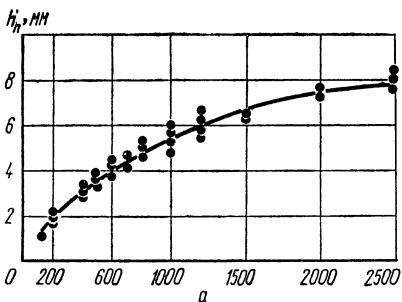
конструктивных параметров алмазных пил в нашей стране, их обобщенный анализ выполнен в основном по данным зарубежных источников информации (проспекты фирм «Диамант борт», «БТС» (Бельгия), «Дженерал даймонд» и «Нортон» (США) и других, рефераты статей из журнала «Industrial Diamant Review» — IDR), а также по данным изучения натуральных образцов инструментов [10].

Толщина корпуса пилы определяет жесткость и устойчивость работы инструмента при выполнении той или другой технологической операции, причем для определенных свойств материала корпуса она должна выбираться такой, чтобы стойкие ресурсы корпуса обеспечивали полный износ алмазонасного слоя.

Установлено, что с увеличением диаметра алмазных пил толщина корпуса увеличивается. Это объясняется тем, что при необходимости распиловки камня на большую глубину возрастает общая нагрузка на инструмент. На рис. 12, а представлена зависимость толщины корпуса пилы от ее диаметра, построенная по средним значениям изучаемого параметра.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в зарубежной практике толщина корпуса для наиболее применяемых диаметров инструмента в диапазоне 300—800 мм колеблется незначительно, а для пил большого диаметра (2000—3000 мм) она не превышает 15 мм. Характерно, что более интенсивное увеличение толщины корпуса наблюдается для инструмента диаметром до 1000 мм. В области пил большого диаметра прослеживается тенденция к стабилизации этого параметра и, кроме того, скорость его роста с увеличением диаметра уменьшается. Это можно объяснить тем, что нагрузка на инструмент находится приближенно в линейной зависимости от глубины резания, а жесткость корпусов является кубической функцией их толщины.

Ширина алмазного слоя определяет для данной толщины корпуса величину бокового нависания алмазонасной части, которое предохраняет корпус от затирания и обеспечивает нормальные условия работы пилы. Ширина сегмента определяет также алмазоемкость инструмента и в конечном итоге влияет на удельный расход алмазов. Поэтому для эффективного использования алмазных пил целесообразно стремиться к минимально возможной ширине сегмента при условии обеспечения необходимого



12. Зависимость толщины корпуса алмазной пилы h_n (а), ширины s (б) и бокового нависания δ (в) алмазных сегментов, высоты алмазного слоя сегментов h_a (з), длины L' (д) и числа z (е) алмазных сегментов от диаметра пилы

нависания к моменту полного износа алмазносного слоя по высоте.

На рис. 12, б приведены данные, характеризующие изменение ширины алмазносных сегментов для различных диаметров. Из представленной зависимости следует, что с увеличением диаметра пилы, сопровождающимся соответственным ростом толщины корпуса, ширина сегментов также увеличивается, причем в качественном отношении характер кривой аналогичен изменению толщины корпуса.

Боковое нависание сегментов определяет условия нормальной эксплуатации инструмента до полного его износа. На рис. 12, в приведены данные, позволяющие сделать следующие выводы:

определенная группа пил диаметром 300—800 мм характеризуется практически одинаковым нависанием, равным 0,4—0,5 мм;

по мере увеличения диаметра наблюдается тенденция к увеличению значений боковых нависаний, что можно объяснить ростом величины торцовых биений инструмента, определяющих более интенсивный износ боковых поверхностей алмазносных сегментов.

Высота алмазносного слоя определяет стойкость инструмента в целом. Эффективность инструмента с различной высотой алмазносного слоя зависит от долговечности корпуса пилы и возможности сохранения заданных свойств алмазносного слоя при увеличении ее высоты, т. е. ограничивается технологическим фактором. Результаты обработки значительного числа данных, приведенных на рис. 12, г, свидетельствуют о том, что с увеличением диаметра пил высота алмазносного слоя пропорционально растет, причем диапазон ее средних значений находится в пределах 5—8 мм. Видимо, верхний предел значений высоты сегментов ограничен, исходя из технологических соображений.

Длина алмазносных сегментов в зарубежной практике для всего диапазона диаметров выпускаемых пил отличается стабильностью и небольшим интервалом изменения — 40—25 мм (рис. 12, д). Следует отметить, что с увеличением диаметра инструмента проявляется тенденция к уменьшению длины сегментов. Из приведенного графика также видно, что изменение длины сегментов носит ступенчатый характер: для пил диаметром 300—600 мм среднее значение ее составляет 40 мм, а для 600 мм и более — 25—30 мм.

Несмотря на то, что большинством фирм применяется одинаковая длина сегментов, в периодической литературе отсутствуют исследования по вопросу выбора ее рационального значения. По-видимому, уменьшение длины сегментов с ростом диаметра инструмента можно объяснить стремлением увеличить межсегментные расстояния, необходимые для эвакуации больших объемов продуктов разрушения, и уменьшить поверхность износа алмазосносного слоя в результате воздействия мелкодисперсных продуктов.

Число сегментов определяет длину рабочей поверхности инструмента и в сочетании с длиной сегментов — расстояния между ними. Приведенные на рис. 12, *e* данные, полученные в результате обработки имеющегося материала без разделения пил в соответствии с их назначением, показывают, что при диаметре 300—800 мм наблюдается пропорциональный рост числа сегментов, а при дальнейшем увеличении — более интенсивный. Данная закономерность хорошо увязывается с областью применения пил: малые диаметры — преимущественно для окантовки всех разновидностей природного камня, большие — для распиловки пород средней прочности и мягких.

Глубина паза в корпусе пилы зависит исключительно от технологических соображений, как и наличие самих пазов. Как конструктивный параметр глубина паза влияет на изгибающий момент от действия сил, воспринимаемых рабочей поверхностью алмазных сегментов. Поэтому с точки зрения долговечности корпуса пилы необходимо стремиться к уменьшению глубины паза до возможного предела, который ограничивается степенью температурного воздействия в процессе пайки на деформацию корпуса.

В рассмотренных источниках данные о величине этого параметра встречаются редко. Обработка имеющихся сведений и результатов замеров натуральных образцов пил фирм «Венариа реале» (Италия) и «БТС» свидетельствует о том, что глубина паза алмазных пил находится в интервале 13—15 мм.

Необходимо отметить, что в практике обработки камня известны конструкции инструментов без пазов, что позволяет судить о возможности решения вопроса крепления сегментов без температурных воздействий с обеспечением необходимой прочности.

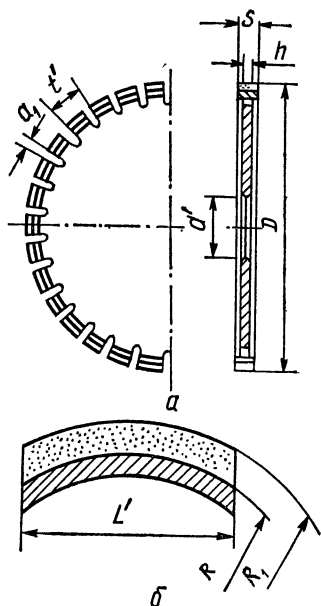
Длина паза в корпусе пилы определяется преимущественно ее назначением. В пилах (без указания их назна-

чения) существуют две группы размеров длины паза — 4—7 и 11—20 мм, причем последние характерны для пил диаметром более 600 мм. Из этого можно сделать вывод, что в пилах, предназначенных для резания пород средней прочности и мягких, длина пазов находится в диапазоне 11—20 мм, а в пилах для резания прочных разновидностей природного камня и окантовки изделий — в пределах 4—7 мм.

Типоразмеры выпускаемых серийно отечественной промышленностью сегментных кругов (рис. 13, а) с нормальными межсегментными пазами по ГОСТ 16115—70 и кругов с узкими межсегментными пазами по ГОСТ 16116—70 приведены в табл. 8, а размеры сегментов (рис. 13, б) в соответствии с ГОСТ 16115—70 и ТУ88 УССР ИСМ 445—74 — в табл. 9. Длина сегментов по ГОСТ 16116—70 постоянна и равна 38 мм.

Системы охлаждения инструмента. При резании природного камня алмазными дисковыми пилами, особенно его твердых разновидностей, важное значение имеют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) и способы подвода их к инструменту. Основное назначение СОЖ — снизить температуру в зоне контакта инструмента с породой, что способствует меньшему износу режущих зерен и повышает стойкость инструмента в целом. Кроме того, специальные составы СОЖ смачивают мелкодисперсные продукты разрушения, что снижает истирающее воздействие их на связку и запыленность воздуха.

В отечественной и зарубежной практике используются различные конструкции охлаждающих устройств. Наибольшее распространение получила система охлаждения, характеризующаяся тем, что жидкость под давлением попадает на боковые поверхности инструмента через ряд мелких



13. Основные размеры алмазных дисковых пил:
а — пила; б — сегмент.

Т а б л и ц а 8
Основные размеры алмазных дисковых пил

<i>D</i> мм	ГОСТ 16115—70, ГОСТ 16116—70		ГОСТ 16115—70			ГОСТ 16116—70		
	<i>d'</i> мм	<i>h</i> , мм	<i>l'</i> , мм	<i>a</i> ₁ , мм	Число межсегментных пазов	<i>l'</i> мм	<i>a</i> ₁ , мм	Число межсегментных пазов
250	32; 63	1,6	30,87	8	24	41,16	2,0	18
320	32	1,8	32,02	8	30	40,03	2,0	24
		2,0						
		2,2						
400	63	2,8	50,50	8	24	40,40	2,0	30
		2,0						
		2,2						
500	90	2,5	50,86	12	30	42,38	2,5	36
		2,8						
630	90	3,2	53,72	12	36	40,29	2,5	48
		3,6						
800	90	4,5	51,41	12	48	41,13	2,5	60
1000	90;	5,0	42,91	20	72	—	—	—
120								
1100	120;	5,0	43,63	20	78	—	—	—
	180							
1250	120	5,5	43,05	20	90	—	—	—
		6,0						
1400	120	6,0	48,28	24	90	—	—	—
		6,5						
1600	180;	7,0	48,76	24	102	—	—	—
	200							
2000	180;	8,0	49,34	24	126	—	—	—
	200							

Примечание. Пилы *D* = 250—800 мм выпускаются согласно ГОСТ 16115—70 и ГОСТ 16116—70, а пилы *D* = 1000—2000 мм — по ГОСТ 16115—70.

Т а б л и ц а 9
Размеры алмазных сегментов

<i>D</i> , мм	<i>R</i> , мм	<i>R</i> ₁ , мм	<i>L'</i> , мм	<i>s</i> , мм
250	125	118	24	2,6
320	160	153	24	3,0; 3,8
400	200	193	40	3,2

Продолжение табл. 9

D , мм	R , мм	R_1 , мм	L' , мм	s , мм
500	250	243	40	3,8
630	315	308	40	4,2
800	400	393	40	5,5
1000	500	492	24	6,5
1100	550	542	24	6,5
1250	625	617	24	7,0
1400	700	692	24	7,5
1600	800	792	24	9,0
2000	1000	990	24	12,0

отверстий. Конструктивно она состоит из двух трубок с перфорированными в продольном направлении отверстиями диаметром 1,5—2,0 мм, которые закрепляются вдоль горизонтальной оси инструмента. Эта система позволяет охлаждать алмазные дисковые пилы, диаметр которых не превышает 500—600 мм; при увеличении их диаметра значительно ухудшаются условия охлаждения рабочей поверхности алмазосносного слоя, особенно в момент резания. Указанное расположение подводящих трубок приводит также к тому, что значительная часть жидкости за счет центробежных сил отбрасывается вниз, не попадая в зону резания.

Известны системы охлаждения, характеризующиеся подачей СОЖ на торцовую рабочую поверхность алмазосносного слоя. Конструктивно они выполняются из одной трубки, расположенной на уровне горизонтальной оси инструмента. Данное устройство привлекает простотой изготовления, однако имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является то, что струя охлаждающей жидкости на своем пути встречает большое сопротивление воздушного потока, создаваемого вращающимся диском. В результате этого значительная часть водяного потока отбрасывается вниз по касательной, не попадая в зону резания.

Встречаются устройства, характеризующиеся подачей охлаждающей жидкости под давлением на торцовые поверхности инструмента, но не в виде распределенной струи, а в заданную точку. Такие устройства, как правило, не применяются в качестве самостоятельных, а используются

как дополнительный источник охлаждающей жидкости, что важно при работе пил большого диаметра со значительной глубиной пропила. Кроме того, в таких системах место подачи охлаждающей жидкости строго фиксировано и варьирование глубины резания приводит к изменению условий охлаждения инструмента.

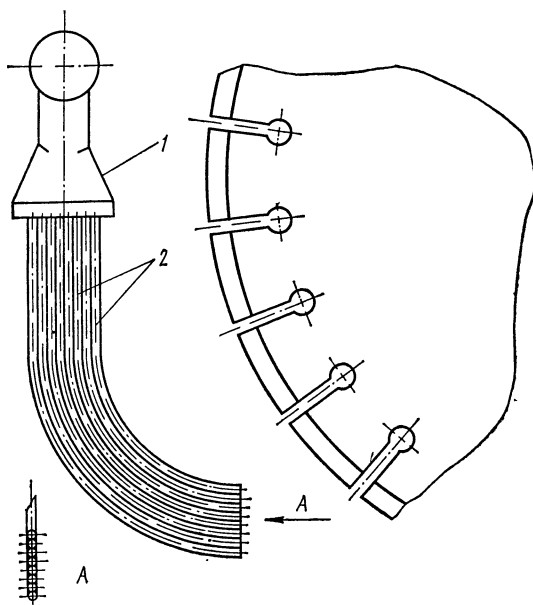
Имеются конструктивные решения, у которых подающие трубки расположены в центре диска. Они могут быть выполнены в виде кольцевой трубки, размещенной в центре диска, причем ее диаметр превышает размер диаметра фланцев. Эта система подачи СОЖ на диск не нашла применения из-за нерационального расхода воды, так как только до $\frac{1}{3}$ ее количества участвует в процессе резания, а остальная часть отбрасывается центробежной силой за пределы инструмента. Учитывая недостатки рассмотренной конструкции, фирма «Голконда» рекомендует для подачи СОЖ использовать трубку, изогнутую в виде полукольца и расположенную в центре пилы. Охлаждающая жидкость, попадая в центральную часть диска, центробежной силой отбрасывается по сложной траектории к периферии инструмента и затягивается в зону резания.

Заслуживает внимания конструкция устройства [24], в котором СОЖ подается через систему мелких отверстий диаметром 1,0—1,5 мм, просверленных в изогнутых по форме периферии пилы трубках. Улучшение условий попадания СОЖ в зону резания достигается, в соответствии с идеей данного решения, использованием узкого кожуха, размеры которого выбираются так, чтобы при вращении инструмента не происходило разрыва потока жидкости. Дисковые пилы в этом случае выполняют также роль турбоколеса. Помимо того что предполагаемая конструкция отличается определенной сложностью в изготовлении, в процессе эксплуатации не исключается возможность попадания в зону резания части жидкости со взвешенными абразивными частицами продуктов разрушения.

Для многодисковой схемы распиловки природного камня в ИСМ АН УССР разработано устройство для подачи охлаждающей жидкости непосредственно в пропила (рис. 14) [25]. Устройство состоит из патрубка 1, выполненного из отдельных трубок 2, наружный диаметр которых меньше ширины пропила. Устройство крепится к кожуху и устанавливается таким образом, что струя воды, разби-

тая на отдельные струйки для предотвращения закручивания, направляется в зону резания по касательной к наружной поверхности алмазной пилы.

Исследование долговечности корпусов алмазных дисковых пил. При разработке надежного и эффективного ал-

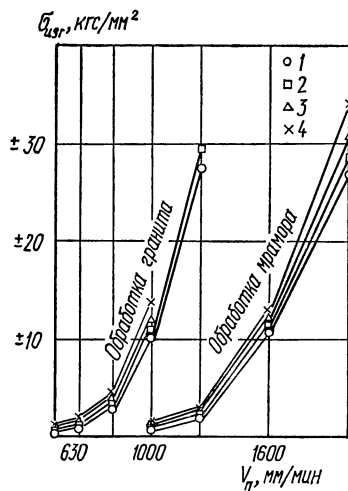


14. Конструкция охлаждающего устройства для подачи жидкости в пропил:

1 — переходной штуцер; 2 — система водоподающих трубок.

мазного инструмента большое значение имеют его жесткость и прочность. Проведенные в ИСМ АН УССР в 1970—1972 гг. методом тензометрирования исследования рабочего напряженного состояния алмазных пил показали, что вследствие недостаточной их жесткости в процессе работы наблюдается значительный изгиб инструмента в осевом направлении [2, 41]. Средняя величина создаваемых при этом на периферии циклических знакопеременных напряжений составляет $\pm 10\text{--}15$ кгс/мм², а максимальная (на грани потери устойчивости) — до ± 35 кгс/мм², что при обильном подводе охлаждающей жидкости (коррозионной среды) нередко приводит к преждевременному разрушению

инструмента. Качественные и количественные закономерности деформирования пил практически одинаковы при обработке различных материалов (рис. 15), что свидетельствует о преимущественном влиянии на этот процесс динамической жесткости инструмента и его конструкции. Исследование основных закономерностей изменения напряжений изгиба при варьировании конструктивных параметров периферии пил позволило установить, что существенного уменьшения их напряженности (до двух раз) можно достичь только использованием специальных конструкций, например закреплением вставок из пластичного металла в расширенные основания пазов. Такой же эффект, хотя и менее ощутимый, достигается уменьшением глубины пазов, однако при этом возникают трудности с напайкой сегментов.



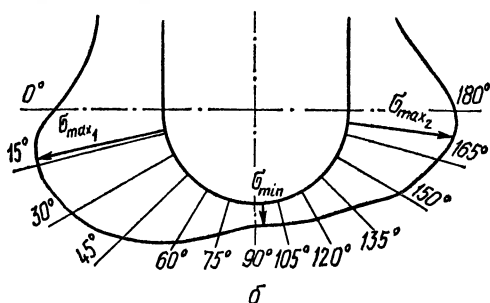
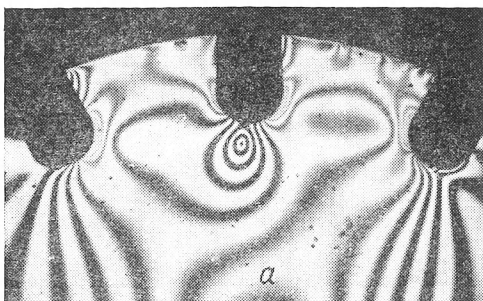
15. Зависимость напряжений изгиба $\sigma_{изг}$ у основания пазов алмазной дисковой пилы диаметром 400 мм от скорости подачи V_p при различных значениях глубины резания:

1 — 20 мм; 2 — 30 мм; 3 — 40 мм; 4 — 50 мм

Кроме рассмотренных знакопеременных напряжений поперечного изгиба в работающей пиле создаются упруго-напряжения сжатия. Изучение их распределения на контуре межсегментных пазов различной формы, являющихся концентраторами напряжений и источниками образования трещин, проводилось методом оптического моделирования. Нагружение оптически-активных моделей производилось с помощью специального приспособления, позволяющего создать квазистатическую нагрузку, пропорциональную выбранной реальной.

Установлено, что на контуре оснований всех принятых к изучению форм пазов под действием плоской системы сил резания создаются только напряжения сжатия. При этом они распределяются весьма неравномерно, образуя в опасной зоне основания минимум (рис. 16). Наименьшая величина этих напряжений реализуется у пазов с прямоуголь-

ной формой основания ($0,3 \text{ кгс/мм}^2$), наибольшая — у радиально ориентированных пазов минимальной глубины с полукруглым основанием. Величины напряжений в точках максимумов у всех исследованных пазов не превышают 7 кгс/мм^2 .



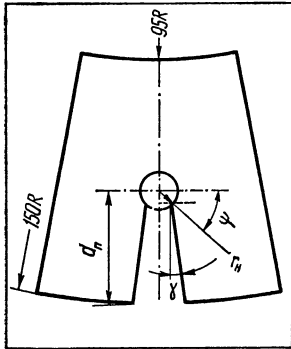
16. Напряженное состояние корпусов пил в зоне межсегментных пазов:

a — картина полос интерференции; *b* — распределение напряжений на контуре паза

Следовательно, инструмент с радиально ориентированными пазами с полукруглым основанием имеет наибольшую компенсацию разрушающих циклических напряжений растяжения при изгибе. Еще более действенный способ повышения прочности пил — непосредственное уменьшение напряжений изгиба в опасной зоне, которое, как указывалось ранее, достигается закреплением специальных пластичных вставок в расширенные основания пазов, что подтверждается практикой эксплуатации соответствующих пил. Однако этот конструктивный вариант сопряжен

с усложнением технологии изготовления. Поэтому вопрос о целесообразности его применения следует решать исходя из конкретных условий эксплуатации.

Заслуживают внимания результаты исследований процесса возникновения усталостных трещин у основания пазов алмазных дисковых пил с целью разработки улучшенной формы паза, позволяющей уменьшить пики напряжений в опасной зоне [125].



17. Основные параметры паза.

Исследования выполнены с помощью современного метода конечного элементного деления напряженного состояния для установления их характера в определенных пределах. Характерные особенности метода:

возможность получения достаточно точных данных о напряжениях в критических областях без исследования всего корпуса;

возможность выбора различных масштабов расчленения изучаемой зоны, не выходя за

пределы емкости запоминающего устройства вычислительных машин;

по принципу Сен-Венана форма паза заключительной стадии деления может меняться, и нет необходимости следить за всем процессом для получения требуемых данных.

При исследовании различных форм пазов в качестве критерия принято усталостное разрушение (образование трещин), основанное на октаэдрических переменных касательных напряжений. Решающую роль играют амплитуды переменных основных напряжений, получаемых по методу конечного элементного деления.

Первый этап вычислений для определения узловых деформаций и напряжений состоит в грубом расчленении всей пилы на отдельные участки без выделения зон высокой концентрации напряжений. Далее определенная часть — подучастки — рассматриваются отдельно с учетом установленных деформаций на границах стыков.

Последний этап — определение рациональной формы паза по следующим параметрам (рис. 17): r_n — радиус основания паза; d_n — его глубина; γ — угол наклона

стенок; ψ — угол, определяющий точку пересечения боковых сторон паза с полуокружностью данной части.

Определение критерия усталостного разрушения основано на предположении, что допустимое число изменений касательных напряжений является линейной функцией суммы ортогональных статических нормальных напряжений:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} [(P_1 - P_2)^2 + (P_2 - P_3)^2 + (P_1 - P_3)^2]^{\frac{1}{2}} = \\ = j - a_d (S_1 + S_2 + S_3 + R'_1 + R'_2 + R'_3), \end{aligned}$$

где P_1, P_2, P_3 — амплитуды переменных основных напряжений; S_1, S_2, S_3 — амплитуды ортогональных статических нормальных напряжений (при этом оси остаточных или собственных напряжений R'_1 и т. д. не должны проходить в том же направлении, что и оси остаточных нормальных напряжений); j — постоянная материала, которая обратно пропорциональна величине усталостной прочности; a_d — изменение допустимой области статических напряжений (j и a_d выбираются в соответствии с требуемой стойкостью пилы).

В качестве масштаба эффективности изменения переменных параметров паза по критерию усталостной прочности приняты соответствующие значения для основной формы пазы — с прямоугольными стенками и полукруглым основанием.

Результаты аналитических исследований показали, что с увеличением r_n происходит более четко выраженное повышение усталостной прочности, в то время как при увеличении γ более чем на 5° оно уже практически не наблюдается. Тот же эффект может быть достигнут и при увеличении ψ в отрицательном направлении: $\psi > -48^\circ$. Можно также повысить усталостную прочность, выбрав γ отрицательным. Следует отметить, что увеличение γ и r_n приводит к расширению паза (уменьшению общей длины алмазосносного слоя), накладывая определенные ограничения на возможные границы изменения этих параметров. Исходя из полученных результатов, делается вывод о целесообразности принятия комбинированных форм пазов: с $r_n = 3,2$ мм и $\gamma = -7,5^\circ$ по одной его стороне; с положительным и отрицательным $\gamma = 7,5^\circ$ соответственно для каждой его стороны.

Установлено также, что критическим местом у основания паза, в котором наиболее вероятно появление усталостных трещин, является не корень паза, а точка, расположенная под углом 30° к горизонтали. На основании анализа уравнения следует и вывод о том, что собственные напряжения сжатия оказывают положительное влияние на стойкость корпусов. В связи с этим такой же эффект можно получить при дробеструйной обработке опасной зоны; распространению образовавшихся трещин можно препятствовать сверлением отверстий у их основания.

Необходимо отметить, что, несмотря на фундаментальность теоретических исследований по повышению усталостной прочности корпусов алмазных пил и перспективности полученных выводов, до последнего времени они не оказывали существенного влияния на принципы конструирования инструмента. Единственным действенным методом, нашедшим применение в практике, оказалось использование в конструкциях пил скруглений и полирование сильно нагруженных мест с целью нейтрализации концентраторов напряжений. Тем не менее всесторонняя практическая проверка теоретических разработок по усталостному разрушению корпусов [115] в принципе подтвердила правильность их результатов и необходимость дальнейшего развития этих работ.

Экспериментальное изучение влияния формы паза пилы на усталостную прочность корпуса позволило установить ряд важных положений:

усталостная прочность в значительной мере зависит от величины радиуса основания паза; основание паза с большим r_n характеризуется более высокой стойкостью к образованию усталостных трещин, чем паз с малым r_n ;

паз с полукруглым основанием и параллельными стенками, которые под углом 7° наклонены к радиусу, способствует повышению усталостной прочности корпуса пилы;

комбинированные формы паза с полукруглым основанием и наклонными стенками являются весьма перспективными;

форма паза практически не влияет на износостойкость инструмента.

Методически опытные работы базировались на последовательном повышении уровня производительности (Π); фиксация состояния объектов изучения осуществлялась при $\Pi = 500 \text{ см}^2/\text{мин}$ — через каждые 2 м^2 ; после 8 м^2 $\Pi = 625 \text{ см}^2/\text{мин}$, и при увеличении объема резания

еще на $8 \text{ м}^2 \text{ П} = 750 \text{ м}^2$. После этого объем резания увеличивался до 16 м^2 .

В решении задачи повышения прочностных ресурсов алмазных дисковых пил важную роль играют также технология их изготовления и материала корпуса. Анализ результатов исследований материалов корпусов инструмента зарубежных фирм, добившихся заметных успехов в этом направлении, и предполагаемой технологии его изготовления позволяет сделать два основных вывода:

материал корпусов имеет однородную мелкодисперсную структуру, что достигается микродобавками молибдена и алюминия и обеспечивает высокие прочностные характеристики;

пазы алмазных пил независимо от технологии их изготовления имеют низкую шероховатость поверхности, $R_a = 2,5 \div 0,63$, что позволяет их корпусам, длительное время не разрушаясь, подвергаться воздействию значительных пульсирующих динамических нагрузок.

В соответствии с действующим в стране ГОСТ 16117—70 материалом корпусов алмазных дисковых пил является инструментальная хромованадиевая сталь 9ХФ. Такой выбор был обусловлен не специальными исследованиями, а тем фактом, что производство дисков из этой стали для изготовления дереворежущих пил было налажено на Горьковском металлургическом заводе — единственном в стране предприятии, выпускающем изделия такого рода.

Внешняя схожесть инструментов и качественная идентичность воздействующих на них нагрузок позволили предположить, что применение стали 9ХФ в новом качестве даст положительный результат. Однако практика эксплуатации алмазных пил с корпусами из этой стали свидетельствует о том, что они не всегда обеспечивают полное использование потенциальных возможностей алмазосносного слоя сегментов. В связи с этим в течение 1971—1972 гг. ИСМ АН УССР совместно с УкрНИИСпецсталь (Запорожье) выполнены комплексные исследования по изучению физико-механических свойств материала корпусов и совершенствованию технологии их изготовления [42].

Всестороннее изучение стали 9ХФ позволило прийти к заключению:

сталь 9ХФ обладает неудовлетворительными прочностными свойствами вследствие характерной неоднородности

структуры, образующейся из-за неравномерного выделения карбидов при отпуске после закалки;

возможные изменения режимов термической обработки не устраняют неоднородность структуры и не улучшают свойства стали 9ХФ;

повышению характеристик вязкости стали 9ХФ способствует термообработка после механической обработки изделий. Исходя из этого, можно ожидать, что для повышения прочностных свойств корпусов пил следовало бы ввести термообработку после изготовления компенсационных пазов, однако такая технология сопряжена со значительными трудностями в условиях массового производства.

Полученные результаты обусловили необходимость создания новых марок стали с более высокими, по сравнению со сталью 9ХФ, прочностью, пластичностью и вязкостью. Как показали исследования, такими свойствами обладают углеродистые стали с содержанием углерода 0,7—0,9% и молибдена 0,15—0,25%, а наиболее приемлемой с точки зрения освоения промышленностью является сталь 9ХФМ, не требующая перестройки технологического процесса. Применительно к созданной стали разработан оптимальный режим термообработки, заключающийся в закалке с температуры 850°С (выдержка 30 мин) в масле и отпуске при температуре 580°С (выдержка 120 мин) с охлаждением в ступе на воздухе.

Успешное решение задачи улучшения технологии изготовления межсегментных пазов было основано на использовании твердосплавных укороченных сверл двух типов: составные сверла с винтовыми твердосплавными головками (ТУ 355—69, ИСМ); стандартные, оснащенные твердосплавными пластинками (ГОСТ 6647—64).

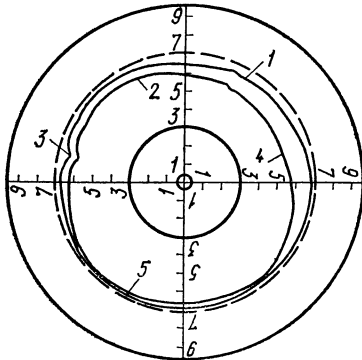
На выбранных рациональных режимах сверления (скорость резания 30 м/мин, скорость подачи 0,06 мм/об) достигается стабильная шереховатость поверхности обработки, $R_a = 1,2 \div 0,63$. Такая же чистота при использовании инструмента из быстрорежущих сталей может быть обеспечена только после дополнительных операций зенкования и развертывания. В процессе экспериментов было установлено, что твердосплавные сверла обладают значительно большей производительностью (в 6—7 раз) и стойкостью (до 10 раз) по сравнению с обычными сверлами из быстрорежущей стали.

Производственные испытания пил, созданных в соответствии с результатами проведенных исследований, показали, что понижение шероховатости поверхности оснований пазов — зоны разрушения — на два класса увеличивает долговечность корпусов в 1,5 раза, а при использовании для их изготовления нового материала долговечность увеличивается приблизительно в 2,5 раз. Это обеспечивает таким корпусам гарантированный запас прочности в работе при оснащении их сегментами с высотой алмазносного слоя 5 мм, а также открывает перспективы многократного использования их в инструментах большого диаметра или в оснащении сегментами с увеличенной высотой алмазносного слоя — 8—10 мм. Реализация полученных выводов в практике алмазной обработки позволит получить значительный экономический эффект.

При рассмотрении проблемы устойчивости и динамической жесткости алмазных дисковых пил важную роль играют собственные (внутренние) напряжения корпуса. В этом смысле необходимо учитывать не только полученные после пайки или спекания (для отрезных кругов со сплошной режущей кромкой) напряжения в пильном полотне, но и его рабочее состояние. Известно, что в процессе резания без охлаждения разность температур между наружной и внутренней частями корпуса достигает 60—80° С, а с охлаждением она, безусловно, меньше. Действие на инструмент сил резания, как и тепловые напряжения, приводит к опасным напряжениям сжатия на периферии полотна. В то же время напряжения материала корпуса вследствие центробежных сил приводят к определенной стабилизации сил, так как при этом возникают лишь напряжения растяжения. В рабочем процессе имеет значение и число оборотов вращения пилы, которое обуславливает частоту контакта с обрабатываемым материалом. В неблагоприятном случае эта частота может попасть в резонанс с собственными колебаниями пильного полотна. Вызванные колебания пилы значительной амплитуды, которые могут наступить в процессе резания, всегда являются следствием такого резонанса. Приведенные факторы, характеризующие поведение инструмента в процессе его работы, свидетельствуют о сложности рассматриваемого вопроса и важности его положительного решения.

В настоящее время для придания инструменту необходимой жесткости кольцеобразную зону пильного полотна

с радиусом, равным $0,7R$ пилы, подвергают предварительному натяжению (проковке) вальцовкой или обработкой молотком. В ФРГ создана специальная машина для проверки рихтовки и натяжения [113]. Процесс проверки осуществляется в два приема: с помощью прижимного ролика на специальную диаграмму состояния



18. Диаграмма напряженного состояния пильного полотна:

1 — торцовое биение (0,2 мм); 2 — линия напряжений RZ ; 3 — погрешности рихтовки (торцовое биение 0,3 мм); 4 — погрешность вальцовки (полотно «свободное»); 5 — погрешность вальцовки (полотно «жесткое»).

или «свободное»; если RZ совпадает с нулевой линией, тогда полотно нейтрально по отношению к напряжению, т. е. «жесткое». Для гарантии и при получении «жесткого» полотна рекомендуется повторная обработка его на прокатной машине.

Шумообразование. Проблема рабочих шумов неразрывно связана со здоровьем человека и производительностью, в связи с чем в последнее время ее решению придается все большее значение. Постановка и выполнение исследований [124, 129] в этом направлении позволили получить ряд интересных зависимостей и разработать практические рекомендации по борьбе с шумом.

Шум — это звуковые механические колебания в твердых телах, жидкостях и газах, важнейшими параметрами которых являются частота и амплитуда. Слух человека менее чувствителен к высоким и низким частотам, чем, например, к частотам в диапазоне 1—4 кГц. Минимальное звуковое давление, воспринимаемое человеческим

ролика на специальную диаграмму состояния (рис. 18) наносится торцовое биение полотна без изгиба; затем оно подвергается изгибу с соответствующей записью напряжений. Машина построена таким образом, что при абсолютно ровном полотне (торцовое биение равно нулю) линия напряжений совпадает с нулевой линией на диаграмме. После подрихтовки и проверки состояния полученные записи расшифровываются: если линия напряжений (RZ) находится внутри нулевой, то это означает, что полотно «внутри длинное»

ухом, составляет $2 \cdot 10^{-5}$ Па, а максимальное — 100 Па, т. е. возможный диапазон равен примерно 5 млн. Па. Звуковое давление принято выражать в условных единицах — децибеллах: $S = 10 \lg \left(\frac{P_3}{P_0} \right)^2$, где P_0 — относительное звуковое давление (обычно $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па).

В настоящее время пределы, определяющие вредность шумов для человеческого организма, строго не ограничены, однако известно максимально допустимое время воздействия шумов на органы слуха — функция оценочного уровня звука:

Оценочный уровень звука, дБ	90	93	96	110
Предельное время воздействия, ч	8	4	2	0,1

Установлены также ограничения и по абсолютной величине звукового давления. В соответствии с действующими требованиями правил техники безопасности в большинстве стран, в том числе и нашей, уровень допустимых значений шума находится примерно в диапазоне 85—95 дБ.

К элементам, участвующим в возникновении шума в процессе работы алмазных дисковых пил, относятся источник возбуждения — инструмент и приводы; передающий и отражающий объекты — инструмент, станина станка и обрабатываемое изделие.

Для подавления шума разработан ряд практических мер, которые сводятся к осуществлению следующих мероприятий:

уменьшить число звуков, создаваемых работающим станком, частичной капсулировкой зоны резания стальным кожухом, изготовленным из листовой стали толщиной 5 мм;

снизить уровень звука установкой между креплением для кожуха и рамой станка неопреновой прокладки толщиной 10 мм;

уменьшить уровень звука (до 1,2 раз) заменой стального кожуха пластмассовым, упрочненным стекловолокном и покрытым внутри слоем паралона толщиной 50 мм;

обеспечить максимальный эффект в уменьшении уровня звука (до 2,7 раз) сочетанием нового кожуха и неопреновых прокладок между пилой и фланцами.

Исследования показали, что увеличение диаметра фланцев вызывает уменьшение уровня звукового давления. Такие же тенденции наблюдаются и при уменьшении

межсегментных расстояний в пилах, причем более ощутимый эффект достигается при использовании инструментов со сплошным алмазонасыщенным слоем. Как было установлено в лабораторных и производственных условиях [30], замена дисковой сегментной пилы диаметром 400 мм отрезным кругом такого же диаметра уменьшает звуковое давление с 95 до 85 дБ.

3. Распиловочное оборудование

В настоящее время наиболее широко используемая группа машин, оснащенных алмазным инструментом, — станки с дисковыми пилами, которые применяются в стационарных условиях на операциях распиловки (и пассивки) блоков природного камня, окантовки изделий, изготовлении тонких облицовочных плиток при доработке изделий на стройплощадке, а также при добыче облицовочного и стенового камня.

К основным преимуществам данного типа машин следует отнести высокую производительность, конструктивную простоту и малую металлоемкость, обеспечивающую невысокую их стоимость. Общим недостатком станков с дисковыми пилами является низкий коэффициент использования инструмента (до 0,35).

По технологическому признаку камнерезные машины с дисковым исполнительным органом стационарного типа подразделяются на фрезерно-окантовочные и распиловочные одно- и многодисковые.

По конструктивному исполнению камнерезные станки могут быть разделены на три основные группы: порталные, мостовые и консольные.

Существует еще целый ряд конструктивных особенностей станков: число шпиндельных головок, вид подачи стола, поворотность головок и т. д.

Основные технические характеристики станков с алмазными дисковыми исполнительными органами отечественного и зарубежного производства на данный момент достаточно широко освещены в литературных источниках [4, 31, 40, 69, 90, 103]. В связи с этим представляет интерес обобщенный анализ этой группы машин с учетом последних достижений и тенденций современного развития в этой области; применительно к основной направленности

данной работы за предпочтительный принят технологический признак в представлении имеющихся материалов.

Распиловочные станки с дисковыми пилами оснащаются инструментом диаметром 800—3000 мм. Как правило станки с пилами диаметром 800—1600 мм имеют дополнительный привод с пилой диаметром 400—750 мм для подрезки плит, которая расположена в горизонтальной плоскости. Станки этой группы различаются компоновкой основных узлов. Например, в станках модели GP-800 фирмы «Морденти» и модели «Ортобретон» фирмы «Бретон» (Италия) привод пилы установлен на траверсе, перемещающейся по двум вертикальным колоннам, причем плоскость пил перпендикулярна продольной оси траверсы. Поперечная подача инструмента осуществляется перемещением каретки по траверсе.

В станке модели SD-120/40 фирмы «Альпе» (Италия) плоскость пилы диаметром 1200 мм (мощность привода 60 л. с.) параллельна продольной оси траверсы, перемещающейся по двум вертикальным цилиндрическим колоннам. Продольная подача осуществляется движением инструментов вдоль траверсы, поперечная — движением стола.

В станке модели BULL-4 фирмы «Грегори» (Италия) траверса заменена мостом, вдоль которого перемещается каретка с инструментами; их поперечная подача производится мостом, а вертикальная — столом. На станке устанавливаются пять вертикальных пил диаметром 1200 мм и одна горизонтальная диаметром 350 мм при мощности привода 175 л. с.

Интересна компоновка станков модели VR-600 фирмы «БРА» (Италия). По четырем вертикальным колоннам перемещаются две поперечные траверсы, на которые опирается продольный мост. Продольная подача инструментов осуществляется подачей каретки моста, поперечная — мостом, а вертикальная — перемещением траверс. На станки устанавливаются до четырех пил диаметром 1300 мм при мощности привода 180 л. с. Подобные модели выпускаются и другими фирмами.

Широко распространенная алмазная дисковая распиловка камня с одновременной подрезкой изделий горизонтально расположенной пилой небольшого диаметра в последние годы находит применение и у нас в стране. Применительно к данной технологии отечественной промышленностью

Основные характеристики алмазно-дисковых

Марка	Вид	Назначение	Наибольшие размеры обрабатываемых изделий, мм			Диаметр ных пил.	
			Длина	Ширина	Высота	вертикальных	
СМР-017	Двухъярусный многодисковый, распиловочный	Распиловка блоков на плиты-заготовки	2000	1300	850 (1000)	1400 (1600)	
СМР-016	Многодисковый, одноярусный	Распиловка плит-заготовок на бруски	1000	2000	400	1250	
СМР-004	То же	Распиловка брусков на плитки	1200	1000	400	1250	
СМР-014	Фрезерно-окантовочный мостовой	Разрезка окантовка, фигурная обработка объемных изделий	2800	1500	1000	1250 и 800	
СМР-015	То же	Разрезка, окантовка, фасонная обработка боковых граней	2800	1800		800	
СМР-012	Окантовочный, консольный	Разрезка и окантовка плит	750	750	50	250	

освоен выпуск ряда моделей фрезерно-окантовочных станков (СМР-015, СМР-014), созданных Гипростроммашем, у которых для этого предусмотрены специальные варианты конструктивного исполнения. Так, в одном из вариантов исполнения камнерезного универсального станка СМР-015 мостового типа каретка оснащается двумя головками: основной — с вертикально расположенной алмазной пилой диаметром 800 мм для распиловки и окантовки плит, и поворотной — с горизонтально расположен-

станков отечественного производства

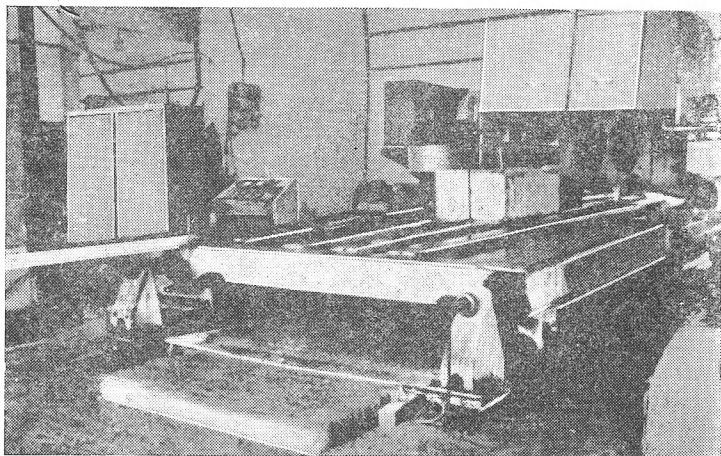
алмаз- мм	Число пил, шт	Мощность привода вращения пил, кВт	Скорость ра- бочей подачи, м/мин	Окружная скорость ре- зания для пил, м/с		Расход воды для охлажде- ния, л/мин
				вертикальных	горизон- тальных	
—	8	2·110	0,1—1,5	31 (35)	—	280
—	4	55	0,1—3,0	38	—	100
—	4	200	0,1—1,5	38	—	400
630	2	2·30	0,1—3,0	34,42 и 22,27	21	60
500	2	22	0,3—4,0	33,40	20,25	20—25
—	1	4	Ручная по- дача	27,37	—	8—10

ной пилой диаметром 500 мм (для фигурных и косых резов).

В конструкции станка СМР-014 портального типа кроме распиловки и окантовки плит возможно осуществление операций по распиловке брусков и плит шириной до 400 мм одновременно двумя алмазными пилами — диаметром 1250 мм, установленной вертикально, и горизонтальной диаметром 630 мм. Основные технические данные и характеристика указанных станков, а также дру-

гих моделей, созданных Гипростроммашем, приведены в табл. 10.

Как отмечалось ранее, некоторыми фирмами для повышения коэффициента использования инструмента создаются «двухэтажные» станки с алмазными дисковыми пилами, расположенными друг над другом в вертикальной плос-



19. Двухъярусный многодисковый распиловочный станок СМР-017.

кости. Конструкция станков, как правило, обеспечивает распиловку блоков высотой до 1 м. Непрерывность линии резания и совпадение верхнего и нижнего пропилов гарантируются при этом некоторым смещением центров установки пил в горизонтальной плоскости.

У нас в стране аналогичная схема реализована в двухъярусном многодисковом распиловочном станке СМР-017 (рис. 19), который оснащен двумя группами алмазных пил диаметром 1400 (1600) мм из четырех единиц в каждой и расположенных на различных уровнях.

В последнее время все большее применение получают распиловочные станки с пилами диаметром 2000—3000 мм. Их компоновка, как правило, не отличается от ранее рассмотренных станков. В то же время практика эксплуатации этих станков позволила сформулировать ряд специфических требований, которые необходимо учитывать в процессе создания нового, более эффективного оборудования.

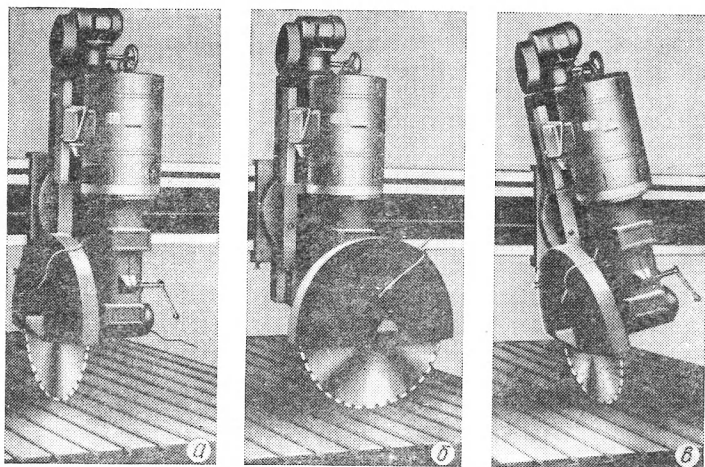
Во избежание возможных вибраций желательно, в отличие от традиционной компоновки, чтобы дисковые пилы большого диаметра неподвижно закреплялись на станке. Линейные движения (подача) должны осуществляться изделием, чтобы произвольные смещения, вызванные износом направляющих, не оказывали влияния на пилу. Также следует учитывать, что движения, осуществляемые пилой перпендикулярно своей плоскости, приводят к нежелательной вибрации корпуса.

В качестве приводных элементов для возвратно-поступательного перемещения пилы применяются электромеханические приводные механизмы (например, шестерни с зубчатой рейкой). Гидравлические системы более подвижны, но их монтаж и обслуживание стоят дороже, а при малых подачах не гарантируется их равномерность.

Ни один из параметров процесса распиловки не имеет столь большого влияния на ее экономичность, как окружная скорость. Поэтому в случае отсутствия автоматического регулирования окружной скорости резания рекомендуется предусматривать ее изменение в диапазоне от 20 до 40 м/с простой заменой шкивов или шестерен.

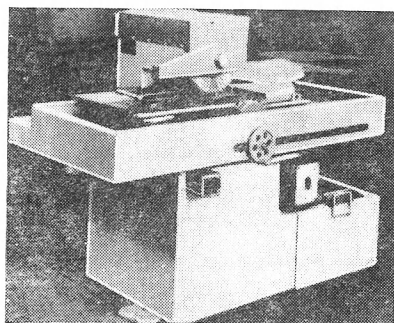
Распиловку твердых пород камня осуществляют ступенчато с изменением производительности резания от 120 до 600 см²/мин. При работе пилами большого диаметра увеличивается вспомогательное время вследствие продолжительных перебегов пилы. Основное время для распиловки, как правило, равно вспомогательному времени, необходимому на перемещение пилы для следующего реза. При усовершенствовании станка вспомогательное время может быть снижено за счет автоматизации управления станком. Оно должно быть рассчитано так, чтобы опускание полотна осуществлялось еще до окончания реза при уменьшении дуги контакта. К тому моменту, когда центр пилы проходит конец блока, ее опускание может быть закончено. Это означает, что реверсирование стола происходит без промежуточной остановки. С помощью этих мер вспомогательное время можно сократить вдвое. Особые преимущества создает автоматика с предварительной регулировкой таких важных параметров, как скорость движения стола, величина опускания, толщина плиток и др.

Широкая гамма окантовочных станков представлена традиционными станками мостового типа с инструментом диаметром 400—600 мм (мощность привода до 20 л. с.);



20. Станки фирмы «Дж. К. Смит и сыновья» с поворотной режущей головкой.

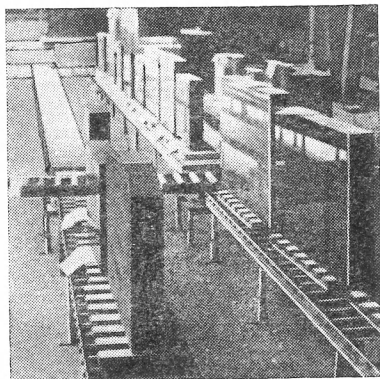
малогабаритными универсальными станками с ручным или механическим перемещением стола; станками для поперечной разрезки длинных плит и резки небольших блоков, а также многошпиндельными станками для разрезки крупногабаритных плит. Некоторые модели окантовочных станков мостового типа снабжены каретками, которые поворачиваются относительно продольной оси для резки под любым углом к плоскости стола



21. Окантовочный станок консольного типа СМР-012А.

В линиях для поточной обработки камня применяются двухшпиндельные окантовочные станки, устанавливаемые на определенный размер изделия. Существуют модели станков, например фирмы «Дж. К. Смит и сыновья» (Англия), применяемые для специализированных операций: продольных пропилов — типа НР-1 — (рис. 20, а), поперечных пропилов — типа НР-2 (рис. 20, б), резания под углом — типа НР-3 (рис. 20, в).

В строительной индустрии нашей страны широкое применение найдет окантовочный станок консольного типа модели СМР-012, разработанный в двух вариантах — стационарном и переносном (для строительных площадок). Последний оснащен водяным баком и насосом для подачи охлаждающей жидкости. Перемещение стола с обрабатываемым изделием осуществляется в нем вручную маховиком с помощью реечной передачи.



22 Транспортная система на основе роликового конвейера.

Шпиндельная головка с алмазной пилой (кругом) диаметром 250 мм имеет возможность перемещаться в поперечном направлении для установки на требуемый размер.

В настоящее время институтом Гипростроммашина разработан модернизированный вариант станка этой модели (рис. 21).

Помимо автоматизации главных и вспомогательных движений рабочего процесса алмазно-дисковой распиловки особое внимание разработчиков привлекают вопросы механизации наиболее трудоемких процессов. В камнеобработке с тяжелым физическим трудом связаны главным образом транспортировка заготовок или изделий и их позиционирование. Весьма эффективной представляется в этом смысле относительно несложная транспортная система с роликовым конвейером (рис. 22), на котором без труда вручную можно перемещать изделия из камня, устанавливаемые на деревянных поддонах [132]. В указанной

системе взаимно перпендикулярные конвейерные линии соединяются двумя поворотными кругами.

При обработке крупногабаритных заготовок и тяжелых плит, когда приходится иметь дело с их транспортировкой, загрузкой и съемом с конвейера, а также с установкой в определенном положении, линия оборудуется специальным столом, который может менять положение в диапазоне $0—90^\circ$. В этом случае плитам с помощью крана придают наклонное положение, опускают и через рольганги они подаются на стол, установленный горизонтально. Затем оснащенные подъемником ролики, находящиеся между опорами стола, опускаются, благодаря чему изделие, надежно прижатое своей массой к столу транспортера, можно считать подготовленным к дальнейшей обработке.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЛМАЗНОГО ДИСКОВОГО РЕЗАНИЯ

1. Параметры рабочей поверхности алмазного инструмента

Вопросы научно обоснованного проектирования эффективных типов режущего инструмента и оптимизации технологических процессов обработки камня неразрывно связаны с созданием теоретических основ алмазно-абразивного разрушения материалов. Следует указать на значительные трудности в решении этой проблемы обусловленные случайным распределением режущих элементов (зерен) на рабочей поверхности инструмента, сложным механизмом формирования срезов на обрабатываемом материале, не поддающемся абсолютно точному описанию обычными методами и многообразием явлений, происходящих непосредственно в контактной зоне и зависящих от различных взаимовлияющих факторов.

В отличие от лезвийных инструментов со строго ориентированным (или фиксированным) расположением режущих элементов процесс алмазно-абразивной обработки можно классифицировать как резание инструментом с геометрически неопределенной режущей кромкой, представляющее собой, по выражению Е. Н. Маслова, «массовое царапание» [62], при котором отдельные зерна (следы) перекрывают друг друга.

Несмотря на это, последние достижения в области синтеза алмазов и постоянно растущие требования к интенсификации производственных процессов способствовали ускорению и углубленному развитию теоретических исследований, в которых особое место занимают математическое описание режущего слоя алмазно-абразивного инструмента и разработка на его основе основных кинематических и силовых параметров процессов обработки, определяющих ее эффективность.

К основным параметрам, характеризующим рабочую поверхность инструмента и в конечном счете его эффективность, относятся форма, геометрия и рабочее состояние зерен; распределение зерен и расстояний между ними в объеме алмазносного слоя и на поверхности рабочих элементов; распределение зерен по выступанию над уровнем связки; число зерен, принимающих непосредственное участие в контакте с обрабатываемым материалом, в зависимости от их состояния, режимов работы и характеристики алмазносного слоя.

Применительно к алмазно-абразивным способам обработки теоретически вопросы определения параметров рабочей поверхности инструмента наиболее интенсивно начали исследоваться примерно в 60-е годы. В методическом отношении развитие этих исследований до 1967—1970 годов характеризовалось преимущественно геометрическим толкованием самого процесса взаимодействия алмазно-абразивного слоя с обрабатываемым материалом со значительными допущениями и схематизацией основных параметров, что, безусловно, не могло не сказаться на соответствии теории практике.

Так, при изучении рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента большинство авторов [50, 54, 62, 92, 105, 106] в качестве исходной приняли гипотезу о равномерном расположении зерен в объеме рабочего слоя, на основании чего вывели расчетные зависимости для определения числа рабочих зерен и расстояний между ними. Практически во всех работах фактическое расстояние между рабочими зернами корректируется только коэффициентами, учитывающими процент удаления зерен после правки и в процессе резания. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о больших противоречиях в результатах вычислений, несмотря на структурную однородность формул.

В работе [50] сделана попытка обосновать фактическое число зерен на рабочей поверхности с позиций теории вероятности задачи Бюффона. Однако, по нашему мнению, исходные условия авторов, базирующиеся на предположении о нахождении центров зерен на одной прямой, противоречат первоначальной гипотезе о случайном распределении зерен в рассматриваемом объеме связки. Сомнителен также вывод авторов о возможности определения вылета зерен («разновыстность») через расстояния между ними.

Заслуживает внимания решение вопроса определения числа рабочих зерен через распределение их по вылетам [105]. Однако, как и в указанных выше работах, не учитывается зависимость этого параметра от режимов работы, свойств обрабатываемого материала и состояния рабочих зерен, определяемых характером их износа, что снижает достоверность полученных результатов.

В методическом отношении большой интерес представляют работы, в которых алмазно-абразивное резание трактуется как случайный процесс. В одной из них [89], схематизируя процесс шлифования как линейную динамическую систему, произвели попытку определить режущую способность круга с учетом в обратной передаточной функции его рабочего профиля и характеристик обрабатываемого изделия до и после работы. В других исследованиях [58, 59] режущий профиль круга рассматривается как реализация некоторого случайного процесса, описываемого цепью Маркова второго порядка, в которой матрица перехода имеет два состояния. С использованием вероятностного метода при переходе от одного состояния к другому в выбранных интервалах можно судить о площадках износа зерен и расстояниях между ними.

К сожалению, указанные разработки также не учитывают всех параметров сложного процесса алмазно-абразивного резания, в связи с чем для их практической реализации необходима существенная модернизация полученных зависимостей применительно к конкретным условиям эксплуатации инструмента.

Применительно к алмазно-абразивному инструменту распределение зерен в объеме алмазоносного слоя следует рассматривать как события, следующие одно за другим через случайные промежутки длины [48, 45]. Обозначим вероятность того, что в определенном объеме или линейном участке число зерен N будет равно n , через $P_n(l)$. Тогда, исходя из технологии изготовления алмазного инструмента, примем ряд положений, необходимых для решения задачи:

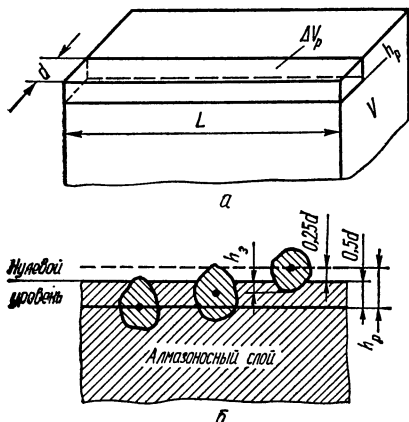
- 1) $P_n(l)$ зависит только от длины участка L и не зависит от начала отсчета;
- 2) $P_n(l)$ не зависит от числа зерен N , попавших в любые интервалы, предшествующие l ;
- 3) вероятность попадания зерна в интервал dl есть бесконечно малая по сравнению с dl .

В теории вероятности [53, 63, 107] при соблюдении указанных условий такие точечные процессы подчиняются закону распределения Пуассона:

$$P_n(l) = \frac{(\lambda l)^n e^{-\lambda l}}{n!}, \quad (II.1)$$

где λ — интенсивность событий (среднее число зерен, приходящихся на единицу длины).

Отметим, что в одной из работ [55] получен такой же вывод.



23. Схемы рабочего объема алмазного слоя одной линии резания (а) и расположения геометрических центров зерен по высоте в рабочем объеме алмазного слоя пилы (б).

Для пуассоновского процесса распределения числа событий распределение интервалов между ними будет показательным [53]:

$$a(l) = \lambda e^{-\lambda l}, \quad l > 0, \quad (II.2)$$

где $a(l)$ — плотность вероятности.

Математическое ожидание расстояний между зернами \bar{l} , а также среднее квадратическое отклонение ряда σ для показательного распределения

$$\bar{l}, \quad \sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (II.3)$$

Тогда

$$\bar{l} = \frac{L}{N_L - 1}, \quad (II.4)$$

где N_L — число зерен на рассматриваемой длине рабочей поверхности.

Для условий алмазно-абразивной обработки расчетные зависимости целесообразно относить к одной линии реза-

ния, т. е. к рабочему объему ΔV_p , содержащему геометрические центры зерен, находящиеся на рабочей поверхности с шириной, равной средневзвешенному диаметру зерна d (рис. 23, а):

$$N_L = An_1\Delta V_p. \quad (\text{II.5})$$

Т а б л и ц а 11

Среднее число зерен в одном карате алмазного порошка, тыс. штук

Зернистость порошка	Марка алмазов				
	АСП	АСР	АСВ	АСК	АСС
630/500	—	—	—	—	0,65
500/400	—	—	—	1,25	1,21
400/315	—	—	2,44	2,33	2,25
315/250	—	—	4,53	4,35	4,19
250/200	—	9,60	8,41	8,11	7,81
200/160	—	17,7	15,6	15,1	14,5
160/125	36,0	32,5	29,1	28,2	27,1
125/100	65,2	59,8	54,0	52,6	50,4
100/80	118	110	100	98,1	93,9
80/63	213	202	186	183	175
63/50	386	372	346	341	326
50/40	699	685	644	636	606

Здесь A — масса алмазов, содержащихся в единице объема (карат/см³):

$$A = \frac{4,39K}{100}, \quad (\text{II.6})$$

где K — условная концентрация алмазов, %; 4,39 — масса алмазов в 1 см³ алмазного слоя при $K = 100\%$; n_1 — число зерен в одном карате алмазов определяется по табл. 11 [29].

Как известно, при производстве и контроле абразивных (и алмазных) порошков за размер зерна принимается полусумма длины и ширины проекции зерна на предметном столе микроскопа или часового проектора. При этом за длину принимаются наибольшие линейные размеры проекции зерна, а за ширину — наибольший размер, перпендикулярный первому.

Алмазные порошки (как и другие абразивные порошки) кроме зерен основной фракции содержат побочные: меньше основной — дополнительную и мелкую, больше основной —

крупную (зерна предельной фракции в алмазных порошках не допускаются). Поэтому в формулу вместо размера зерен подставляются значения среднего размера всей совокупности зерен порошка данной зернистости. В связи с тем что речь идет о массе и объеме частицы, необхо-

Т а б л и ц а 12
Средний диаметр одного зерна, мкм

Зернистость порошка	Марка алмаза				
	АСО	АСР	АСВ	АСК	АСС
630/500	—	—	—	—	550
500/400	—	—	—	442	447
400/315	—	—	354	359	364
315/250	—	—	289	292	295
250/200	—	224	234	237	240
200/160	—	183	191	193	195
160/125	144	149	155	157	159
125/100	118	122	126	127	129
100/80	97,1	99,4	102,7	103,3	104,8
80/63	79,8	81,2	83,5	83,9	85,2
63/50	65,5	66,2	67,9	68,2	69,3
50/40	53,7	54,1	55,2	55,4	56,3

димо вычислить не просто среднее значение, а средний взвешенный размер частицы d , который может быть определен по формуле

$$d = \sqrt[3]{\frac{d_k^3 P_k + d_o^3 P_o + d_d^3 P_d + d_m^3 P_m}{100}}, \quad (\text{II.7})$$

где d_k , d_o , d_d , d_m , P_k , P_o , P_d , P_m — средний кубический размер зерен соответственно крупной, основной, дополнительной и мелкой фракций и их процентное содержание.

Величины d_k , d_o , d_d , d_m определяют как средние кубические значения из максимального и минимального размера частиц, входящих в данную фракцию:

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{d_{k \max}^3 + d_{k \min}^3}{2}}. \quad (\text{II.8})$$

Значение d рассчитано как среднестатистическое значение на основании данных работы [29] по поверхности зерен различных марок синтетических алмазов (табл. 12).

Рабочий объем одной линии резания

$$\Delta V_p = dLh_p, \quad (\text{II.9})$$

где h_p — высота рабочего объема.

Из схемы, представленной на рис. 23, б, видно, что в рабочий объем по высоте h_p попадают зерна с геометрическими центрами, расположенными как ниже нулевого уровня связки, так и выше. Число зерен, геометрические центры которых находятся выше нулевого уровня, определяются удерживающей способностью связки, свойствами обрабатываемого материала и режимными параметрами. В совокупности все эти параметры и определяют минимальную глубину защемления h_3 . Глубину защемления можно определить экспериментально, а при значении указанных выше свойств она может быть определена и расчетным путем.

Следовательно, рабочий объем одной линии резания за вычетом превышений связки над нулевым уровнем $V_{пр}$, которые имеются практически у всех зерен на поверхности, будет

$$\Delta V_p = dh_p L - V_{пр}. \quad (\text{II.10})$$

Тогда число зерен в одной линии резания

$$N_L = \frac{4,39n_1K}{10^5} (dh_p L - V_{пр}). \quad (\text{II.11})$$

Согласно полученному ранее математическое ожидание среднего расстояния между зернами в линии резания

$$\bar{l} = \frac{L}{N_L - 1} = \frac{L}{\frac{4,39n_1K}{10^5} (dh_p L - V_{пр}) - 1}. \quad (\text{II.12})$$

Однако число рабочих зерен, принимающих участие в процессе разрушения, будет зависеть прежде всего от режима резания, определяющего толщину среза, снимаемого пилой при повороте ее на угол контакта φ_n . Другими словами, задача определения числа рабочих зерен сводится к нахождению закона распределения их вероятностей в зависимости от толщины среза, снимаемого пилой, принимаемая за начало отсчета уровень максимального выступания зерен над связкой.

Учитывая, что толщина среза, снимаемого пилой, изменяется при прочих постоянных параметрах по синусоидальному закону, данный процесс удобнее всего характеризовать

средними ее величинами $a_{\text{ср}}$. Максимальное число рабочих зерен, участвующих в резании, будет определяться толщиной единичного среза верхней точки дуги контакта

$$a_{\text{max}} \simeq 2a_{\text{ср}} = \frac{2V_{\text{п}}H_{\text{р}}}{60V_{\text{о}}}, \quad (\text{II.13})$$

где $V_{\text{п}}$ — скорость подачи изделия; $H_{\text{р}}$ — глубина резания; $V_{\text{о}}$ — окружная скорость резания.

Исходя из того что на состояние поверхности алмазосносного слоя влияет большое число факторов, которые в совокупности не могут быть учтены через известные параметры, закон распределения зерен в зависимости от толщины среза на данный момент можно найти лишь экспериментально. При известном законе распределения зерен легко определяется математическое ожидание среднего расстояния между рабочими зернами

$$\bar{l}_{\text{р}} = \frac{L}{N_{\text{р}} - 1} = \frac{L}{N_{\text{Л}}P(a_{\text{з}}) - 1}, \quad (\text{II.14})$$

где $N_{\text{р}}$ — число зерен, участвующих в резании.

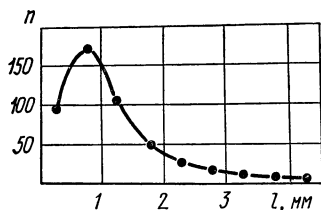
Экспериментальная проверка распределения расстояний между зернами проводилась в процессе изучения алмазосносного слоя сегментов пилы диаметром 630 мм зернистостью АСК 315/250, концентрацией 75% на связке Ж при резании лабрадорита. Замеры расстояний между зернами проводились по фотографиям сегментов пыли, снятых при увеличении ($\times 18,6$). Перед обработкой фотографии рабочей поверхности алмазосносного слоя по его длине разбивались на параллельные зоны с размером, равным средневзвешенному диаметру зерна. В пределах каждой зоны расстояние замерялось только между центрами тех проекций близлежащих зерен, которые входили в нее не менее чем на половину своего размера.

При математической обработке результатов замеров, выполненной по методу произведений [57], значения расстояний между зернами классифицировались по интервалам с ценой деления 0,50 мм.

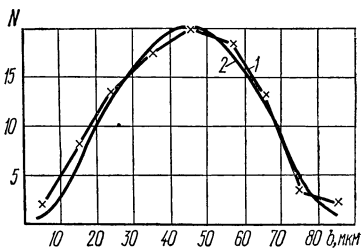
Для получения достоверных результатов число опытных данных по каждому интервалу выбиралось таким, чтобы относительная ошибка среднего арифметического значения расстояний не превышала 5%. Практика обработки аналогичных данных показала, что принятое условие выполняется при их числе 15—20. Результаты математической

обработки 486 измерений, изображенных на полигоне (рис. 24), показали, что распределение расстояний между зернами показательное ($\bar{l} = 1,14$ мм и $\sigma = 0,92$ мм практически равнозначны). Это подтверждает полученный ранее вывод.

Распределение зерен по вылетам. Экспериментальное изучение других параметров рабочей поверхности алмазо-



24. Распределение частоты n расстояний между зернами l на рабочей поверхности алмазоносного слоя пилы.



25. Распределение алмазных зерен по величине их вылета b на рабочей поверхности инструмента.

носного слоя проводилось с помощью микроскопа МИН-8 на дисковых сегментных пилах диаметром 300 мм, оснащенных алмазами зернистостью, изменяющейся в диапазоне 200/160—630/500, и концентрацией 20, 30, 40, 50, 75%. Увеличение объектива микроскопа $\times 21$, окуляра — $\times 10$; цена деления шкалы барабана механизма микрометрической фокусировки 2 мкм.

В задачу исследований входило изучение распределения зерен по вылетам и установление закона, выявление формы, размеров элементов возвышений связки, состояния зерен в зависимости от характеристики алмазоносного слоя и режимов резания гранита Жежелевского месторождения.

Выступление зерен над уровнем связки фиксировалось по длине выборочно взятых трех-четырех сегментов пилы по всей ширине поля зрения окуляра в таком расчете, чтобы число опытных данных составляло в среднем 100.

При математической обработке результатов измерений [38] вылеты зерен классифицировались по интервалам с ценой деления 10 мкм, в пределах которых плотность распределения принималась постоянной. На основании полученных данных строились полигоны распределения зерен

по вылетам, характер изменения которых для всех изучаемых состояний рабочей поверхности, как показала математическая обработка результатов, соответствует нормальному закону распределения случайных величин. В качестве примера на рис. 25 представлена наряду с экспериментальной (1) теоретическая дифференциальная кривая (2) плотности распределения зерен по вылетам $\varphi(b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b_i-\bar{b})^2}{2\sigma^2}}$ для одного из изучаемых вариантов характеристики алмазосного слоя и режима работы.

Основные параметры распределений — средневзвешенное значение вылета зерен \bar{b} и среднеквадратическое отклонение ряда σ — определялись методом произведений. Отметим, что для всех полученных зависимостей теоретические кривые хорошо совпадают с экспериментальными, в связи с чем не было необходимости в определении критериев согласия, ассиметрии, эксцесса для аналитического выражения закона распределения зерен.

Таким образом, распределение зерен по вылетам подчиняется нормальному закону, описываемому интегральной функцией Гаусса:

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (\text{II.15})$$

Здесь t — стандартизированный параметр нормального закона, $t = \frac{b_i - \bar{b}}{\sigma}$, где b_i — текущие значения вылета зерен.

Установленный закон распределения позволяет легко определить число рабочих зерен в зависимости от средней толщины среза:

$$N_p = \frac{4,39n_1K}{2 \cdot 10^5} \Delta V_p \frac{1 + \Phi(t_1)}{2}, \quad (\text{II.16})$$

где t_1 находится по специальным таблицам приложений теории вероятности; $t_1 = \frac{a_{\max} - \bar{b}}{\sigma}$ [63].

Анализ результатов определения основных параметров закона распределения зерен по вылетам на рабочей поверхности алмазосного инструмента свидетельствует о том, что параметры характеристики алмазосного слоя (зернистость, концентрация алмазов) и производительность

процесса резания существенно влияют на средневзвешенное значение вылета зерен и среднеквадратическое отклонение ряда.

Так, при рациональных режимах резания гранита дисковыми сегментными пилами, импрегнированными алмазами одной ячейки вибростола, с увеличением зернистости алмазов, а соответственно и их прочности, параметры распределения зерен по вылетам растут согласно выражениям (мкм)

$$\bar{b} = 24 + 0,06d; \quad (\text{II.17})$$

$$\sigma = 7,4 + 0,028d. \quad (\text{II.18})$$

Для практически равной прочности алмазов (10—11 кгс), зернистость которых изменялась в диапазоне 250/200—500/400, \bar{b} и σ остаются постоянными и соответственно равными 56 и 22 мкм.

Аналогичные выводы получены для условий резания гранита инструментом с алмазами прочностью 2—4 кгс в диапазоне изменений их зернистости 200/160—400/315.

Средневзвешенное значение вылета зерен и среднеквадратическое отклонение ряда изменяются в зависимости от концентрации алмазов при резании гранита в одних режимных условиях (рациональных) по закону параболы:

$$\bar{b} = 61 + 0,58K - 0,01K^2, \quad (\text{II.19})$$

$$\sigma = 24,6 + 0,15K - 0,03K^2. \quad (\text{II.20})$$

Характерно, что максимальные значения \bar{b} и σ соответствуют концентрации алмазов 30%; при увеличении или уменьшении ее изучаемые параметры уменьшаются.

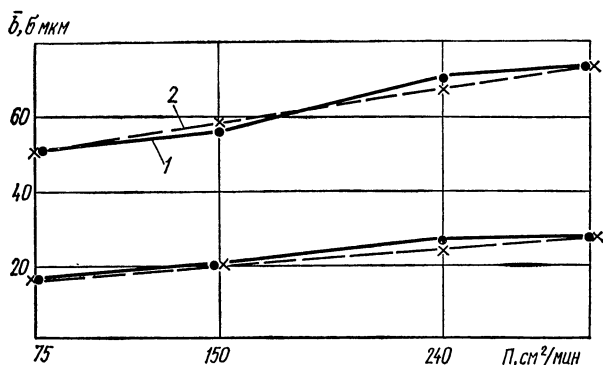
В зависимости от производительности процесса резания четко прослеживается тенденция к росту значений \bar{b} и σ при ее увеличении (рис. 26):

$$\bar{b} = 44,1 + 0,1\Pi, \quad (\text{II.21})$$

$$\sigma = 13,45 + 0,046\Pi. \quad (\text{II.22})$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать предположение о том, что выведенные уравнения будут характеризоваться одними и теми же угловыми коэффициентами и для других вариантов характеристики алмазосносного слоя

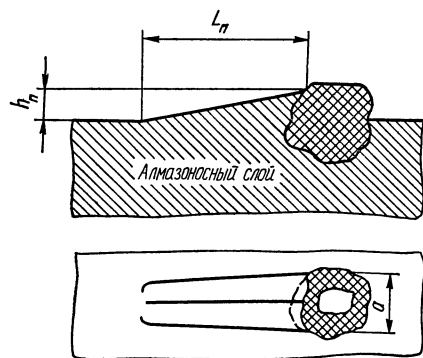
Таким образом, в результате проведенных исследований установлен закон распределения зерен по вылетам



26 Зависимость параметров распределения зерен по вылетам (\bar{b} , σ) от производительности резания гранита:
1 — экспериментальная кривая; 2 — теоретическая

и выведены аналитические выражения для его параметров, что позволяет использовать их для определения числа рабочих зерен, непосредственно участвующих в резании, для любых режимных условий.

Элементы возвышений связки над ее нулевым уровнем.
При исследовании процесса резания природного камня



27. Элементы превышений связки над ее нулевым уровнем.

возникает необходимость в определении объемов межзеренного пространства, характеризующегося рельефом рабочей поверхности инструмента. Одним из элементов рельефа являются возвышения связки над ее нулевым уровнем с тыльной стороны зерен (против направления вращения пилы). Как указывалось ранее, объем превышений связки над ее нулевым уровнем V_n используется также и при

определении числа зерен на рабочей поверхности алмазосносного слоя. Экспериментальное изучение рельефа рабочей поверхности алмазосносного слоя проводилось на микроскопе МИН-9. Исследовались дисковые пилы диаметром

320 мм с алмазами размером 250—500 мкм, концентрацией 25, 40, 50, 75% и связкой на железной основе при резании лабораторита.

В процессе исследований установлено [9], что значительное большинство зерен имеет с тыльной стороны возвышения связки над их нулевым уровнем, приближающиеся по форме к треугольной призме (рис. 27).

Результаты обработки опытных данных показали, что для всех изучаемых характеристик алмазоносного слоя высота превышений h_n при увеличении вылета зерен b возрастает по закону прямой (рис. 28), описываемой уравнением

$$h_n = 0,67b. \quad (\text{II.23})$$

Длина превышений L_n изменяется в зависимости от двух основных параметров рабочей поверхности алмазоносного слоя — вылета зерен и теоретического среднего расстояния между ними l_T .

С вылетом зерен длина превышений связана параболической зависимостью вида $L_n = m_l b^\alpha$. Коэффициент m_l и показатель степени α , как видно из рис. 29, изменяются в зависимости от теоретического среднего расстояния между зернами по закону прямой:

$$m_l = 0,158 - 0,10l_T; \quad (\text{II.24})$$

$$\alpha = -0,197 + 0,864l_T. \quad (\text{II.25})$$

Тогда выражение для определения длины превышений будет иметь вид

$$L_n = (0,158 - 0,10l_T) b^{0,864l_T - 0,197}. \quad (\text{II.26})$$

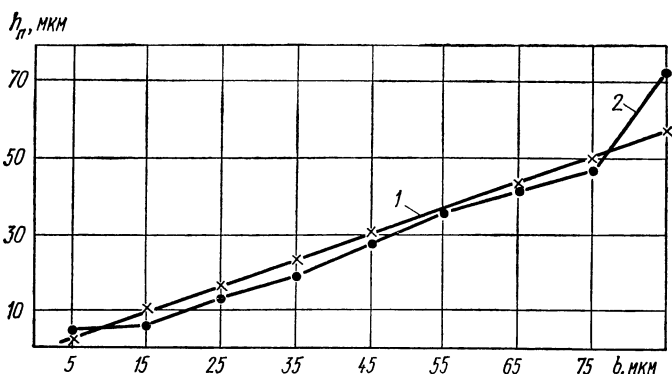
На основании ранее полученных зависимостей теоретическое расстояние между зернами определяется по формуле

$$l_T = \frac{L_1}{N_T - 1} = \frac{L_1}{\frac{4,39Kn_1}{10^5} Ldh_p - 1}, \quad (\text{II.27})$$

где N_T — теоретическое число зерен в одной линии резания (без учета объема превышений связки над ее нулевым уровнем).

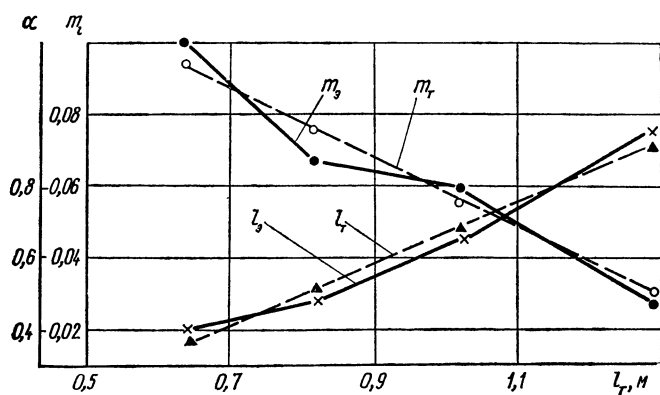
Объем превышений связки над нулевым уровнем для одного зерна ΔV_3 в общем виде

$$\Delta V_3 = \frac{1}{2} ah_n L_n, \quad (\text{II.28})$$



28. Зависимость высоты превышений связки h_n над нулевым уровнем от вылета зерен b :

1 — теоретическая кривая, 2 — экспериментальная.



29. Зависимость коэффициента m_l и показателя степени (α) от теоретического среднего расстояния l_T между зернами:

m_3, l_3 — экспериментальные кривые; m_T, l_T — теоретические

где a — основание превышения (см. рис. 27),

$$a = 2 \sqrt{r^2 + 2br + \frac{\Delta^2}{4}}. \quad (11.29)$$

При известной плотности распределения зерен по вылетам для определения суммарного объема превышений связки над нулевым уровнем одной линии резания можно

записать

$$\begin{aligned}
 V_{\text{пр}} &= \int_0^{b_{\text{max}}} \Delta V_3 N_T \varphi(b) = \\
 &= \int_0^{b_{\text{max}}} 0,67b (0,158 - 0,10l_T) b^{0,864l_T - 0,197} \sqrt{r^2 + 2br + \frac{\Delta^2}{4}} \times \\
 &\quad \times N_T \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b-\bar{b})^2}{2\sigma^2}} db. \quad (\text{II.30})
 \end{aligned}$$

После преобразований подынтегральное выражение принимает вид

$$V_{\text{пр}} = A_1 N_T \int_0^{b_{\text{max}}} b^{\alpha_1} \left(1 + \frac{b}{c_1}\right)^{\frac{1}{2}} (e^{-b^2})^\beta (e^{-b})^{\gamma_1} db. \quad (\text{II.31})$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{0,67 (0,158 - 0,10l_T)}{\sigma} \sqrt{\frac{rc}{\pi}} e^{-\frac{b-2}{2\sigma^2}}; \\
 c_1 &= \frac{r^2 + \frac{\Delta^2}{4}}{2r}; \quad \alpha_1 = 1,197 - 0,864l_T; \quad \beta = \frac{1}{2\sigma^2}; \\
 \gamma_1 &= \frac{\bar{b}^2}{\sigma^2}.
 \end{aligned}$$

После разложения в ряд выражений, не интегрируемых через элементарные функции $\left(1 + \frac{b}{c_1}\right)^{\frac{1}{2}}$, $(e^{-b^2})^\beta$, $(e^{-b})^{\gamma_1}$ и их умножения, выражение (II.30) принимает вид, удобный для решения:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{пр}} &= A_1 N_T \int_0^{b_{\text{max}}} b^{\alpha_1} \sum_{n=0}^{\infty} B_n b^n db = A_1 N_T \sum_{n=0}^{\infty} B_n \int_0^{b_{\text{max}}} b^{n+\alpha_1} db = \\
 &= A_1 N_T \sum_{n=0}^{\infty} B_n \frac{b_{\text{max}}^{n+\alpha_1+1}}{n+\alpha_1+1} = A_1 N_T b_{\text{max}}^{\alpha_1+1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{n+\alpha_1+1} b_{\text{max}}^n, \quad (\text{II.32})
 \end{aligned}$$

где B_n — неопределенный коэффициент умножения трех рядов.

Таблица 13
 Расчетные формулы для определения коэффициента B_n

n	Неопределенные коэффициенты для выражений			B_n
	$\frac{1}{\left(1 + \frac{b}{c_1}\right)^2}$	$\frac{1}{(e^{-b^2}) 2\sigma^2}$	$\frac{1}{\left(1 + \frac{b}{c_1}\right)^2} \frac{1}{(e^{-b^2}) 2\sigma^2}$	
0	1	1	1	$\frac{1}{\left(1 + \frac{b}{c_1}\right)^2} \frac{1}{(e^{-b^2}) 2\sigma^2}$
1	$\frac{1}{2c_1}$	0	$\frac{1}{2c_1}$	$\frac{b^2}{\sigma^2} + \frac{1}{2c_1}$
2	$-\frac{1}{8c_1^2}$	$-\frac{1}{2\sigma^2}$	$-\left(\frac{1}{2\sigma^2} + \frac{1}{8c_1^2}\right)$	$\frac{b^4}{2\sigma^4} + \frac{b^2}{2c_1\sigma^2} - \frac{1}{2\sigma^2} - \frac{1}{8c_1^2}$
3	$\frac{1}{16c_1^3}$	0	$\frac{1}{16c_2^3} - \frac{1}{4c_1\sigma^2}$	$\frac{b^6}{6\sigma^6} + \frac{b^4}{4c_1\sigma^4} - \frac{b^2}{2\sigma^4} - \frac{1}{8c_1^3\sigma^2} + \frac{1}{16c_1^3}$
4	$-\frac{5}{128c_1^4}$	$\frac{1}{8\sigma^4}$	$\frac{1}{8\sigma^4} + \frac{1}{16c_1^2\sigma^2} - \frac{5}{128c_1^4}$	$-\frac{b^8}{24\sigma^8}$
5	$\frac{7}{256c_1^5}$	0	$\frac{1}{16c_1\sigma^4} - \frac{1}{32c_1^3\sigma^2} + \frac{7}{256c_1^5}$	$-\frac{b^{10}}{120\sigma^{10}}$

Результаты определения коэффициентов B_n для каждого ряда и их перемножения приведены в табл. 13. При расчете коэффициента B_n с небольшой погрешностью (до 5%) можно ограничиться $n = 3$.

Для практического пользования, как показывает анализ полученных таким образом результатов, суммарный объем превышений связи $V_{пр}$ можно определить из выражения

$$V_{пр} \approx 0,01\Delta V_p. \quad (\text{II.33})$$

Полученное аналитическое выражение суммарного объема превышений связи над ее нулевым уровнем позволяет рассчитывать рабочий объем алмазосносного слоя ΔV_p , входящий в формулу для определения числа зерен, принимающих участие в резании.

Состояние алмазных зерен на рабочей поверхности. В результате изучения состояния рабочей поверхности алмазных пил установлено, что практически все зерна, независимо от вылета, имеют гладкую площадку износа. При этом размер площадок для всех изучаемых вариантов характеристики алмазосносного слоя изменяется для 2/3 диапазона вылетов зерен, начиная с максимального, и незначительно снижается, начиная с вылета 20—30 мкм (рис. 30, а).

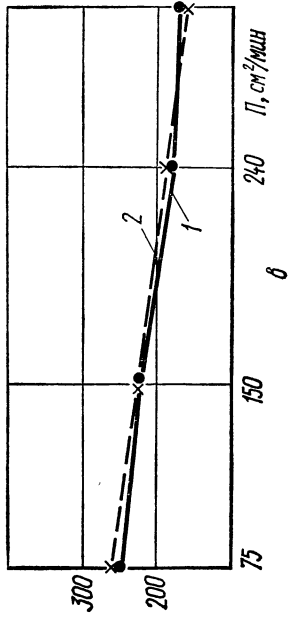
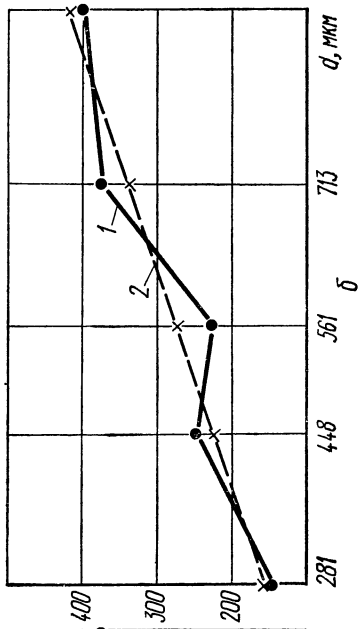
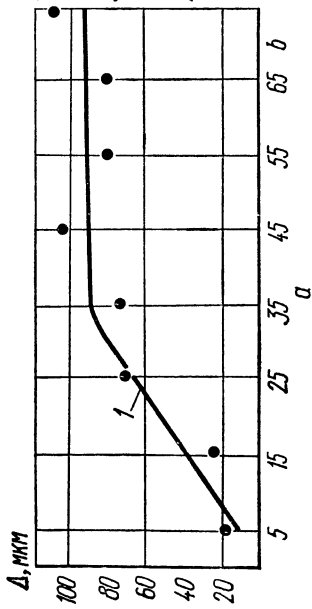
Анализ экспериментальных данных показывает, что площадки затупления имеют и зерна, которые не должны принимать непосредственное участие в резании, так как в рациональных режимах расчетная толщина среза, снимаемого одним зерном, не превышает 10—15 мкм, в то время как максимальное значение вылета зерен составляет 150—160 мкм. Видимо, наличие площадок затупления на рабочих зернах можно объяснить их контактным взаимодействием с образовавшимися на обрабатываемом материале гребешками и истирающим воздействием мелкодисперсных продуктов разрушения.

Из этого также следует, что для расчетных зависимостей можно использовать средневзвешенную величину площадки износа $\Delta_{ср}$, найденную для зоны их постоянных значений:

$$\Delta_{ср} = \sqrt{\frac{4\sum\Delta_n n_n}{\pi\sum n_n}}, \quad (\text{II.34})$$

где Δ_n , n_n — соответственно средний размер площадки износа и частота для каждого интервала вылетов.

Анализ результатов исследований по установлению зависимости средней площадки износа от зернистости.



30. Зависимость размера площадки износа алмазных зерен Δ от их вылета b (a), среднего диаметра d (б) и производительности резания гранита Γ (в):
 1 — экспериментальная кривая, 2 — теоретическая кривая.

концентрации и производительности позволил установить следующие закономерности:

зернистость алмазов для принятых условий эксперимента существенным образом влияет на величину площадки износа, которая растет по закону прямой с увеличением зернистости согласно выражению $\Delta = 35,2 + 0,424d$ (рис. 30, б);

концентрация алмазов для одной зернистости практически не влияет на величину площадки износа зерен;

величина площадки износа уменьшается с увеличением производительности резания (рис. 30, в): $\Delta = 293 - 0,45П$

Из этих закономерностей вытекает ряд выводов, объясняющих процесс износа алмазно-абразивного инструмента, который, как мы считаем, можно подразделить на несколько одновременно протекающих фаз:

износ алмазных зерен вследствие абразивного воздействия обрабатываемого материала;

микроскалывание и разрушение зерен вследствие механических и термических напряжений, возникающих в процессе резания;

механическое удаление (вырывание) алмазных зерен из связки;

абразивный износ связки, определяемый воздействием продуктов разрушения; интенсивность его растет с увеличением давлений дисперсной массы на связку. В свою очередь величина удельных давлений будет определяться объемом разрушенной породы.

Следует отметить, что величина износа зерен и связки должна зависеть в первую очередь от абразивных свойств разрушаемой породы и твердости частиц (составляющих компонентов породы).

Исходя из изложенных выше позиций можно объяснить зависимости средних величин площадки износа, вылета зерен и среднеквадратического отклонения ряда от зернистости алмазов и производительности резания. Так, при постоянных режимных параметрах резания увеличение средней величины площадки износа при увеличении зернистости алмазов объясняется практически одинаковой интенсивностью линейного износа зерен по высоте. Характер изменения среднего квадратического отклонения ряда и вылета зерен в зависимости от производительности процесса резания можно объяснить степенью воздействия

продуктов разрушения на связку. При повышении производительности объем и удельные давления продуктов разрушения на связку возрастают; повышается интенсивность износа связки, что способствует более быстрому обнажению алмазных зерен, а затем и вырыванию их из связки. При этом увеличивается диапазон возможных значений вылета зерен, дисперсия ряда распределения зерен по вылетам, а следовательно, и среднеквадратическое отклонение ряда. В связи с сокращением длительности обновления зерен на рабочей поверхности инструмента уменьшается также и средняя величина площадки износа, т. е. уменьшается коэффициент использования алмазов. Иными словами, при увеличении производительности процесса резания твердых разновидностей природного камня алмазными пилами на металлической связке в определенный момент интенсивность износа связки начинает оказывать превалирующее действие на износ алмазосносного слоя инструмента, что снижает эффективность его применения. Отсюда применительно к обработке различных пород природного камня возникает задача разработки такой связки, при которой интенсивность износа ее и зерен была бы соизмеримой.

С использованием методов математической статистики найдено выражение для определения размера площадки износа в зависимости от зернистости алмазов при работе инструмента с рекомендуемыми значениями производительности резания гранитов пилами диаметром 320 мм (150 см²/мин):

$$\Delta = 35,2 - 0,425d. \quad (II.35)$$

Для этих условий обработки применительно к рекомендуемой зернистости алмазов (400/315) выведена расчетная зависимость размера площадки износа зерна от производительности резания:

$$\Delta = 239 - 0,45П. \quad (II.36)$$

Концентрация алмазов, как указывалось ранее, практически не влияет на размер площадки износа зерен, который для исследуемого диапазона $K = 20-75\%$ составляет 234 мкм.

Качественно выражение (II.36) будет справедливо и для других зернистостей (угловые коэффициенты прямых останутся прежними).

При проведении экспериментов изучались также размеры лунок защемления алмазных зерен, которые могут харак-

теризовать удерживающую способность связки, зависящую от ее свойств и геометрии зерен. При этом характеризовать удерживающую способность могут лунки только что удаленных зерен. В процессе исследований они оценивались по величине возвышений связки над нулевым уровнем с тыльной и боковой сторон рабочих зерен.

Как показали эксперименты, глубина лунок только что удаленных зерен для всех исследуемых вариантов характеристики алмазоносного слоя в среднем равна $0,25d$, на основании чего высота рабочей зоны

$$h_p = (0,50 + 0,25)d = 0,75d. \quad (II.37)$$

Число разрушенных зерен для изучаемых композиций алмазоносного слоя не превышало 2—4%, что свидетельствует о преимущественно абразивном характере износа рабочей поверхности инструмента.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлен ряд важных теоретических положений, необходимых для исследования и управления процессами алмазно-дискового резания природного камня.

1. Распределение зерен в объеме алмазоносного слоя подчиняется закону Пуассона а расстояния между ними на рабочей поверхности инструмента — показательному закону распределения.

2. Распределение зерен по вылетам на рабочей поверхности алмазоносного слоя подчиняется нормальному закону.

3. При резании твердых разновидностей природного камня практически все зерна имеют гладкую площадку износа, средневзвешенный размер которой не зависит от концентрации, растет при увеличении зернистости и снижается при повышении производительности по закону прямой.

4. Минимальная глубина лунки защемления зерен в связке для принятых условий эксперимента составляет в среднем $0,25d$.

5. С учетом вероятностного метода выведены расчетные зависимости для определения числа зерен, непосредственно участвующих в резании, и расстояний между ними.

Необходимо отметить, что в последующих работах вероятностные методы при математическом описании геометрии рабочей поверхности алмазоносного слоя находят

все большее применение. Обобщенный анализ этих работ позволяет выделить следующие аспекты исследований в этой области.

Один из основных объектов изучения — геометрические параметры зерен алмазных порошков — аппроксимируется тремя формами: шаровой, принятой в рассмотренных ранее исследованиях, эллипсоидом вращения и статистическим многогранником. Большинство теоретических разработок применительно к процессам алмазно-абразивной обработки металлических и неметаллических материалов основываются все же на шаровой форме зерен, представляющей более удобную модель для математических операций. При алмазно-дисковых способах резания природного камня используют преимущественно высокопрочные марки природных и синтетических алмазов, зерна которых, как правило, имеют правильное монокристаллическое строение и характеризуются формами, близкими к шаровой. Статистический анализ геометрических размеров, регламентируемых действующими стандартами, свидетельствуют о том, что отношение более длинной стороны к короткой не превышает 10—15%.

Шаровые модели зерен используются в работах как советских, так и зарубежных исследователей [61, 64, 131].

Схематизация алмазных зерен в виде эллипсоида вращения, нашедшая применение в работах советских исследователей [34, 93], правомерна в большей степени в тех процессах, в которых используются преимущественно алмазные порошки с малой прочностью зерен, имеющих значительные расхождения в основных размерах (например, на операциях получистового и чистового шлифования различных материалов и др.).

Определенные перспективы с точки зрения более углубленного изучения контактных явлений и износа представляет описание зерен в форме статистического многогранника, хотя до настоящего времени в связи со значительными трудностями в реализации эта форма широкого распространения не получила и известны лишь попытки ее использования [60].

При определении числа зерен, участвующих в резании, а также других параметров алмазонаосного слоя выступание зерен над уровнем связки в качестве исходного положения задается по нормальному закону распределения [27, 34, 64, 93]. В большинстве работ для характеристики

состояния рабочей поверхности инструмента вполне обоснованно используется величина критической глубины заделки зерна в связке, однако при разработке аналитических выражений для определения числа зерен, участвующих в резании, принимается, что половина из них (или определенная часть) удаляется из связки в процессе взаимодействия с обрабатываемым материалом. Встречаются также и способы решения этой задачи выделением из общего объема алмазонасного слоя определенной его части [27, 64], содержащей зерна, выступающие над связкой, как, например, в работе [64], когда связка задается равной $2r$ по высоте.

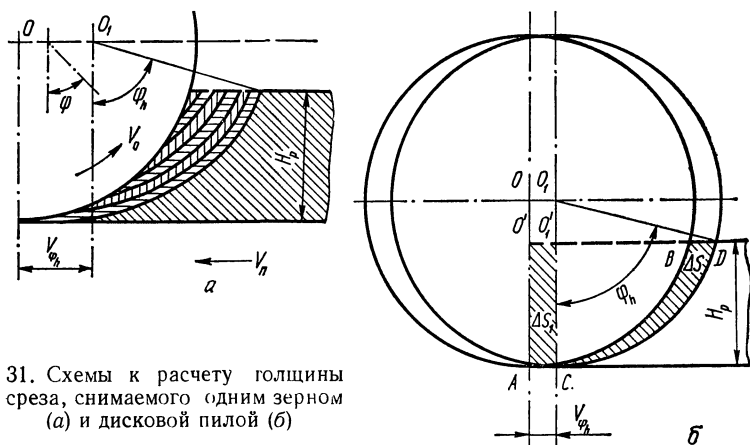
Все указанные допущения и основополагающие положения в определенной мере упрощают реальное состояние алмазонасного слоя и ограничивают область использования полученных таким образом расчетных зависимостей.

2. Кинематические параметры работы алмазного инструмента

В алмазно-абразивных способах резания износостойкость и другие эксплуатационные показатели работы инструмента во многом зависят от толщины среза a' , снимаемого одним зерном, и суммарного пути трения $\Sigma l_{тр}$. Величина a' , зависящая от всех параметров процесса резания (технологических режимов работы, характеристики алмазного слоя, конструктивных особенностей), во многом определяет нагрузку на рабочие элементы и характер их взаимодействия с обрабатываемым материалом, в связи с чем, по выражению Е. Н. Маслова, уравнение для его определения можно считать основным уравнением резания.

В настоящее время в различных областях техники, где применяют алмазно-абразивную обработку материалов, накоплено достаточно много экспериментальных данных, свидетельствующих об огромном значении этого кинематического параметра, без знания количественных и качественных определений которого невозможно углубленное изучение и научно обоснованное управление процессами разрушения и их оптимизация. В соответствии с выводами многочисленных исследований величина a' — одна из основных характеристик, определяющих формообразование стружки и условия ее отделения от обрабатываемого материала. Установлено, что при обработке различных

материалов при небольших значениях a' и больших r даже у практически хрупких пород камня, как, например, мрамор, гранит [44, 112, 131], в процессе взаимодействия происходит пластическое деформирование с большими энергозатратами. По мере увеличения a' изменяется харак-



31. Схемы к расчету толщины среза, снимаемого одним зерном (а) и дисковой пилой (б)

тер напряженного состояния в контактной зоне, и при достижении определенного соотношения $\frac{a'}{r}$ происходит хрупкое разрушение с соответствующим уменьшением его энергоемкости. В связи с этим применительно к алмазно-абразивному резанию природного камня большое значение имеет установление такого значения a' , при котором процесс обработки осуществлялся бы в режиме хрупкого разрушения с минимальными износом и затратами энергии.

В общем виде толщину среза, снимаемого каждым зерном, можно представить в виде (рис. 31, а)

$$a' = \frac{V_n}{n_{об}} \frac{\varphi_h}{2\pi N_k} \sin \varphi, \quad (II.38)$$

где $n_{об}$ — число оборотов пилы в минуту; N_k — число рабочих зерен в одной линии резания в пределах дуги контакта инструмента с изделием; φ — текущее значение угла контакта инструмента с изделием.

Как видно из выражения (II.38), при заданных режимах резания толщина среза, снимаемого одним зерном, определяется характером изменения синуса текущего значения угла контакта и числа рабочих зерен в зависимости

от этого параметра, т. е. значение a' будет зависеть от того, как изменяются N_k и $\sin \varphi$ в пределах дуги контакта.

Ранее указывалось, что распределение зерен по вылетам на рабочей поверхности алмазонасного слоя подчиняется нормальному закону, описываемому интегральной функцией Гаусса. Тогда число рабочих зерен, принимая за начало отсчета уровень максимального их вылета, с небольшой погрешностью может быть представлено прямой вида

$$N_k = \gamma_1 a_z, \quad (\text{II.39})$$

где a_z — толщина единичного среза, снимаемого пилой; γ_1 — угловой коэффициент прямой, характеризующий плотность распределения зерен по вылетам.

В зависимости от текущего значения угла контакта инструмента с изделием a_z определяется по формуле

$$a_z = \frac{V_n}{n_{об}} \frac{\varphi_h}{2\pi} \sin \varphi.$$

Подставляя выражение (II.39) в уравнение (II.38), получаем

$$a' = \frac{1}{\gamma_1} = \text{const.} \quad (\text{II.40})$$

Таким образом, толщина среза, снимаемого одним зерном, обратно пропорциональна плотности распределения зерен по вылетам на рабочей поверхности алмазонасного слоя и не изменяется в пределах дуги контакта. Выведем аналитическое выражение для определения величины a' .

При определении числа рабочих зерен в одной линии резания в пределах дуги контакта исходим из следующих соображений. Так как толщина единичного среза в пределах дуги контакта изменяется от нуля до максимального значения, то в ее площадь попадает число зерен, определяемое максимальной толщиной среза a_{\max} :

$$a_{\max} = \frac{V_n}{n_{об}} \frac{\varphi_h}{2\pi} \sin \varphi_h = \frac{V_n R \varphi_h \sin \varphi_h}{30 V_c}. \quad (\text{II.41})$$

Тогда согласно формуле (II.16) выражение для определения числа рабочих зерен в одной линии резания в пределах дуги контакта можно записать

$$N_k = \frac{4,39 n_1 K}{2 \cdot 10^5} \Delta V_k \frac{1 + \Phi(t_1)}{2}. \quad (\text{II.42})$$

Рабочий объем одной линии резания в пределах дуги контакта для дисковых сегментных пил

$$\Delta V_{\kappa} = dh_p l_c z \frac{\varphi_h}{2\pi}, \quad (\text{II.43})$$

где l_c — длина сегмента пилы; z — число сегментов; φ_h — угол контакта в радианах.

Известно, что для условий резания дисковыми пилами, у которых окружная скорость значительно больше скорости подачи, длина дуги контакта с небольшой погрешностью выражается как

$$l_{\kappa} = R\varphi_h. \quad (\text{II.44})$$

Согласно выражению (II.37) $h_p = 0,75d$.

Тогда для этих условий N_{κ} будет иметь вид

$$N_{\kappa} = \frac{1,65n_1 K d^2 l_c z \varphi_h}{2\pi 10^5} \frac{[1 + \Phi(t_1)]}{2}. \quad (\text{II.45})$$

Используя известные методы [1, 62], определим значения средней толщины единичного среза, снимаемого пилой. Как следует из рис. 31, б, $a_{\text{ср}}$ можно представить как отношение площади единичного среза к длине дуги контакта:

$$a_{\text{ср}} = \frac{\Delta S_1}{l_{\kappa}} = \frac{V_{\text{п}} H_{\text{п}}}{60V_{\text{о}}}, \quad (\text{II.46})$$

$$\Delta S_1 = V_{\varphi_h} H_{\text{п}}. \quad (\text{II.47})$$

Здесь V_{φ_h} — поступательное перемещение пилы за время поворота пилы на угол φ_h :

$$V_{\varphi_h} = \frac{V_{\text{об}} \varphi_h}{2\pi} = \frac{V_{\text{п}} \varphi_h}{2\pi 60 n_{\text{об}}} = \frac{V_{\text{п}} R \varphi_h}{60V_{\text{о}}}, \quad (\text{II.48})$$

где $V_{\text{об}}$ — поступательное перемещение пилы за один оборот.

Подставляя выражение (II.45) в формулу (II.38), получаем выражения для определения толщины среза, снимаемого одним зерном:

$$a' = \frac{2 \cdot 6,1 \cdot 10^4 V_{\text{п}} \sin \varphi_{\text{ср}}}{n_{\text{об}} n_1 K d^2 l_c z [1 + \Phi(t_1)]}, \quad (\text{II.49})$$

$$a' = \frac{2 \cdot 3,17 V_{\text{п}} \sin \varphi_{\text{ср}} D}{V_{\text{о}} n_1 K d^2 l_c z [1 + \Phi(t_1)]}. \quad (\text{II.50})$$

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что применительно к условиям алмазно-дискового резания твердых пород камня среднее вероятное значение толщины среза, снимаемого одним зерном, уменьшается с различной интенсивностью при увеличении концентрации алмазов, диаметра инструмента, глубины резания и скорости продольной подачи и увеличивается при росте зернистости алмазов. Тенденция к некоторому уменьшению a' проявляется и при увеличении окружной скорости резания.

Полученные выводы принципиально отличаются от результатов аналитических разработок, основанных и на использовании методов теории вероятности. Несмотря на значительный прогресс в постановке и технике выполнения экспериментальных и теоретических исследований, многие закономерности алмазно-абразивной обработки материалов по-прежнему трактуются, исходя из установившихся взглядов на изменение a' в зависимости от технологических и других параметров резания. Так, от увеличения V_n и V_6 зависит соответствующее увеличение или уменьшение a' , удельных напряжений и энергоемкости резания; нет однозначного ответа о влиянии на этот параметр глубины резания и диаметра инструмента.

В то же время структура аналитических выражений (II.49), (II.50), устанавливающих взаимосвязь между основными параметрами характеристик алмазоносного слоя и обрабатываемого материала, технологическими режимами резания и конструктивными особенностями инструмента, не исключает возможности, что при определенном сочетании этих параметров величина a' не будет претерпевать каких-либо существенных изменений.

Необходимо отметить, что до последнего времени данное предположение, а также важный в теоретическом плане вывод о том, что величина a' не изменяется в пределах дуги контакта, получило лишь одно подтверждение в процессе статистической обработки результатов измерений параметров стружек (толщины, ширины и длины), образующихся при шлифовании стали чашечными кругами из кубического нитрида бора [28].

Для более углубленного изучения параметров стружек, снимаемых зернами алмазного инструмента при обработке природного камня, и оценки ряда теоретических выводов

разработан оригинальный экспериментальный метод, основанный на следующих положениях [65].

Известно, что толщина среза материала, снимаемого элементом рабочей поверхности инструмента периферийного типа, может быть представлена в общем виде

$$a_3 = \frac{V_n}{V_o} \Delta l \sin \varphi,$$

где Δl — длина элемента вдоль дуги контакта.

Величине a_3 при работе круга соответствуют определенные значения заглубления зерен, площадей сечения срезаемой ими стружки и число активных зерен.

Для конкретного режима, обозначив $V_n = KV_o$ (K — коэффициент пропорциональности), получим $a_3 = K\Delta l \sin\Phi_o$. Если K поддерживать постоянным в диапазоне скорости резания от 0 до V_o , то для $V_o = 0$, определяя предел a_3 при $V_o \rightarrow 0$, после раскрытия неопределенности получим $a_{30} = a_3$, где a_{30} — толщина среза материала, снимаемого элементом f при $V_o = 0$.

Таким образом, при условии $K = \text{const}$, которое может быть обеспечено синхронизацией V_n и V_o во всем диапазоне от 0 до V_o , в момент остановки круга мы получим те же значения заглубления зерен, площади сечения стружек, их распределения и то же число активных зерен, что и при V_o . Данное положение будет справедливым, если влияние скорости резания на процесс формирования стружек незначительно, что характерно для обработки природного камня, при которой энергоемкость разрушения породы и износ инструмента не зависят от скорости резания в определенном диапазоне режимов работы. В случае более существенного влияния скорости резания метод даст приближенные результаты, погрешность которых, обусловленная пластической деформацией обрабатываемого материала, может быть учтена на основании других экспериментов, например при царапании единичным зерном.

Синхронизация легко достигается, если привод вращения инструмента и подачи осуществляется от одного двигателя, как, например, в токарных станках. Скорость вращения при синхронизации может изменяться от V_o до 0 в процессе выбега привода при отключении двигателя без предварительного выключения подачи.

В соответствии с изложенным для изучения указанных параметров создан специальный стенд на базе токарного

станка модели 1616, оснащенный высокоточным шпинделем. Алмазный круг устанавливается на оправке, а обрабатываемые образцы и образец-эталон — в резцедержателе.

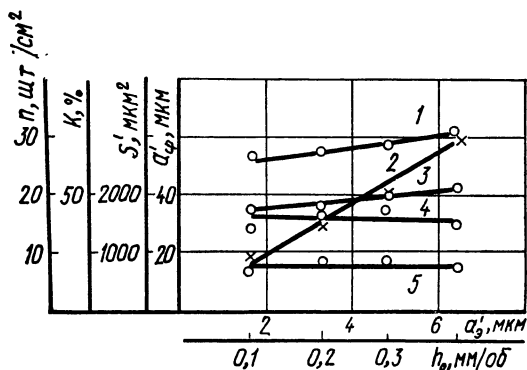
В качестве эталонного материала, на котором фиксируются следы алмазных зерен, выбрано органическое стекло, при обработке которого материал отделяется в виде сливной стружки, а увеличение площади сечения стружки за счет бокового развала, который имеет место при обработке хрупких материалов, практически отсутствует.

Чтобы упростить измерения, образец из органического стекла толщиной 10 мм размещают по горизонтальной оси инструмента, что соответствует углу контакта, равному 90° . На образце алмазным кругом выполняют пять-шесть пропилов с одной установки. Измерения проводят в специальном устройстве, созданном на базе микроскопа МИН-9, механической системы микроскопа ММИ-1, дополнительного подвижного двухкоординатного стола, который размещается на столе микроскопа ММИ-1, и бокового осветителя. Образец-эталон закрепляют в поворотном приспособлении, и поверхность одного из пропилов базируется по специальной цилиндрической поверхности на радиусе 100 мм от оси поворота. Параметры сечения стружек измеряют вблизи точек остановки зерен, которые устанавливаются по характерным изменениям картины царапин перед и за этими точками и вспучиванию материала у передней кромки зерна. Для определения точек остановки зерен используют вали длиннофокусный объектив с девятикратным увеличением, а также боковой осветитель, повышающий контрастность изображения. Для измерений применялся короткофокусный объектив с сорокакратным увеличением, позволяющий фиксировать отметки изучаемых точек с точностью до двух микрон по резкости получаемого изображения. Ширина царапин определялась по шкале, помещенной в окуляр с семикратным увеличением.

В процессе экспериментов исследовались стружки, срезаемые кругом АПП $200 \times 10 \times 3 \times 75$ —АСК 315/250, МЗ, 50%. Биение рабочей поверхности инструмента устранялось резанием с минимальной подачей образца из абразивного круга КЗ, затем алмазные зерна были дополнительно вскрыты при резании образцов из застывшего песчано-цементного раствора.

В процессе опытов определялись заглублие зерна a' , равное разности нижней и верхней отметок сечения

стружки, ширина b и площадь S' сечения стружки, причем наибольшую трудность представлял расчет последнего показателя. Эксперименты показали, что для данных условий рационально рассчитывать S' по результатам замеров в четырех—шести точках с введением в расчет коэффициента формы сечения, который определяется отноше-



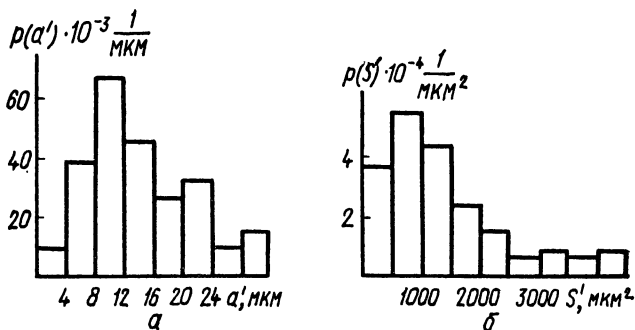
32. Зависимость коэффициентов вариаций значений площади сечения стружки (1) и заглубления зерна (3), удельного числа активных зерен (2), средней площади сечения стружки (4), среднего заглубления зерна (5) от приведенной толщины среза a'_z и подачи на один оборот инструмента h_0 .

нием площади аппроксимирующей фигуры к площади прямоугольника, равной произведению заглубления зерна на ширину стружки. В качестве фигур, приближенно характеризующих форму сечения стружек, приняты представленные на рис. 32 многоугольники (внутри фигур указаны их коэффициенты формы).

Как видно из рис. 32, число активных зерен возрастает пропорционально увеличению подачи на оборот круга h_0 и приведенной толщины среза a'_z , которая рассчитывается при $\Delta l = 1$ см. В то же время средние величины заглубления зерен и площади сечения стружек не зависят от приведенной толщины среза. Это подтверждается примерно одинаковым характером профилограмм, полученных на профилографе модели 201 при движении шупа прибора по поверхности образцов в направлении, перпендикулярном царапинам. Показательно, что высота неровностей на поверхности образцов и средние значения заглубления

зерен — величины одного порядка, хотя микрорельеф не может быть принят в качестве основы при расчете параметров сечения стружек вследствие взаимного перекрытия срезов при работе алмазных зерен.

Результаты экспериментов согласуются с данными исследования [66], в котором показано, что при изменении



33 Гистограммы распределения заглублений зерен (а) и площадей сечений стружек (б).

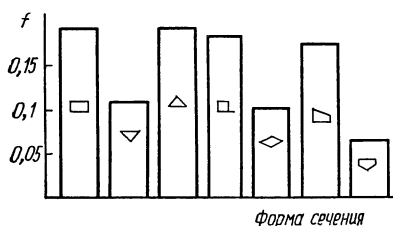
a_z в диапазоне от 0,7 до 4 мкм энергоемкость разрушения и шероховатость обработанной поверхности остаются постоянными. Характерно также, что при применении круга из алмазов зернистостью 315/250 шероховатость обработанной поверхности R_z 20, что весьма близко к средней величине заглубления зерен. Кроме того, приведенные зависимости хорошо согласуются с расчетными зависимостями и подтверждают основные положения аналитических разработок.

Заглубление зерен и площадь сечения стружки являются случайными величинами, которые определяются прежде всего расположением зерен в объеме алмазосодержащего слоя и на его рабочей поверхности. Эти величины изменяются в широких пределах, а коэффициенты вариации их, несмотря на относительно большие значения, весьма стабильны (рис. 32).

Из гистограмм (рис. 33) видно, что заглубление зерен достигает 32 мкм, а площади сечения стружки — 4500 мкм². Это, по-видимому, оказывает существенное влияние на образование крупных частиц разрушенного материала, размеры которых могут превышать величину зазора между

связкой и забоем. При движении по связке такие частицы будут вызывать ее интенсивный износ.

Статистическая обработка полученных данных показала, что между заглублением зерен и шириной царапины отсутствует корреляционная связь. В то же время корреляционная зависимость существует между заглублением



34. Частота появления стружек с различной формой сечения

зерен и площадь сечения стружки. Уравнение линейной регрессии имеет вид $S' = 36 + 92,4a'$.

Частота появления стружек с различной формой сечения представлена на рис. 34. Установлено, что для 60—70% алмазных зерен сечение стружки располагается несимметрично

относительно их вертикальной оси. Это создает дополнительный момент, вырывающий зерна из связки.

Проверочный расчет показывает, что суммарная площадь сечений стружек, срезаемых активными алмазными зернами, находящимися на элементе рабочей поверхности f , составляет 75—80% площади поперечного сечения, разрушаемой этим элементом и равной $a_3 B$ (B — ширина круга).

Предложенный метод отличается простотой и достаточной точностью статистической оценки заглубления алмазных зерен, площади и формы сечения срезаемых ими стружек, числа активных зерен применительно к реальному кругу с конкретным состоянием рабочей поверхности. Полученные данные могут быть положены в основу вывода уточненных расчетных зависимостей, описывающих процесс алмазной обработки.

Суммарный путь трения находится на основании известных соотношений

$$\Sigma l_{\text{тр}} = l_{\text{к}} n_{\text{ос}} \frac{L_p}{V_n} = \frac{30V_o L_p \varphi h}{\pi V_{\text{II}}}, \quad (\text{II.51})$$

где L_p — длина пропила при заданной глубине однопроходного резания.

Таким образом, в результате теоретических разработок получены аналитические выражения для толщины среза, снимаемого одним зерном, необходимые для оценки работоспособности рабочего процесса и расчета силовых параметров резания.

3. Силовые зависимости при резании алмазным инструментом

Работоспособность и эксплуатационная прочность конструктивных элементов алмазно-абразивного инструмента в значительной степени зависят от силовых показателей процесса разрушения.

Большое разнообразие физико-механических свойств природного камня и различие технологических требований к условиям современного производства предопределили необходимость разработки универсальных расчетных зависимостей для определения сил резания, которые позволили бы использовать их для проектирования и создания основных рабочих узлов и элементов как машины, так и исполнительных органов. Арсенал современных решений такой задачи, базирующийся на результатах исследований по определению толщины среза, снимаемого одним зерном, и удельных сил резания, получаемых преимущественно экспериментальным путем, не удовлетворяет в полной мере указанным условиям в силу ряда причин.

Предпринята попытка разработать средства аналитического определения сил резания в зависимости от основных характеристик рабочей поверхности инструмента, режимов резания и физико-механических свойств природного камня [47].

Рассматривая процесс резания алмазно-абразивным инструментом, следует учитывать две взаимосвязанные и одновременно протекающие фазы: внедрение зерен в обрабатываемый материал (от продольной подачи) и непосредственно резание (царапание).

Процесс внедрения зерен будет характеризоваться сопротивляемостью породы разрушению, которая может оцениваться ее твердостью.

Тогда нормальная составляющая силы резания будет зависеть от показателя твердости породы H , контактной поверхности зерна S_3 и выразится как

$$j_N = HS_3. \quad (\text{II.52})$$

Для нахождения величины S_3 исходим из следующих предпосылок.

1. Форму зерен алмазных порошков с небольшими погрешностями принимаем шаровой.

2. Рабочие зерна, как установлено ранее, вследствие абразивного изнашивания имеют площадку износа Δ .

Поскольку в процессе резания с породой контактирует половина боковой поверхности до уровня заглупления, величину S_3 можно определить по формуле (рис. 35)

$$S_3 = \frac{1}{2} \pi \left(2ra' + c^2 + \frac{\Delta^2}{4} \right) + \frac{\pi \Delta^2}{4}. \quad (\text{II.53})$$

Здесь r — радиус зерна; c — размер зерна на уровне заглупления:

$$c^2 = (a' + h_1)(2r - a' - h_1),$$

где

$$h_1 = r - \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}};$$

$$c^2 = 2a' \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} - a'^2 + \frac{\Delta^2}{4}. \quad (\text{II.54})$$

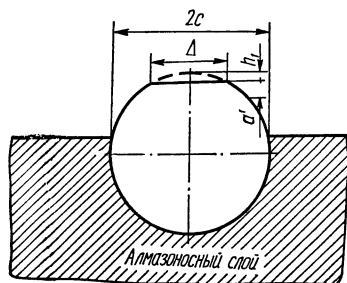
После преобразования получаем

$$S_3 = \pi \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right]. \quad (\text{II.55})$$

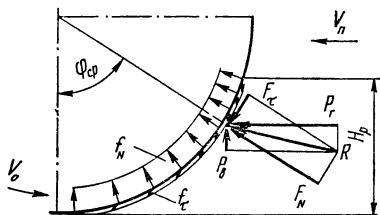
Подставляя выражение (II.55) в формулу (II.52), получаем общее выражение для определения нормальной составляющей силы резания одним зерном:

$$f_N = \frac{\pi H}{K_n} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right], \quad (\text{II.56})$$

где K_n — коэффициент, учитывающий перекрытие срезов и уменьшение сопротивления внедрению зерна вследствие нарушения структуры контактной поверхности породы; определяется экспериментально.



35. Схема к определению поверхности контакта зерна с обрабатываемым материалом.



36. Схема силовых параметров процесса резания алмазной дисковой пилой.

Тангенциальная составляющая силы резания одним зерном f_{τ} определяется исходя из постоянства соотношения $\frac{f_N}{f_{\tau}} = m = \text{const}$:

$$f_{\tau} = \frac{\pi H}{K_n m} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right]. \quad (\text{II.57})$$

Учитывая, что толщина среза, снимаемого одним зерном, не изменяется в пределах дуги контакта, работа резания зерна

$$A' = f_{\tau} l_k = \frac{\pi H}{10^3 K_n m} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right] R \varphi_h. \quad (\text{II.58})$$

Работа за один оборот пилы

$$A_{\text{об}} = A' N_p' i, \quad (\text{II.59})$$

где N_p' — число рабочих зерен в одной линии резания в пиле,

$$N_p' = \frac{1,65 n_1 K d l_{cz} [1 + \Phi(t_1)]}{2 \cdot 10^5}; \quad (\text{II.60})$$

i — число линий резания в пиле,

$$i = S/d. \quad (\text{II.61})$$

Тогда

$$A_{\text{об}} = \frac{1,65 n_1 K d l_{cz} \pi H R S \varphi_h}{2 \cdot 10^8 m K_n} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right] [1 + \Phi(t_1)]. \quad (\text{II.62})$$

Средняя мощность, потребляемая на резание,

$$N_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{об}} n}{60 \cdot 102} = \frac{1,65 n_1 K d l_{cz} H S \varphi_h V_o}{2 \cdot 10^8 m 102 K_n} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right] \left[\frac{1 + \Phi(t_1)}{2} \right]. \quad (\text{II.63})$$

Схема силовых параметров процесса резания приведена на рис. 36.

Среднее значение касательной составляющей силы резания алмазной пилой

$$F_{\tau} = \frac{A_{\text{об}}}{\pi D} = \frac{1,65 n_1 K d l_{cz} H S \varphi_h}{2 \cdot 10^8 m K_n} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 + \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right] \left[\frac{1 + \Phi(t_1)}{2} \right]. \quad (\text{II.64})$$

На основании указанного выше соотношения значение нормальной составляющей силы резания алмазной пилой определяется

$$F_N = F_\tau m. \quad (\text{II.65})$$

Точка приложения результирующей силы, как известно, находится там, где срезаемый пилой слой имеет среднюю толщину $a_{\text{ср}}$.

Найдем значение угла $\varphi_{\text{ср}}$, определяющего точку приложения средних результирующих составляющих силы резания алмазной пилой. Согласно известному соотношению

$$a_{\text{ср}} = V_\varphi \sin \varphi_{\text{ср}} \quad (\text{II.66})$$

поступательное перемещение изделия во время поворота пилы на угол φ_h можно записать в виде

$$V_{\varphi_h} = \frac{V_h R \varphi_h}{60 V_o}. \quad (\text{II.67})$$

С другой стороны, средняя толщина среза, снимаемого пилой, равна выражению (II.46). Тогда, приравнявая выражение (II.46) к уравнению (II.66), находим

$$\varphi_{\text{ср}} = \arcsin \frac{H_p}{R \varphi_h}. \quad (\text{II.68})$$

Расчетные зависимости для определения горизонтальной (усилия подачи) P_r и вертикальной P_v составляющих силы резания будут иметь вид

$$P_r = F_\tau \cos \varphi_{\text{ср}} \mp F_N \sin \varphi_{\text{ср}}; \quad (\text{II.69})$$

$$P_v = F_\tau \sin \varphi_{\text{ср}} \mp F_N \cos \varphi_{\text{ср}}, \quad (\text{II.70})$$

где —, + — соответственно для схемы резания «по подаче» и «против подачи».

Таким образом, для практического использования имеющихся расчетных зависимостей необходимо выбрать критерий оценки физико-механических свойств разрушаемой породы, в качестве которого нами была взята твердость.

Существует много методов определения твердости, которая подразделяется на две основные группы: агрегатная (размер индентора намного превосходит размер минеральных зерен) и твердость порообразующих минералов. Е. Ф. Эпштейн [109] предлагает в качестве критерия твердости использовать величину критического напряжения при вдавливании резца в породу, однако данный метод

приемлем для пород с высокой пластичностью. Л. А. Шрейнер рекомендует метод определения агрегатной твердости при вдавливании цилиндрического штампа, который позволяет по графику деформаций оценить пластические свойства и ее хрупкость. Вместе с тем этот критерий приемлем лишь для тех процессов, когда при разрушении воз-

Т а б л и ц а 14

Микротвердость пироксена в зависимости от нагрузки на индентор

Показатель	Нагрузка, г						
	10	15	20	30	40	50	70
Число делений	13	16	19	23	26	30	35
Размер диагонали отпечатка, мкм	3,96	4,88	5,80	7,01	7,93	9,15	10,67
Микротвердость	1180	1160	1110	1130	1180	1100	1150

никает непрерывная напряженная зона, захватывающая большое число зерен. Известно много других механических характеристик пород: предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, коэффициент крепости по шкале М. М. Протождяконова, твердость по Шору и другие, которые опять-таки характерны для резцового инструмента с большими площадями контакта.

Для процессов микрорезания алмазно-абразивным инструментом, при которых напряженная зона имеет дискретный характер, решающее значение будут иметь механические свойства породообразующих минералов. Как правило, для дисковых пил микрорезание происходит с глубиной внедрения алмазных зерен не выше 10—15 мкм. При этом характер одного из этапов разрушения — внедрения алмазного зерна — во многом аналогичен методу определения микротвердости.

Следовательно, исходя из подобия сущности этих процессов, в качестве критерия сопротивляемости породы разрушению, за который ранее принималась твердость, можно выбрать микротвердость H . Однако для различных режимов резания, влияющих на толщину среза, снимаемого одним зерном, необходимо установить, как влияет величина нагрузки, определяющая глубину внедрения алмазного индентора, на показатель микротвердости H .

В процессе экспериментов, выполненных на твердомере ПМТ-3, установлено, что микротвердость пироксена в диапазоне нагрузок 10—70 г (для максимальных нагрузок глубина внедрения составляет 2,0—4,0 мкм) практически не изменяется (табл. 14).

Таблица 15

Агрегатная микротвердость некоторых разновидностей природного камня

Материал	Минерал	Содержание минералов в породе, %	Преобладающий размер зерен в поперечнике, мм	H	H_a
Мрамор Коелгинского месторождения (Урал)	Кальцит	100	—	163	163
Лабрадорит Головинского месторождения (УССР)	Полевой шпат (плагиоклаз № 48—50, андезито-лабрадорит и лабрадор)	65	1—5	835	870
	Пироксен моноклинный	29	2—5	1070	
	Рудный минерал	5	0,5—3	—	
	Биотит	1	0,2—1	—	
Гранит Жежелевского месторождения (ЧССР)	Плагиоклаз кислый	40	2—5	835	820
	Шпат калиевый полевой	10	3—10	835	
	Кварц	28	4—6	1170	
	Биотит	19	—	—	
	Гранат	2,5	3	2000	
	Рудный минерал	0,5	—	—	

Для применения расчетных зависимостей по некоторым разновидностям природного камня проведены минералогические и петрографические исследования, а также установлены показатели агрегатной микротвердости H_a , учитывающие свойства минеральных составляющих:

$$H_a = \frac{\sum H n_i}{\sum n_i} . \quad (11.71)$$

Здесь n_i — содержание минералов в породе, H — микротвердость составляющих породу минералов, определяет

ся как среднее арифметическое результатов 10—15 измерений:

$$H = \frac{1854P}{c_3^2}, \quad (\text{II.72})$$

где P — осевая нагрузка на пирамиду; c_3 — диагональ отпечатка.

Результаты исследований приведены в табл. 15.

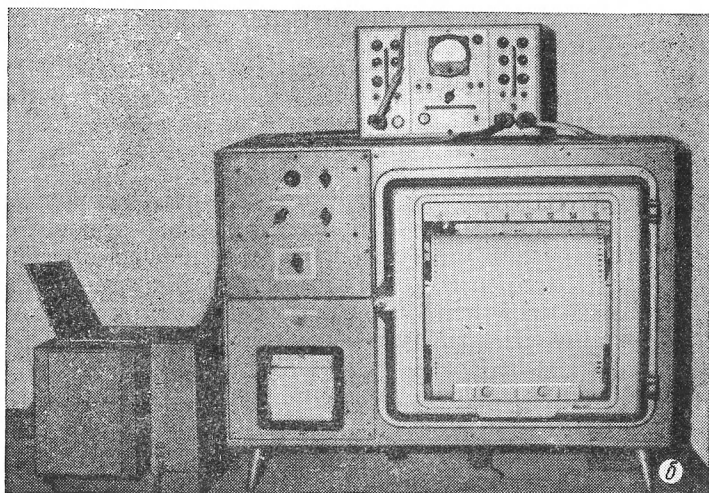
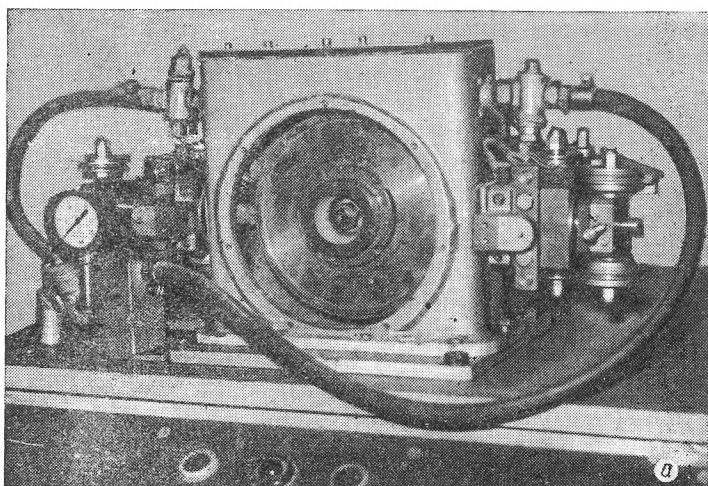
При использовании выбранного критерия оценки физико-механических свойств породы выведенные расчетные зависимости силовых параметров процесса резания дают расхождение с экспериментальными данными 20—30%.

Таким образом, в результате проведенных исследований выведены аналитические выражения для определения силовых параметров процессов резания, учитывающие режимы работы инструмента, характеристику его алмазного слоя и физико-механические свойства породы. Эти выражения могут быть использованы при расчете конструктивных параметров инструмента и проектировании камнерезного оборудования.

4. Исследование составляющих силы резания

Выявление характера зависимости отношения нормальной и тангенциальной составляющих силы резания при различных режимах работы является одной из практических задач, решение которой необходимо для установления силовой картины процесса разрушения камня алмазным инструментом. По данному вопросу имеется сравнительно мало работ, выполненных преимущественно на основе метода царапания единичным зерном или в процессе резания инструментом, импрегнированным природными алмазами. Кроме того, при проведении экспериментов по изучению этого соотношения для импрегнированного алмазного инструмента не учитывалось влияние на него окружной скорости и производительности, а процесс царапания единичным зерном исследовался, как правило, при небольших скоростях резания (до 1—5 м/с), что, безусловно, не может характеризовать реальные условия работы алмазных дисковых пил, для которых V_0 не менее 20 м/с.

Характер изменения отношения нормальной и тангенциальной составляющих силы резания алмазными кругами

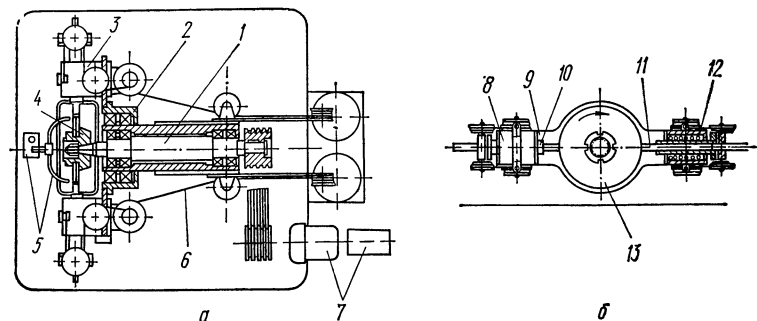


37. Общий вид САОК (а) с комплектом электронизмерительной аппаратуры (б).

в зависимости от режимных параметров экспериментально изучался на специально созданном стенде алмазной обрабатываемости камня (САОК) (рис. 37).

Устройство и принцип действия САОК заключается

в следующем (рис. 38, а). На корпусе шпинделя 1, получающего вращение от электродвигателя постоянного тока с бесступенчатым регулированием числа оборотов, свободно устанавливается планшайба 2 с двумя головками 3, в которых крепятся образцы. На выходной конец шпинделя насаживается оправка 4 для одновременного крепления

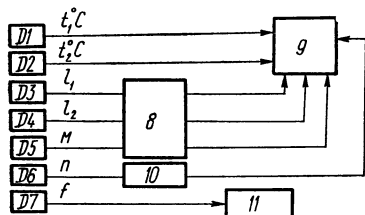


38. Принципиальная схема САОК (а) и планшайбы (б).

двух алмазных кругов типа АПП $200 \times 10 \times 75$. В корпус рабочей камеры, закрываемой герметически плексигласовыми листами с уплотнениями, вмонтировано устройство вилчатого типа для подачи охлаждающей жидкости 5. Стенд оснащен пульпоприемными баками с фильтрующими отсеками; подача жидкости осуществляется от электропомпы ПА-22 с производительностью 22,4 л/мин. Схема охлаждения предусматривает оборотность циклов. Образец к инструменту прижимается от грузового устройства 6 через систему блоков с передаточным числом 5. В нижнем отсеке стенда наряду с гидронасосом размещен привод вращения 7.

На корпусе шпинделя свободно закреплена планшайба (рис. 38, б), которая служит для передачи крутящего момента, создаваемого приводом в процессе резания. На планшайбе 9 закреплены две головки 8, в которых на шариковых направляющих 12 перемещаются сменные гильзы 10 с образцами породы 11. Эти гильзы подаются на алмазные круги 13 автономной грузовой подачей для каждого образца с сечением 10×10 , 15×15 ; 20×20 , 10×20 мм. Головки на планшайбе расположены диаметрально противоположно относительно алмазных кругов. Диапазон регулирования прижатия образцов 0—35 кгс.

Величина износа образца фиксируется по лимбу, расположенному на гильзе планшайбы. Силы резания, количество снятого материала породы, скорость резания фиксируются измерительным комплексом, блок-схема которого приведена на рис. 39. Экспериментальные исследования вы-



39. Блок-схема САОК:

D1, D2 — термопары; *D3—D5* — тензостомы; *D6* — тахогенератор ТМГ-30; *D7* — вибродатчик ВИГ-43; *8* — тензоусилитель; *9* — электронный потенциометр ЭПП-09М2; *10* — делитель напряжений; *11* — осциллограф Н105.

полнены на кругах АПП 200 × 10 × 3 × 75, зернистость АСК 315/250, концентрацией 50% на связке М1 при обработке гранита Жежелевского месторождения, лабрадорита Головинского месторождения и мрамора Коелгинского месторождения. Рабочий процесс сопровождался обильным охлаждением зоны резания водой в количестве 10 л/мин. Перед экспериментом проводилось

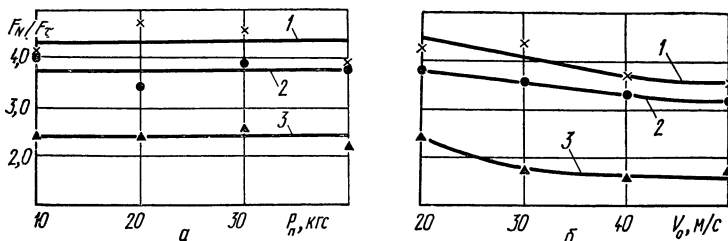
вскрытие алмазных кругов, их приработка на исследуемом материале до момента стабилизации мощности резания. Контроль состояния рабочей поверхности кругов производился по мощности резания эталонного образца из коелгинского мрамора, отличающегося относительной стабильностью свойств. Эксперименты выполнены в достаточно широком диапазоне окружных скоростей (20—50 м/с) и нагрузок (5—35 кгс). Тангенциальная составляющая силы резания F_{τ} фиксировалась на шлейфовом осциллографе, и с помощью тарировочного графика устанавливалась ее абсолютная величина.

Проведенными исследованиями установлен ряд важных положений. Прежде всего для изучаемых материалов в пределах одной окружной скорости изменение усилия прижатия, а следовательно, и производительности процесса разрушения практически не сказываются на величине

$m = \frac{F_N}{F_{\tau}}$ (рис. 40, а). Увеличение окружной скорости в

диапазоне 20—50 м/с вызывает незначительное уменьшение величины m (рис. 40, б). Из той же графической зависимости, построенной по средним арифметическим значениям m для каждой окружной скорости, следует, что с повышением прочностных характеристик природного кам-

ня величина m растет. Для прочных разновидностей природного камня интенсивность роста m больше соответствует изменению агрегатной микротвердости, чем, например, контактной прочности. Полученный вывод подтверждает правильность выбора в качестве критерия оценки сопротивляемости породы разрушению показателя микротвердости.



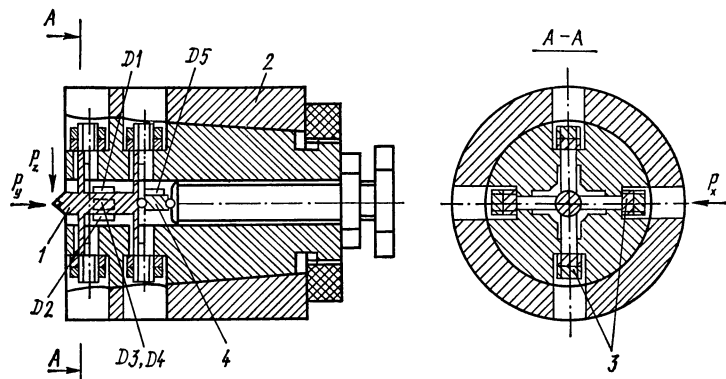
40. Зависимость отношения F_N/F_T от силы подачи P_n (а) и окружной скорости резания V_0 (б):
1 — лабрадорит, 2 — гранит; 3 — мрамор

С точки зрения качественной оценки распределения компонентов, формирующих энергетику разрушения, а также для решения других прикладных задач представляет интерес изучение резания-царапания зернами алмазных порошков, используемых в инструментах, в динамическом режиме.

Исследования по динамическому резанию-царапанию проводились на специальном стенде, созданном на базе токарно-винторезного станка, оснащенного дополнительно высокоточным шпинделем и устройством микроподачи инструмента. Кольцеобразный образец обрабатываемого материала с наружным и внутренним диаметрами соответственно 200 и 160 мм устанавливался в оправке. Царапание зерном проводилось по его торцовой поверхности, предварительно шлифованной алмазными инструментами для устранения биений. Зерна алмазов, произвольно взятые из порошка и спеченные в элементе из связки по обычной для изготовления инструмента технологии, закреплялись в трехкомпонентном динамометре¹, схема которого показана на рис. 41. Центральный стержень 1, к одному концу которого припаян элемент с алмазным

¹ Конструкция динамометра разработана Д. М. Мифлигом.

зерном, устанавливается в корпусе динамометра 2 на двух системах взаимно перпендикулярных растяжек 3, расположенных в двух плоскостях, перпендикулярных оси стержня. Второй конец стержня посредством шарового шарнира упирается в чувствительный элемент 4, работающий на сжатие. Вся конструкция предварительно напряжена.



41. Схема трехкомпонентного динамометра для измерения сил резания — царапания единственным алмазным зерном:

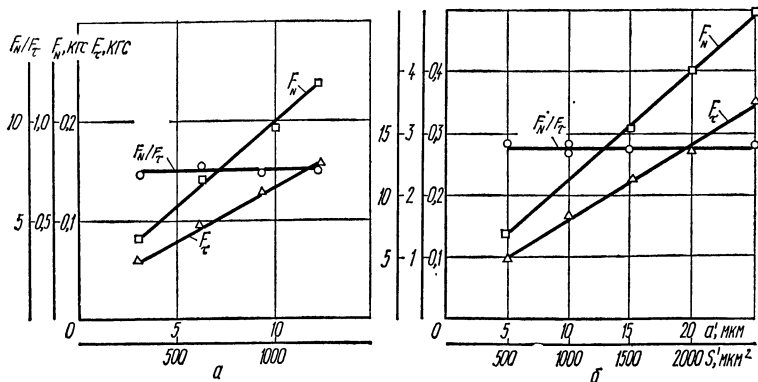
$D1-D5$ — тензометрические датчики.

Чувствительность динамометра обеспечивает измерение составляющих сил в диапазоне 0,05—10 кгс, расчетная собственная частота 20 кГц.

Из графиков, представленных на рис. 42, видно, что силы царапания возрастают пропорционально заглублению зерна и площади сечения среза, причем характер изменения отношения сил F_N и F_τ остается практически постоянным для незатупленных зерен синтетического (рис. 42, а) и природного алмазов с площадкой затупления размером 260 мкм (рис. 42, б). С ростом площадок затупления возрастают абсолютные значения сил царапания.

Как известно, при обработке твердых пород (гранит, кварцит) резание производится затупленными зернами, причем заглубление зерна значительно меньше размера площадок износа. В связи с этим рост поперечного сечения срезанных стружек происходит практически прямо пропорционально заглублению зерна. Указанный вывод следует также из уравнения регрессии $S' = 36 + 96 a'$, полученного при исследовании параметров сечения стружек, срезаемых зернами реального инструмента.

Сопоставляя результаты исследований по определению величины отношения нормальной составляющей силы резания и тангенциальной для импрегнированного алмазного инструмента и для единичных зерен, необходимо отметить, что в абсолютном выражении она меньше для пос-



42. Зависимость отношения $\frac{F_N}{F_\tau}$, нормальной F_N и тангенциальной F_τ составляющих силы царапания от величины заглабления a' и площади поперечного сечения стружки S' для незатупленного зерна синтетического алмаза (а) и затупленного зерна природного алмаза (б).

ледних. Развитие подобных исследований в последующем послужит одним из этапов в решении задачи о роли трения в формировании энергозатрат в сложном процессе взаимодействия режущих элементов, мелкодисперсных продуктов разрушения, связки и обрабатываемого материала.

Таким образом, в результате проведенных исследований выведены аналитические выражения для определения силовых параметров резания алмазными дисковыми пилами, мощности резания и координат точки приложения средних результирующих усилий на инструмент в зависимости от характеристики алмазонасного слоя, режимных и конструктивных параметров и свойств обрабатываемого материала.

Пример расчета сил резания гранита Жезелевского месторождения дисковой сегментной пилой АПС-400, АСС 400/315, МОЗ, 50%

Примем следующие условия и расчетные величины: $D = 400$ мм; $K = 50\%$; $V_o = 21$ м/с; $V_\pi = 500$ мм/мин; $H_p = 30$ мм; $\varphi_h = 0,56$; $\sin \varphi_h = 0,53$; $H_a = 820$ кгс/мм²; $n_{об} = 1000$ об/мин; $m = 3,8$; $s = 3,2$ мм; $K_\pi = 10$; $l_c = 40$ мм; $z_c = 24$ м; $n_1 = 2250$; $d = 0,364$ мм.

Определим расчетные величины и затем произведем расчет: $\Delta = 35,2 + 0,424d = 189,5$ мкм; $\bar{b} = 24 + 0,06d = 45,8$ мкм; $\sigma = 7,4 + 0,028d = 17,6$ мкм;

$$t_1 = \frac{a_{\max} - \bar{b}}{\sigma} = 1,264;$$

$$\Phi(t_1) = 0,7944;$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \arcsin \frac{H_p}{R\varphi_h} = 15^\circ 40' = 0,265.$$

Толщина среза, снимаемого одним зерном,

$$a' = \frac{2 \cdot 6,1 \cdot 10^4 V_n \sin \varphi_{\text{ср}}}{n_{\text{об}} n_1 K d^2 l_{\text{сз}} [1 + \Phi(t_1)]} = 5,5 \text{ мкм};$$

работа пилы за один оборот

$$A_{\text{об}} = \frac{1,65 \pi n_1 K d l_{\text{сз}} H R \sin \varphi_n}{2 \cdot 10^8 m K_n} \left[a' \left(r + \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} \right) + \frac{\Delta^2 - a'^2}{2} \right] [1 + \Phi(t_1)] = 32,14 \text{ кгс} \cdot \text{м}.$$

Средняя мощность, потребляемая на резание,

$$N_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{об}} n_{\text{об}}}{60 \cdot 102} = 5,3 \text{ кВт}.$$

Среднее значение составляющих силы резания алмазной пилой: касательной

$$F_{\tau} = \frac{A_{\text{об}}}{\pi D} = 25,6 \text{ кгс};$$

нормальной

$$F_N = F_{\tau} m = 97,3 \text{ кгс};$$

усилие подачи при схемах резания «против подачи»

$$P_r = F_{\tau} \cos \varphi_{\text{ср}} + F_N \sin \varphi_{\text{ср}} = 50,9 \text{ кгс}$$

и «по подаче»

$P_r = F_{\tau} \cos \varphi_{\text{ср}} - F_N \sin \varphi_{\text{ср}} = -1,6$ кгс (пила затягивает изделие);
вертикальная составляющая силы резания при схемах резания «против подачи»

$$P_b = F_{\tau} \sin \varphi_{\text{ср}} + F_N \cos \varphi_{\text{ср}} = 100,6 \text{ кгс}$$

и «по подаче»

$$P_b = F_{\tau} \sin \varphi_{\text{ср}} - F_N \cos \varphi_{\text{ср}} = -86,8 \text{ кгс}.$$

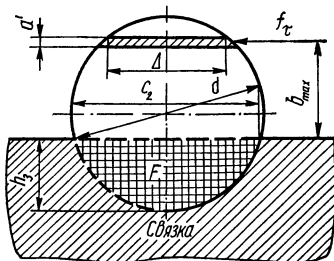
5. Износ алмазосного слоя инструмента

Для изучения износа алмазосного слоя дисковых камнерезных пил возникает необходимость в разработке критериев его оценки.

Как указывалось выше, при резании горных пород процесс износа алмазосного слоя состоит из нескольких взаимосвязанных и одновременно протекающих фаз: абразивного износа, механического удаления (вырывания) зерен и абразивного истирания связки. Анализ состояния рабочей поверхности инструмента показал, что при износе алмазных зерен возможны также микроразрушения и выкрашивание режущих кромок. Вырывание зерен из связки происходит в результате воздействия на них тангенциальных составляющих силы резания, а абразивное истирание связки — вследствие воздействия на нее мелкодисперсных продуктов разрушения.

Интенсивность обновления рабочей поверхности инструмента в первую очередь зависит от прочности удержания зерен связкой и стойкости ее к абразивному износу. В определенный период времени наступают такие условия, когда изгибающий момент от действия тангенциальной составляющей силы резания превышает прочность удержания зерен связкой. В свою очередь прочность удержания зерна в связке в основном будет определяться их свойствами, размерами контактной поверхности и величиной изгибающего момента на рабочем зерне.

Для сравнительной оценки прочности и долговечности удержания зерна связкой вводится относительный коэффициент напряжений K_{σ} , характеризующий напряженное состояние зерна в месте его контакта со связкой (рис. 43) [46]:



43. Схема к расчету относительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой

$$K_{\sigma} = \frac{K_H}{K_{\sigma}}, \quad (\text{II.73})$$

где K_n и K_c — соответственно коэффициент изменения изгибающих моментов на зерне и коэффициент изменения поверхности сцепления зерна со связкой при изучении различных вариантов характеристики алмазосносного слоя и технологических режимов резания:

$$K_n = \frac{M_i}{M_o}; \quad (II.74)$$

$$K_c = \frac{F_i}{F_o}. \quad (II.75)$$

В формулах (II.74), (II.75) M_o , F_o — соответственно изгибающий момент, действующий на рабочие зерна, принятые за начальные в системе сравниваемых вариантов характеристики алмазосносного слоя и технологических режимов резания и поверхность сцепления этих зерен со связкой; M_i , F_i — соответственно изгибающий момент, действующий на рабочие зерна, сравниваемых вариантов характеристики алмазосносного слоя и технологических режимов резания, и поверхность сцепления этих зерен со связкой

Согласно приведенной на рис. 43 схеме легко находятся выражения для определения изгибающего момента на зерне M и поверхности сцепления зерна со связкой F :

$$M = f_t b_{\max}; \quad (II.76)$$

$$F = \pi \left(h_3^2 + \frac{c_2^2}{2} \right) = \frac{7}{16} \pi d^2. \quad (II.77)$$

В окончательном виде формула для нахождения относительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой может быть представлена в виде

$$K_\sigma = \frac{M_i F_o}{M_o F_i}. \quad (II.78)$$

О степени воздействия мелкодисперсных продуктов разрушения на связку, которая в конечном итоге влияет на интенсивность ее изнашивания, можно судить по величине давления этих продуктов на рабочую поверхность инструмента. Однако в силу сложности установления реальной величины давления можно лишь приблизительно оценить этот параметр величиной отношения объема разрушенного материала к свободному объему межзеренного пространства, которое назовем коэффициентом уплот-

нения K_y . Поскольку принятое соотношение по своему содержанию может быть справедливым только для сплошного алмазосносного слоя, в нашем случае возможно соотношение этих объемов в пределах дуги контакта рабочей поверхности инструмента с изделием:

$$K_y = \frac{V_k}{V_m}, \quad (\text{II.79})$$

где V_k — объем разрушенного материала в пределах дуги контакта инструмента с изделием; V_m — объем межзеренного пространства алмазосносного слоя пилы, находящегося в пределах дуги контакта.

Объем разрушенного материала в пределах дуги контакта будет зависеть от относительного перемещения пилы и изделия во время поворота пилы на угол контакта V_{φ_h} , глубины резания, толщины алмазосносного слоя пилы s и коэффициента разрыхления материала K_p :

$$V_k = V_{\varphi_h} H_p s K_p = \frac{V_n H_p s R_{\varphi_h} K_p}{60 V_o}. \quad (\text{II.80})$$

Объем межзеренного пространства V_m определяется величиной пространства между забоем породы и связкой V'_o за вычетом объемов выступающих зерен V_s и превышений связки с тыльной стороны зерен $V_{\text{пр}}$:

$$V_m = V'_o - V_s - V_{\text{пр}}; \quad (\text{II.81})$$

$$V'_o = s l_a b_{\text{max}}, \quad (\text{II.82})$$

где b_{max} — максимальный вылет зерен; l_a — длина алмазосносного слоя, находящегося в пределах дуги контакта,

$$l_a = \frac{l_c z \varphi_h}{2\pi}. \quad (\text{II.83})$$

Тогда

$$V'_o = \frac{l_c z \varphi_h s b_{\text{max}}}{2\pi}. \quad (\text{II.84})$$

Расчет объема выступающих зерен в пределах дуги контакта целесообразно производить применительно к средневзвешенному вылету зерен \bar{b} :

$$V_s = V_{s,\text{ср}} N'_k, \quad (\text{II.85})$$

где $V_{s,\text{ср}}$ — объем зерна со средневзвешенным вылетом,

$$V_{s,\text{ср}} = \frac{1}{6} \pi \bar{b} \left(\frac{3}{2} \Delta^2 + 6\bar{b} \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4}} - 2\bar{b}^2 \right); \quad (\text{II.86})$$

N'_k — число зерен на рабочей поверхности алмазонасного слоя, находящегося в контакте с обрабатываемым материалом,

$$N'_k = \frac{4,39n_1K}{10^5} (0,75dsl_a - V_v). \quad (\text{II.87})$$

Как установлено ранее, объем превышений связки над нулевым уровнем составляет около одной сотой части рабочего объема алмазонасного слоя:

$$V_{np} = 0,01 \cdot 0,75dsl_a. \quad (\text{II.88})$$

Тогда

$$N'_k = \frac{3,25n_1Ksl_c dz \varphi h}{2\pi 10^5}. \quad (\text{II.89})$$

Подставляя выражения (II.86), (II.89) в формулу (II.85), получаем

$$V_3 = \frac{3,25n_1Ksl_c dz \varphi h \bar{b} \left(\frac{3}{2} \Delta^2 + 6\bar{b} \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4} - 2\bar{b}^2} \right)}{12 \cdot 10^5}. \quad (\text{II.90})$$

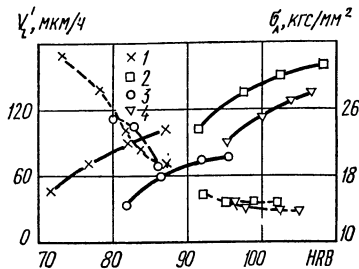
Используя выражения (II.84), (II.88), (II.90), получаем

$$V_m = \frac{Szl_c \varphi h}{2\pi} \left[b_{\max} - \frac{3,25\pi n_1 d K \bar{b} \left(\frac{3}{2} \Delta^2 + 6\bar{b} \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4} - 2\bar{b}^2} \right)}{6 \cdot 10^5} - 0,0075d \right]. \quad (\text{II.91})$$

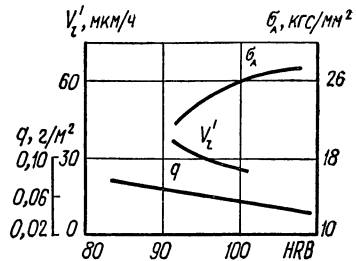
С учетом выведенных зависимостей (II.80), (II.91) формула для определения коэффициента уплотнения будет иметь вид

$$K_y = \frac{2\pi R V_{np} H_p K_p}{60 \cdot 10^3 V_o z l_c \times} \times \left[b_{\max} - \frac{3,25\pi n_1 d K \bar{b} \left(\frac{3}{2} \Delta^2 + 6\bar{b} \sqrt{r^2 - \frac{\Delta^2}{4} - 2\bar{b}^2} \right)}{6 \cdot 10^5} - 0,0075d \right] \quad (\text{II.92})$$

На износостойкость алмазно-абразивного инструмента существенно влияют абразивная износостойкость и алмазоудержание связки. Для оценки влияния этих показателей использовалась комплексная методика, которая предусматривала изучение резки гранита Жежелевского месторождения алмазными сегментными пилами диаметром



44 Зависимость прочности алмазоудержания σ_A (сплошные кривые) и скорости износа связок V'_1 (штриховая кривая) от их твердости: 1 — М3; 2 — МОЗ; 3 — М1; 4 — МЖ



45. Влияние твердости связки МОЗ на скорость ее износа V'_1 , прочность алмазоудержания σ_A и удельный расход алмазов q .

320 мм, определение прочности удержания алмазных зерен в связке, а также моделирование процесса истирания связки в условиях динамического абразивного воздействия шлама [51]. Пилы оснащались алмазами одной партии (АСС 400/315, 50%) с прочностью при одноосном сжатии 7,8 кгс, а испытания проводились при постоянных режимах резки (окружная скорость резки 20 м/с; продольная подача 630 мм/мин; глубина реза 30 мм).

Для установления степени влияния абразивной износостойкости связки на износостойкость инструмента воспользуемся зависимостью прочности алмазоудержания σ_A и скорости износа V'_1 связок от их твердости (рис. 44). Критерием оценки в этом случае может служить показатель

$$K_n = \frac{\delta_q}{\delta V'} , \quad (II.93)$$

где K_n — коэффициент, характеризующий степень влияния износостойкости связки на удельный расход алмазов; δ_q — относительное изменение удельного расхода алмазов; $\delta V'$ — относительное изменение скорости износа связки.

В формуле (II.93) показатель $K'_и$ указывает, в какой мере изменение удельного расхода алмазов соответствует изменению износостойкости связки при одинаковой прочности алмазоудержания. Например, при $\sigma_A = 24,8$ кгс относительное изменение скорости износа для связок МЖ и МОЗ (98 HRB) составляет 0,24. Характеризуя работо-

Т а б л и ц а 16
Результаты испытаний алмазных дисковых пил

Связка	Твердость	Суммарная площадь резания, м ²	Линейный износ алмазного слоя, мкм	Удельная стойкость инструмента, м ² /мм	Удельный расход алмазов, г/м ²	Скорость износа, мкм/ч		Прочность алмазоудержания, кгс/мм ²
						при работе инструмента	при моделировании истирания связки	
М1	90	1,92	275	7,0	0,15	163	45	18,2
М3	84	2,10	171	12,3	0,08	93	69	20,1
МЖ	103	2,08	126	16,5	0,06	69	24	24,3
МОЗ	98	2,17	139	15,6	0,07	73	30	25,6
МОЗ	103	2,26	120	18,8	0,06	60	23	26,4

способность инструмента показателем удельного расхода алмазов по данным табл. 16, получаем, что у сегментных пил на связке МЖ, обладающих более высокой износостойкостью, величина q всего в 1,05 раза меньше, чем у инструмента на связке МОЗ. Следовательно, $K'_и = 0,85$, а $\delta_q = 0,85 \sigma_A V'_и$.

Аналогично установим степень влияния прочности алмазоудержания на удельный расход алмазов. Материал связок МОЗ и МЖ (103 HRB) имеет примерно одинаковую износостойкость в условиях их абразивного износа продуктами резания. Степень влияния σ_A определяется показателем

$$K_a = \frac{\delta_q}{\delta\sigma_A}, \quad (\text{II.94})$$

где $\delta\sigma_A$ — относительное изменение прочности алмазоудержания. В данном случае оно составит 0,09. Опыты показали, что удельный расход алмазов при применении инструмента на связке МОЗ в 1,13 раза меньше, чем при резке

такими же пилами на связке МЖ. Следовательно, относительное изменение удельного расхода примерно соответствует относительному изменению алмазоудержания, т. е. $\delta_q = 1,04\delta\sigma_A$

Для более детального анализа степени влияния износостойкости и прочности алмазоудержания связки на работоспособность инструмента рассмотрим зависимость комплекса указанных показателей от твердости связки, например МОЗ (рис. 45).

Зависимости, приведенные на рис. 45, могут быть описаны уравнениями

$$H_1 = 0,4\sigma_A^2 - 16,7\sigma_A + 265; \quad (II.95)$$

$$V'_i = 78,30 - 0,46H_1; \quad (II.96)$$

$$q = 0,9225 - 0,0065H_1. \quad (II.97)$$

Вычисление выборочного коэффициента корреляций r_o дало следующие результаты: $r_o\left(\frac{\sigma_A}{q}\right) = 0,984$; $r_o\left(\frac{V'_i}{q}\right) = 0,961$; $r_o\left(\frac{\sigma_A V'_i}{q}\right) = 0,989$.

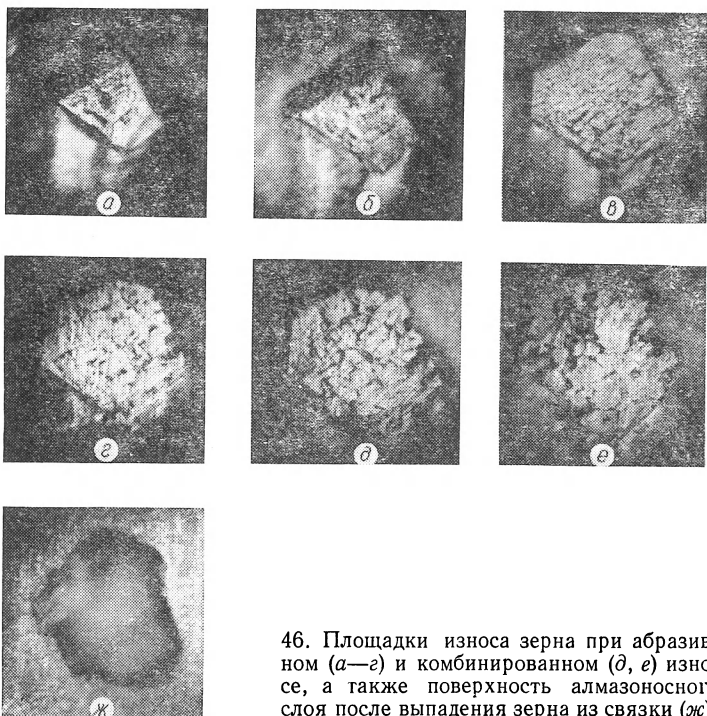
Данные значения свидетельствуют о том, что между удельным расходом алмазов и указанными показателями связки существует корреляционная связь. Это позволяет объединить все три выражения в систему и решить ее относительно q . В результате получаем уравнение

$$q10^2 = 0,445V'_i + 7,44\sigma_A - 0,178\sigma_A^2 - 60,5, \quad (II.98)$$

связывающее удельный расход алмазов при конкретном значении твердости алмазоносного слоя с комплексом показателей связки при той же ее твердости.

Анализ уравнения (II.98) показал, что для связки МОЗ изменение удельного расхода алмазов за счет изменения скорости износа связки и прочности алмазоудержания составляет соответственно 40 и 60%.

Таким образом, работоспособность алмазно-абразивного инструмента при резке гранита может характеризоваться такими показателями связки, как прочность алмазоудержания и скорость абразивного износа. При этом степень влияния прочности алмазоудержания на удельный расход алмазов в 1,5 раза выше, что должно учитываться при разработке новых связок для алмазно-абразивного инструмента.



46. Площадки износа зерна при абразивном (а—г) и комбинированном (д, е) износе, а также поверхность алмазоносного слоя после выпадения зерна из связки (ж).

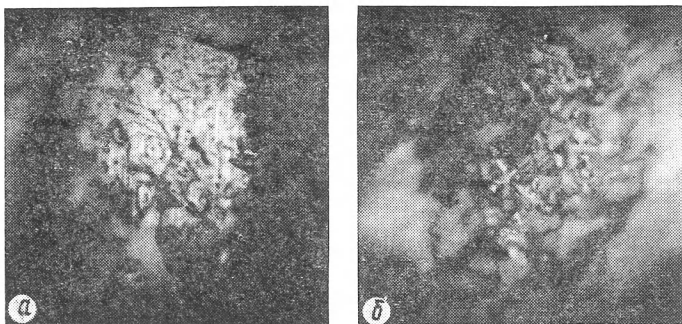
Как отмечалось ранее, основными видами износа алмазных зерен в инструментах различного типа для обработки горных пород являются абразивный износ, хрупкое разрушение — скол и вырывание зерен из связки.

Соотношение видов износа алмазных зерен в совокупности с прочностными и удерживающими свойствами связки, а также режимами работы инструмента значительно влияет на работоспособность, в частности на самозатачивание, инструмента, что особенно важно при обработке твердых пород природного камня.

С целью изучения некоторых аспектов данного вопроса исследовалась обработка гранита Шальского месторождения ($\sigma_{сж} = 2600 \text{ кгс/см}^2$) инструментом для обдирочного шлифования из алмазов АСС 400/315, 50%-ной концентрации на связке МЖ с диаметром рабочего кольца 150 мм [3]. Режимы обработки (давление на рабочей по-

верхности 20 кгс/см^2 , скорость резания $6,3 \text{ м/с}$) обеспечивали самозатачивание инструмента.

Величина износа алмазов и связки определялась по методу искусственных баз на специальной установке. Измерения с точностью до 2 мкм выполнялись в строго фиксированных точках, которые выбирались по фотографии



47 Площадки износа зерна до (а) и после (б) скола.

зерен после каждого опыта. При этом использовались одна точка на площадке износа или вершине зерна и четыре точки на связке (спереди, сзади, слева и справа от зерна на его границе со связкой).

К абразивному износу относится монотонное возрастание площадки затупления зерна при наличии характерных рисок (бороздок) совпадающих с направлением скорости резания (рис. 46, а—г); к сколам — резкое изменение рабочей поверхности зерна, сопровождающееся исчезновением площадки затупления и своеобразным «скалистым» рельефом (рис. 47). Для наиболее полного учета наблюдаемых явлений отдельно выделен комбинированный вид износа, при котором абразивный износ одной части зерна сопровождается сколом другой (см. рис. 46, д, е). Отсутствие каких-либо изменений видимой поверхности зерна и уровня его вершины после проведения опыта указывало на то, что зерно в работе не участвовало. К неактивным зернам относились также зерна со сколом. Подсчет, проведенный на начальной стадии экспериментов, показал, что активными являются около 60% зерен.

При опытах исследовался процесс износа 25 алмазных зерен, расположенных на рабочей поверхности одно за

другим в пределах кольцеобразной зоны, ширина которой в радиальном направлении не превышала 1 мм.

В качестве величины, оценивающей износостойкость зерна, принята интенсивность износа U_i . Она равна отношению износа зерна по высоте h_b к объему материала v , разрушаемому одним зерном в каждом отдельном опыте.

Значение v определим по формуле

$$v = \frac{V}{FvK'_{a.з}}, \quad (\text{II.99})$$

где V — общий объем разрушенного материала; F — площадь рабочей поверхности (в данных экспериментах $6,3 \text{ см}^2$); v — число выступающих зерен на единице рабочей поверхности; $K'_{a.з}$ — коэффициент, учитывающий число активных зерен.

Показатель U_i дает возможность оценить интенсивность износа алмазоносного слоя в целом и рассчитать удельный расход алмазов. Действительно, так как одновременно в работе участвует число зерен $n = FvK'_{a.з}$, то интенсивность износа слоя по высоте

$$U_{i,сл} = \frac{\bar{U}_i}{n}, \quad (\text{II.100})$$

где \bar{U}_i — средняя интенсивность износа алмазных зерен.

Тогда удельный объемный расход алмазов

$$q_i = QK_{a.з}K', \quad (\text{II.101})$$

где $Q = U_{i,сл}F$ — объемная интенсивность износа слоя; K' — масса зерен в единице объема алмазоносного слоя.

Общий удельный объемный расход алмазов можно выразить формулой

$$q = \frac{q_a V_a + q_{кб} V_{кб}}{(V_{кб} + V_a) K''_и}, \quad (\text{II.102})$$

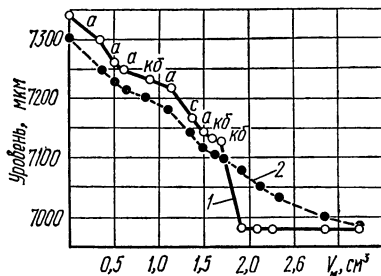
где V_a и $V_{кб}$ — объем материала, разрушаемый зернами соответственно при абразивном и комбинированном износе; $K''_и$ — коэффициент, учитывающий величину абразивного и комбинированного износа по отношению к размеру зерна.

Из рис. 48 видно, что износ зерна до момента его выпадения из связки превышает 200 мкм. В среднем износ алмазов равен 230 мкм. Это составляет 62% их среднего разме-

ра. Следует отметить, что при средней высоте выпавшей части зерна 140 мкм отдельные алмазы изнашиваются до 25—70 мкм. Это свидетельствует о высокой удерживающей способности связи МЖ.

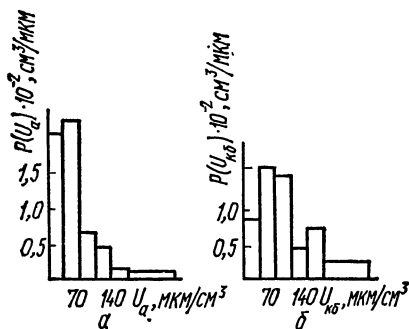
48. Зависимость износа алмазного зерна от объема разрушенного материала V_m (а, кб, с — соответственно участки абразивного и комбинированного износа, скола):

1 — уровень площадки затупления вершины зерна; 2 — уровень связи.



За время работы зерна вид его износа не остается постоянным. Опыты показали, что от вскрытия до выпадения алмаза имеют место в среднем шесть этапов, в ходе которых наблюдаются его абразивный, комбинированный износ, скол или зерно не участвует в работе.

Из гистограмм распределения интенсивности износа (рис. 49) видно, что вариация значений интенсивности



49. Гистограммы распределения интенсивности абразивного (а) и комбинированного (б) износа зерен.

абразивного износа существенно меньше, чем комбинированного. Средняя величина скола для изучавшихся зерен алмазов АСС составила 50 мкм (14% среднего размера зерна), т. е. при этом виде износа алмазы не разрушаются полностью. На наш взгляд это вызывается тем, что трещины распространяются от площадки затупления внутрь зерна по плоскостям роста и включениям (см. рис. 46, в, г), пересекаются на некоторой глубине, после чего часть зерна

скалывается. Большинство зерен после скола продолжали работать.

Несмотря на то, что наиболее эффективно алмазы используются при абразивном износе (табл. 17), скол зерен, обновляющий режущие кромки и уменьшающий усилия, требу-

Т а б л и ц а 17

Результаты определения показателей износа алмазных зерен при обработке гранита

Показатель	Вид износа		
	абразивный	скол	комбинированный
Средняя интенсивность износа зерен, мкм/см ³	43	—	82
Интенсивность линейного износа алмазного слоя, мкм/дм ³	130	—	220
Интенсивность объемного износа алмазного слоя, мм ³ /дм ³	80	—	140
Удельный расход алмазов, г/дм ³	0,02	—	0,04
Величина износа (%) определенного вида по отношению			
к изношенной части зерна	30	54	16
ко всему зерну *	20	69	11
Объем материала, разрушенного при износе определенного вида, %	75	—	25

* При расчете выпавшая часть зерна относилась к сколу.

емые для удаления изношенных зерен из связки, способствует самозатачиванию инструмента.

Самозатачивание алмазных головок, использованных при экспериментах (АСС 400/315, МЖ, 50%), происходит нормально; инструмент обладает высокой износостойкостью. По нашему мнению, это указывает на рациональное соотношение величины абразивного, комбинированного износа и скола:

$$h_a : h_{кб} : h_c = 1,0 : 0,5 : 3,5.$$

Удельный объемный расход алмазов, рассчитанный по приведенным выше формулам на основании статистической обработки результатов измерений, составляет 0,08 г/дм³. Погрешность по сравнению с величиной удельного расхода (0,07 г/дм³), полученной измерением высоты алмазных брусков микрометром, равна 20%.

Как известно, выступание алмазных зерен из связки (вылет) обуславливает величину свободного объема между шлифуемой поверхностью материала и связкой инструмента и существенно влияет на производительность обработки. Наблюдения показали, что величина вылета, определяемая как разность уровней вершины зерна и связки перед ним, получается заниженной. Причиной этого является то, что

Т а б л и ц а 18
Результаты изучения износа связки

Показатель	Вид износа			Зерно не участвует в работе
	абразивный	скол	комбинированный	
Интенсивность линейного износа связки вокруг зерна, мкм/дм ³	130	410	210	60
Интенсивность объемного износа связки вокруг зерна, мм ³ /дм ³	80	260	130	40
Среднее изменение вылета зерна за один опыт, мкм	0	-7,5	-1,0	3,0

во многих случаях уровень связки перед алмазом выше ее уровней слева и справа от него, так как именно здесь поток охлаждающей жидкости со взвешенными частицами разрушенного материала обтекает зерно. Для уточнения вылета уровень связки рассчитывался как среднее трех уровней: спереди, слева и справа от зерна. При таком расчете средняя величина вылета на 10—15% больше, чем при прежнем способе расчета.

Чтобы сопоставить износ алмазов и сопутствующий износ связки, в качестве показателя, характеризующего последний, принята его интенсивность, рассчитанная для всего алмазоносного слоя (табл. 18).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что абразивный износ зерна в целом сопровождается износом связки такой же интенсивности, в то время как при сколе интенсивность износа связки значительно выше. При абразивном износе зерна и сколе характер износа связки различен: в первом случае он протекает за счет воздействия на связку частиц разрушенного материала, во втором возможен

непосредственный контакт связки с выступающими элементами микрорельефа обрабатываемого материала.

Более интенсивным износом связки при сколе можно объяснить то, что средний вылет зерен, вступающих в работу, составляет 45 мкм, в то время как перед выпадением алмазов из связки он уменьшается до 35 мкм. Действительно, при вступлении алмазов в работу абразивный износ отмечен на 77% зерен, скол — на 15%, комбинированный износ — на 8%. Перед выпадением алмазов эти виды износа наблюдаются соответственно на 15, 46 и 39% зерен. Когда связка защищена зернами, не участвующими в работе, износ ее протекает медленнее, чем при любых видах износа алмазов.

Износ связки, не защищенной зернами, определялся измерением ее уровня вокруг лунок, оставшихся после выпадения алмазов. Интенсивность линейного и объемного износа связки составляла соответственно 190 и 120 мм³/дм³, что в 1,4 раза больше соответствующих показателей износа связки при абразивном износе алмазов.

На основании результатов измерений можно записать соотношение интенсивности износа связки при абразивном, комбинированном износе и сколе зерна при его неучастии в работе и интенсивности износа связки, не защищенной зерном: $\bar{U}'_a : \bar{U}'_k : \bar{U}'_g : \bar{U}'_h : \bar{U}'_{из} = 1 : 1,6 : 3,1 : 0,5 : 1,4$.

Как видно из приведенных данных, для сохранения рожущих свойств зерна и его выступления из связки интенсивность абразивного износа алмаза и сопутствующего износа связки должна быть одинаковой. Очевидно, что уменьшение интенсивности износа связки по сравнению с износом зерна приведет к зашлифовке алмаза (росту площадок затупления и уменьшению вылета).

Таким образом, установленное соотношение интенсивности абразивного, комбинированного износа и скола алмазных зерен дает возможность определить износостойкость инструмента в целом и степень рационального использования алмазов. В совокупности с соотношением, показывающим влияние видов износа зерен на интенсивность износа связки по сравнению с износом связки, не защищенной алмазным зерном, полученные результаты позволяют также оценить условия, необходимые для самозатачивания инструмента, и определить пути управления этим процессом при обработке природного камня.

Глава III

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНОГО ДИСКОВОГО ИНСТРУМЕНТА

1. Современное состояние и тенденции развития исследований

В отечественной практике вопросами алмазной обработки природного камня занимаются сравнительно недавно — последние 10—15 лет. Наибольший интерес как с точки зрения полноты охвата изучаемых параметров, так и с точки зрения практической значимости полученных результатов представляют экспериментальные работы ВНИИАлмаза — одной из первых организаций, заложивших основы практического освоения процессов алмазно-дискового резания в нашей стране.

Основные выводы экспериментального изучения ВНИИАлмазом работоспособности алмазных дисковых пил сводятся к следующим положениям [35].

1. С увеличением зернистости природных алмазов от 200/160 до 630/500 уменьшается их удельный расход и увеличивается производительность.

2. Лучшие результаты обеспечивает инструмент с концентрацией алмазов 25—31%.

3. При резании «против подачи» удельный расход алмазов и энергоёмкость процесса уменьшаются в два-три раза по сравнению с резанием «по подаче».

4. Рекоменгуемый способ охлаждения — многоструйный, широко практикуемый за рубежом.

5. Рациональное значение окружной скорости резания составляет 27—39 м/с, причем для твердых абразивных материалов оно ниже, а для мрамора — выше. В более ранних работах ВНИИАлмаза эти значения были завышенными и не соответствовали рекомендациям многих зарубежных фирм.

6. Резание твердых материалов следует производить многопроходным способом на глубину 1—5 мм, мягких — до 130 мм за один проход.

Алмазные дисковые пилы конструкции ВНИИАлмаза в настоящее время широко используются в камнеобрабатывающей промышленности страны; удельный расход алмазов в процессе эксплуатации составляет по мрамору 0,02—0,04 г/м², по граниту — 0,2—0,4 г/м².

В работах ВНИИАлмаза не получили должного освещения вопросы обоснования и выбора окружной скорости резания, скорости подачи, влияние которых на показатели использования инструмента весьма существенно и оно возрастает с увеличением твердости и прочности обрабатываемого материала. Не отражены также вопросы влияния глубины резания на рациональные значения окружной скорости и скорости подачи и в конечном счете на работоспособность инструмента. Отдельные результирующие положения справедливы лишь для конкретных условий резания и зависят от свойств и состава связки, марки алмазов и другого, как, например, от рекомендаций об увеличении зернистости алмазов до 630/500, выводов о преимуществах способа резания «по подаче» и «против подачи».

Развитие экспериментальных исследований процессов алмазно-дискового резания природных каменных материалов получило воплощение в работах ведущих научно-исследовательских и других организаций нашей страны — НИИКСа, ВНИПИИстромсырье, ВНИИНЕРУДа, Карагандинского политехнического института. Заслуживают внимания исследования работоспособности алмазных дисковых пил применительно к исполнительным органам проходческих комбайнов [43]. Экспериментально установлено, что с увеличением скорости подачи и глубины резания удельный расход алмазов возрастает, причем большее влияние на величину износа оказывает первый параметр. Разработанный авторами метод определения рационального значения этого параметра, базирующийся на равенстве объемов разрушенной породы и межзеренного пространства, недостаточно обоснован. Как следует из выведенного аналитического выражения для определения величины V_n , для увеличения производительности резания при постоянной глубине пропила необходимо идти по пути увеличения скорости резания, зернистости алмазов и уменьшения их концентрации. Однако, несмотря на очевидность указанных

положений, они могут быть справедливы лишь при условии абсолютно жесткого закрепления алмазов в связке. Этот фактор, являющийся решающим при выборе большинства режимных параметров, не получил должного освещения в указанных работах. Недостаточно глубоко изучен также вопрос о влиянии окружной скорости резания на его эффективность, что особенно важно при обработке твердых пород камня. Интересна работа [33], в которой рассматривается влияние режимных параметров на работоспособность инструмента, однако зона их рациональных значений объясняется с позиций изменения нагрузок на зерна и пути трения без учета взаимодействия мелкодисперсных продуктов разрушения с алмазоносным слоем.

В работе [101] в процессе разработки методов оптимизации рабочего процесса по основным элементам затрат достаточно полно учтены все факторы, влияющие на эффективность алмазно-абразивной обработки камня.

В настоящее время имеется богатый практический опыт зарубежных фирм по созданию и эксплуатации алмазных дисковых пил для резания природного камня с различными свойствами, разработано достаточно много методов и приемов эффективного ведения рабочих процессов в конкретных условиях операционных циклов. Тем не менее глубоких экспериментальных исследований, которые в полной мере отвечали бы на все вопросы сложного взаимодействия разнообразных факторов процесса алмазно-дискового резания камня, в литературных источниках почти нет. Сведения по основным вопросам рационального использования инструментов в журнальных статьях, проспектах и каталогах фирм даются преимущественно в виде рекомендаций и кратких сообщений рекламного характера. Обобщенный анализ имеющихся данных позволяет выявить лишь общие направления в вопросах выбора и назначения рациональных параметров режимов резания и характеристики алмазоносного слоя дисковых пил.

Большинство рекомендаций и экспериментальных разработок, касающихся влияния окружной скорости резания на работоспособность инструмента, сводятся к тому, что для резания твердых пород камня ее рациональное значение находится в диапазоне 20—30 м/с, а пород средней твердости и мягких — 40—80 м/с. Характерно, что сравнительно низкие значения окружной скорости резания для твердых материалов связываются с условиями охлаждения.

Так, одной из американских фирм [120] из-за невозможности применить обильное охлаждение рекомендуется не превышать окружную скорость более 16 м/с, в то время как для нормальных условий рациональное значение ее составляет 25—38 м/с.

Нецелесообразность увеличения окружных скоростей выше указанных пределов, как это доказано результатами исследований ИСМ АН УССР, объясняется возрастанием роли тепловых и других факторов. Например, при изучении работоспособности инструмента бельгийской фирмы «БТС» повышение окружной скорости с 20 до 29 м/с показало увеличение удельного расхода алмазов в 1,3 раза.

Имеется ряд других примеров, свидетельствующих о большой экономичности снижения окружной скорости до значений 20—21 м/с при увеличении твердости гранитов [133]. Как показывают эксперименты, при обработке этих материалов уменьшение V_o с 56,5 до 21 м/с позволяет снизить износ инструмента в два раза; при распиловке габбро-норита влияние V_o на износ значительно меньше.

Для различных условий резания гранитов рекомендуются рациональные значения V_o , которые не превышают 30—35 м/с, что обусловлено различием механических характеристик обрабатываемых материалов [36, 119, 123].

В некоторых работах [91, 119, 133] рекомендации по V_o связываются с характеристикой алмазоносного слоя пил. Например, при резании гранита инструментом с небольшой концентрацией алмазов целесообразно принять $V_o = 30$ м/с, а при больших ее значениях, когда алмазоносный слой менее чувствителен к изменению V_o , она может быть повышена [104].

В рекомендациях итальянской Ассоциации производителей, коммерсантов и поставщиков алмазного инструмента для обработки мрамора даны три основных предела окружных скоростей в зависимости от зернистости алмазов [40] (табл. 19).

В работах [4, 40, 119, 123] окружная скорость, а также другие параметры назначаются в зависимости от обрабатываемости материалов, которые классифицируются, как, например, в итальянской промышленности, следующим образом: граниты с высоким ($V_o = 25—30$ м/с) и низким ($V_o = 32—40$ м/с) содержанием кварца, мраморы ($V_o = 40—50$ м/с), травертины (50—60 м/с), песчаники ($V_o = 55—65$ м/с).

Заслуживает внимания предложенный фирмой «Винтер» метод анализа влияния кинематических и конструктивных параметров посредством величины поперечного сечения среза A_k , снимаемого одним зерном, представленного в математическом выражении

$$A_k = \frac{V_p \sqrt{H_p}}{V_o \sqrt{DN_D}},$$

где N_D — число единичных зерен на единицу площади (идентично концентрации).

В соответствии с полученным выражением при увеличении V_o , D , N_D снижается A_k , нагрузка на зерно и, как следствие, уменьшается износ. Отмечается

также различное влияние на износ скорости подачи и глубины резания. Как показали эксперименты, несмотря на увеличение производительности резания на 50 и 75% (за счет различных сочетаний V_p и H_p), износ повышается лишь на 18 и 13%, на основании чего сформулировано требование к ведению рабочего процесса с максимально возможной глубиной.

Приведенная зависимость, как свидетельствуют результаты аналитических и экспериментальных работ многих исследователей, дает только относительное представление об изменении A_k и не учитывает влияния на нее ряда других важных параметров. В связи с этим не все из указанных выводов правомерны, и они позволяют судить об изменении износа лишь с определенным приближением.

В практике обработки пород камня средней твердости и мягких наблюдается стремление к резанию с максимально возможной глубиной за один проход, которая составляет, как правило, $0,3 D$. При распиловке твердых пород камня до последнего времени практически повсеместно недостаточно полно использовали стойкостные ресурсы алмазного слоя, что обусловлено применением традиционных методов, характерных для карборундовых кругов: многопроходная обработка с небольшой глубиной (до 5 мм) и большой подачей. Следствием унаследованных приемов

Таблица 19
Рекомендуемые значения окружной скорости в зависимости от зернистости алмазов

Размер зерен, мкм	Глубина резания, см	V_o , м/с
<500	<15	>40
200—500	>40	40—60
>300	>40	<60

явилась необходимость применять пилы с большой концентрацией алмазов, однако при невысоких значениях V_0 при резании гранитов проблемной становилась возможность достижения большой производительности.

За последние годы ИСМ АН УССР и рядом зарубежных фирм экспериментальным путем получены выводы, обуславливающие диапазон рациональных значений глубины однопроходного резания твердых пород камня (гранитов с содержанием кварца) — 10—60 мм [104, 119, 123, 130]. Большое значение имеет правильный выбор этого параметра, что подтверждено количественно. Так, в одной из работ [104] показано, что при резании гранита уменьшение глубины пропила с 25 до 5 мм увеличивает износ алмазных пил в шесть раз.

Заслуживает внимания попытка исследовательской лаборатории по вопросам шлифования в Вестервике (Швеция) найти обоснование рациональных значений режимных параметров во взаимосвязи их с жесткостью станка [36]. В процессе экспериментальных работ при резании красного гранита алмазной пилой диаметром 203 мм на плоскошлифовальном станке с подвижным вибрационным столом со статической жесткостью шпинделя 2,0 кгс/мкм ставилась задача установить зависимость износа алмазоносного слоя, мощности резания и амплитуды колебаний шпинделя от окружной скорости при постоянной производительности (160 см²/мин), полученной двумя сочетаниями скорости подачи и глубины пропила: $V_n = 8$ м/с, $H_p = 2$ мм и $V_n = 2$ м/мин, $H_p = 8$ мм. На основании полученных результатов сделан вывод, что кривые зависимости износа и мощности резания от окружной скорости качественно идентичны характеру изменения амплитуды колебаний шпинделя, а также вывод о преимуществах способа резания с большей глубиной (8 мм). Однако указанный вывод справедлив лишь в том смысле, что амплитуда колебаний действительно изменяется при изменении окружной скорости. Идентичность зависимостей амплитуды колебаний, износа и мощности в первом варианте сочетания V_n и H_p не является абсолютно взаимнообусловленной, так как здесь налицо совершенно другая первопричина: при малых H_p и больших V_n значительно увеличивается толщина среза, снимаемого одним зерном, а следовательно, и энергоемкость разрушения. Подтверждением этому может служить также анализ зависимости изучаемых параметров по второму

варианту резания, в которой отсутствует, в отличие от первого варианта, идентичность качественной картины их изменения.

Об уровне производительности процесса алмазно-дискового резания природного камня, достигнутом в зарубеж-

Т а б л и ц а 20
Максимальная производительность резания, см²/мин

Обработка	Обрабатываемый материал				
	Твердые граниты	Мягкие граниты	Мраморы	Травертины	Песчаники
Точная при небольшой мощности привода	100	200	1500	1500	800
Средней точности при большой мощности привода	200	800	3000	3500	1500
Скоростное резание	—	—	4000—6000	5000—6000	3000

ной практике, с определенным приближением можно судить по данным итальянской промышленности камня (табл. 20) [40].

Наличие в таблице термина «скоростное резание» наглядно отражает современные тенденции развития технологии алмазно-дискового резания камня. В этом плане необходимо отметить, что начиная с 70-х годов ведущими зарубежными фирмами достигнут значительный прогресс в решении общей проблемы интенсификации производственных процессов, в первую очередь за счет создания новых связей, обладающих повышенными алмазоудержанием и износостойкостью, использования в инструментах высокопрочных алмазных порошков, увеличения окружной скорости и повышения мощности приводов вращения камнерезных станков. По информации ряда фирм [32, 91, 123], положительное решение указанных вопросов позволило увеличить производительность резания в 1,5—2,0 раза при существенном росте показателей долговечности инструментов.

Основные рекомендации зарубежных фирм [4, 12—18, 119] по рациональным параметрам характеристики

алмазного слоя практически одинаковы. Для резания твердых пород камня большинство из них применяют пилы с размером алмазов 300—500 мкм, концентрацией 35—60% со связками на стальной и твердосплавной основах. Об этом свидетельствуют также результаты исследований натуральных образцов фирм «БТС» и «Венариа реале» (Италия).

Для резания пород камня средней твердости и мягких рекомендуются инструменты на бронзовой основе с преимущественно 25%-ной концентрацией алмазов размером более 500 мкм. Многими фирмами при обработке твердых пород камня практикуется сочетание природных и синтетических алмазов в различных пропорциях.

В ряде экспериментальных исследований помимо чисто технических аспектов оценки при выборе рациональных параметров характеристики алмазосодержащего слоя указывается и на необходимость учета других факторов, связанных с состоянием использования инструментов. В работе [133] отмечается целесообразность применения пил с большей концентрацией алмазов (изучению подлежали 25, 35 и 45%-ные), имеющих меньшие удельные затраты по статье «инструмент». Вопрос об окончательном выборе ее рационального значения связан с числом повреждений и выходов из строя инструмента по различным причинам.

Отмечается также, что с увеличением концентрации алмазов расширяются возможности повышения производительности резания, которые ограничиваются, однако, значением окружной скорости 40 м/с. Следует иметь в виду, что энергоемкость процессов резания при этом будет более высокой. В качестве практически оправданных приемов резания в рекомендациях ряда фирм указывается на целесообразность, при недостаточной мощности привода вращения станка, применять инструменты на мягких или на твердых связках, но при небольших значениях окружной скорости; одним из путей повышения стойкости дисковых пил при обработке твердых и абразивных материалов является увеличение концентрации алмазов или уменьшение их зернистости, однако пределы этих изменений не конкретизируются.

Исследований, касающихся влияния диаметра инструмента и схем резания («по подаче» или «против подачи») практически не встречается. Недостаточно сведений и о стойкостных показателях промышленных образцов алмазных пил зарубежного производства. При резании мраморов

и других подобных материалов ориентировочное значение стойкости алмазных пил малых диаметров (400—1000 мм), использующихся преимущественно на операциях окантовки изделий, составляет 800—1000 м² и пил диаметром более 1000—1200 мм — 2000—5000 м² площади резания. При резании гранитов стойкость пил малых диаметров находится в диапазоне 50—100 м² (в зависимости от свойств материала и диаметра инструмента).

Необходимо отметить, что в рассмотренных выше работах не дан анализ тех или иных зависимостей с позиции взаимного влияния основных факторов, определяющих эффективность работы алмазных пил, в связи с чем практически невозможен глубокий анализ экспериментальных работ с целью получения обобщенных выводов. Представленные в них материалы относятся главным образом к работе дисковых пил из природных алмазов; по применению синтетических алмазов в технологии обработки природного камня в специальной литературе сведения отсутствуют.

В нашей стране начало работ по созданию и экспериментальному изучению процессов резания природного камня дисковыми пилами из синтетических алмазов положено ИСМ АН УССР в 1963—1965 гг. Несмотря на достаточно высокий уровень современного развития технологии алмазно-абразивной обработки природного камня, вопросы эффективного резания твердых его разновидностей по-прежнему остаются проблемными.

В данной работе основной объем экспериментальных исследований выполнен на широко используемом в практике строительства граните Жежелевского месторождения ($\sigma_{сж} = 2000—2100$ кгс/см², абразивность 30 мг).

2. Выбор характеристик алмазоносного слоя

Эффективность работы алмазных дисковых пил во многом зависит от характеристики алмазоносного слоя—связки, концентрации алмазов и их зернистости. Существенное влияние на работоспособность инструмента оказывают свойства алмазов и связки. Все параметры алмазоносного слоя взаимосвязаны и в комплексе определяют его работоспособность.

Прочность алмазных зерен, оцениваемая разрушающей нагрузкой,— один из основных параметров, определяющих

работоспособность инструмента. Увеличение прочности алмазов, обусловленное и неразрывно связанное со структурными изменениями, должно способствовать уменьшению интенсивности их износа, что открывает перспективы применения более износостойких связок, а также соответствующему увеличению вылета зерен, являющегося резервом повышения режущих свойств инструмента.

Имеется ряд работ [94, 108], свидетельствующих о существенном влиянии прочности алмазов и их марки на работоспособность инструмента в зависимости от вида обработки и природы обрабатываемого материала. Сведений о влиянии этой характеристики алмазных порошков и их марки на работоспособность дисковых сегментных пил при резании природного камня в литературных источниках не встречается.

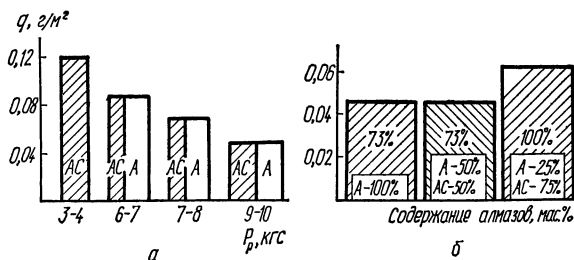
На основании результатов лабораторных исследований и опыта промышленного применения алмазного камерезного инструмента для изучения были приняты синтетические и природные алмазы зернистостью 400/315 с различной прочностью, изменяющейся в диапазоне 3—10 кгс. Прочность алмазных зерен определялась по методике ИСМ АН УССР величиной, разрушающей нагрузки при одноосном сжатии.

Принятые к изучению дисковые сегментные пилы диаметром 320 мм изготовлялись с концентрацией алмазов 50% на металлической связке МОЗ. Стабильность качеств алмазного слоя инструмента контролировалась по отклонению твердости связки от средней величины, которое не превышало ± 3 HRB.

В результате исследований установлено, что один из основных показателей работоспособности инструмента — удельный расход алмазов — определяется прочностью зерен независимо от их марки [5].

Из представленной на рис. 50, а диаграммы следует, что удельный расход алмазов уменьшается с увеличением их прочности, причем его минимальное значение (0,05 г/м²) соответствует прочности 9—10 кгс, а максимальное (0,12 г/м²) — 3—4 кгс. Кроме того, в процессе исследований определялось влияние на износостойкость инструмента добавок к алмазам прочностью 9—10 кгс менее прочных алмазов. В качестве добавок использовались алмазы марки АСК 400/315 с прочностью зерен 6 кгс, содержание их по массе составляло 50 и 75%. Полученные результаты

(рис. 50, б) свидетельствуют о том, что инструмент, содержащий до 50% менее прочных алмазов, по удельному расходу ($0,04 \text{ г/м}^2$) не уступает инструменту, оснащеному алмазами с прочностью зерен 9—10 кгс. Увеличение числа менее прочных алмазов до 75% повышает удельный расход в 1,5 раза.



50. Влияние прочности алмазов и их марки (а), а также добавок менее прочных алмазов (б) на удельный расход алмазов инструмента.

В целях проверки полученных выводов на предприятии «Грузтешенит» (Грузинская ССР) проведены испытания опытных образцов дисковых сегментных пил диаметром 500 мм конструкции ИСМ АН УССР на связке МОЗ, оснащенных алмазами зернистостью 400/315 с прочностью зерен 8—10 кгс, а также смесью алмазов зернистостью 400/315 с прочностью 8—10 и 6 кгс с их массовым соотношением 1 : 1. Установлено, что при достаточно высокой производительности резания ($300 \text{ см}^2/\text{мин}$) стойкость до амортизации сравниваемых вариантов сегментных пил (соответственно 450 и 445 м^2) практически равнозначна, т. е. подтверждается вывод, полученный в лабораторных условиях.

Исходя из полученных результатов, в последующем при изучении процесса резания гранита большинство выводов будет относиться к инструменту, оснащеному алмазами с прочностью зерен 8—10 кгс.

Аналогичная зависимость установлена также в процессе исследований работоспособности отрезных кругов АОК 200 на связке МЗ, оснащенных синтетическими алмазами марок АСК, АСВ, АСР зернистостью 315/250, концентрацией 50% при резании мшанковых известняков на свободной подаче [56]. Соответствующее подтверждение получено и в производственных условиях Хустского экспериментального камнеобрабатывающего завода при распиловке туфов

дисковыми пилами диаметром 800 мм, также оснащенными синтетическими алмазами марок АСК, АСВ, АСР.

Материал связки — один из решающих факторов, определяющих эффективность процесса резания, причем роль ее особенно ощутима при обработке твердых и абразивных материалов.

Высокопроизводительные процессы резания алмазными пилами характеризуются высокими удельными давлениями на алмазное зерно, повышенным абразивным и тепловым износом связки и зерен алмазоносного слоя. В связи с этим для обеспечения эффективности инструмента связка должна иметь повышенное алмазоудержание, высокую износостойкость.

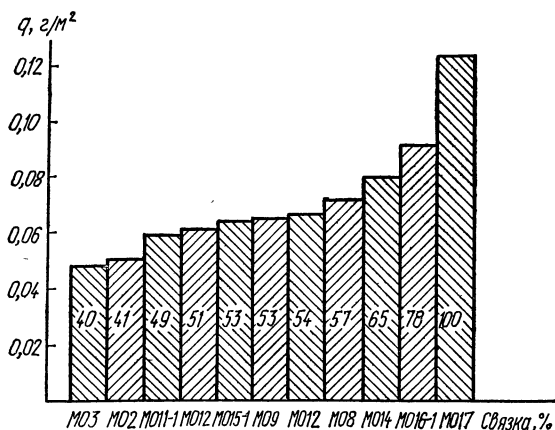
Получившая широкое распространение связка на твердосплавной основе М50 в серийно выпускаемых отечественной промышленностью алмазных дисковых пилах для резания твердых пород природного камня не всегда удовлетворяет указанным свойствам. Пилы на этой связке, обеспечивающие удовлетворительные показатели при оснащении их природными алмазами, все еще уступают аналогичным инструментам ведущих зарубежных фирм. Как показали опытные работы, связка М50 не может быть использована с требуемой эффективностью в сочетании с синтетическими алмазами, регламентируемыми действующим ГОСТ.

Для создания конкурентоспособного инструмента, позволяющего повысить эффективность резания твердых пород камня, в ИСМ АН УССР выполнен комплекс научно-исследовательских работ по созданию и исследованию новых эффективных металлических связок алмазного инструмента.

На основе анализа зарубежного опыта и изучения натуральных образцов инструмента некоторых фирм при определении рационального состава связки зернистость алмазов в исследуемом инструменте принята равной 400/315 и концентрация 50%; алмазы для оснащения пил выбраны одной партии со средней прочностью зерен 8—10 кгс. Контроль качества алмазоносного слоя после спекания производился по геометрическим параметрам и средней твердости, которая для металлических связок колебалась в пределах 105—107 ед.

В процессе исследований и сравнительных испытаний инструмента на новых связках состояние его рабочей поверхности исследовалось на микроскопе МИН-9 с увели-

чением объектива и окуляра соответственно в 21 и 7 раз. Работоспособность алмазного инструмента оценивалась по производительности обработки ($\text{см}^2/\text{мин}$) и удельному расходу алмазов ($\text{г}/\text{м}^2$). Было создано и изучено 13 типов связок на различных основах: МОЗ, МО9, МО10, МО12, МО14,



51. Диаграмма удельного расхода алмазов инструмента на опытных связках, изготовленных методом спекания.

МО15 (МО2), МО16 (МОЗ), МО17, МО15-1, МО16, Т1, Т2, ТС1, изготовленных методами спекания и пропитки. Общий объем резания составил более 100 м^2 площади пропила.

Результаты исследований связок, изготовленных методами спекания (рис. 51) и пропитки твердого сплава, свидетельствуют о том, что наиболее низкий удельный расход алмазов ($0,05 \text{ г}/\text{м}^2$) обеспечивает инструмент на связках МОЗ и МО2. Однако, несмотря на высокую износостойкость, связка МО2 не может быть рекомендована к опытному производству без совершенствования технологии спекания, так как в процессе эксплуатации наблюдались случаи микрорывкрашиваний рабочей части.

Таким образом, анализ полученных данных позволил всесторонне изучить металлическую связку на кобальтовой основе МОЗ, обеспечивающую высокие показатели работоспособности и, следовательно, обладающую повышенными алмазодержанием и износостойкостью. Повышение алмазодержания и износостойкости достигнуто применением для

основы связки металлов с высокими физико-механическими и тепловыми характеристиками, а также за счет легирования связки элементами и соединениями, улучшающими смачивание и повышающими термостойкость алмазов.

Известно, что абразивная износостойкость характеризует способность связки сопротивляться износу мелкодисперсными продуктами резания — шламом, состоящим из стружки обрабатываемого материала, осколков алмазных зерен и частиц связки. В процессе резания шлам располагается в межзеренном пространстве и, воспринимая давление со стороны обрабатываемого изделия и потока охлаждающей жидкости, внедряется в связку. Следовательно, износ связки происходит преимущественно за счет динамического воздействия продуктов резания.

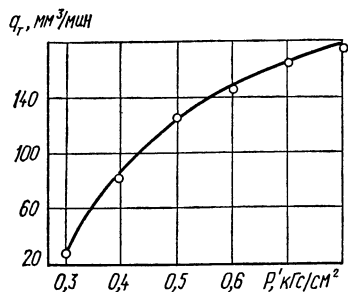
Для изучения износостойкости связок алмазного камнерезного инструмента разработана специальная установка, с помощью которой создается относительное перемещение находящихся в контакте торцовых поверхностей двух кольцевых тел, закрепленных на соосных валах. Вращающийся образец изготовлен из материала связки, второй трущийся элемент — неподвижное контртело — из шлама обрабатываемого материала, скрепленного органическим связующим. Необходимое давление в зоне трения создается статическим прижимом.

При моделировании процесса истирания связки необходимо, чтобы относительная скорость скольжения образца по контртелу, расход материала контртела и давление в зоне трения соответствовали показателям реального процесса обработки. Эти параметры устанавливались для условий резания гранита Жежелевского месторождения крупнозернистыми алмазными сегментными пилами диаметром 320 мм [52]. Расход шлама на единицу поверхности трения $V_{ш}$ при проведении экспериментов определялся в соответствии с выражением (II. 80), устанавливающим взаимосвязь между окружной скоростью резания, продольной подачей, глубиной пропила, площадью контакта участка рабочей поверхности, разрыхлением породы и коэффициентом, учитывающим интенсивность истирающего действия шлама и закрепленного абразива. Применительно к реальному процессу обработки расчетное значение $V_{ш} = 21 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

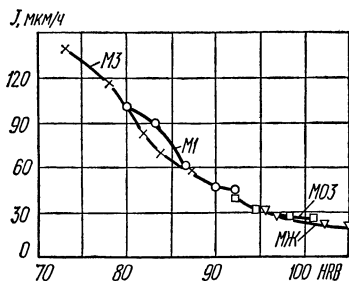
Давление шлама на поверхность связки создается, как отмечалось ранее, динамическим воздействием пульпы, со-

стоящей из шлама и охлаждающей жидкости. Поэтому давление в зоне трения устанавливается в зависимости от расхода шлама на единицу поверхности трения (рис. 52).

Применительно к параметрам указанного процесса обработки и на основании детального анализа характера дей-



52. Зависимость расхода материала контртела от нормального давления.



53. Зависимость износостойкости связок от их твердости.

ствия продуктов резания на материал связки выбраны следующие режимы испытаний: скорость скольжения 20 м/с, давление прижима 0,57 кгс/см², охлаждающая жидкость — вода.

Как известно, съем материала происходит, если его микротвердость в 1,6—2,0 раза меньше микротвердости абразива. Микротвердость структурных составляющих гранита (кварца, пироксенов и др.) в два — четыре раза превосходит аналогичный показатель составляющих компонентов изучаемых связок М1, М3, МЖ, МОЗ, что свидетельствует об отсутствии избирательности в процессе их износа.

Поскольку условия проведения экспериментов не вызывают роста температуры, установившейся в зоне трения (выше 50—70° С), в дальнейшем можно говорить об износе металлических связок шлагом гранита как о практически чистом абразивном износе.

Опыты показали, что максимальный износ характерен для связок М1 и М3 на бронзовой основе, обладающих сравнительно низкой твердостью и прочностью. Связки на железной (МЖ) и кобальтовой (МОЗ) основах более износостойки (табл. 21). Полученные результаты хорошо согласуются с показателями работоспособности алмазных сегментных пил при резке гранита: по стойкости инстру-

мент на связках МОЗ и МЖ превосходит круги на связках М1 и М3 в 1,5 раза. Таким образом, разработанный метод исследования позволяет получить достоверные данные об абразивной износостойкости связок.

Анализ взаимосвязи физико-механических свойств и показателей износостойкости связок позволил установить, что скорость их износа зависит не столько от прочностных свойств, сколько от твердости, а износостойкость связки определяется главным образом ее твердостью (рис. 53), что следует учитывать при разработке технологических процессов изготовления камнерезного алмазного инструмента.

Проведенные эксперименты показали, что алмазные сегментные пилы на связке МОЗ при производительности, характерной для данного инструмента в практике алмазно-дискового резания гранитов, обеспечивают снижение удельного расхода алмазов по сравнению с серийным инструментом Кабардино-Балкарского завода алмазного инструмента (КБЗАИ) на связке М50 и ИСМ АН УССР на связке Ж1 в 1,5 раза и конкурентоспособные показатели по сравнению с промышленными образцами ряда зарубежных фирм (табл. 22).

Важно отметить, что существенное преимущество инструмента на связке МОЗ — возможность резания на повышенных режимах (скорость подачи в диапазоне 400—800 мм/мин и окружная скорость до 30 м/с) без заметного роста удельного расхода алмазов при увеличении этих параметров. Указанное обстоятельство особенно важно при эксплуатации инструмента в производственных условиях.

Анализ состояния поверхности алмазоносного слоя показал, что для связки МОЗ, имеющей минимальный удельный расход алмазов, глубина лунок свежеудаленных зерен (рис. 54) имеет также минимальное значение (180 мкм). Это свидетельствует о том, что связка МОЗ имеет более высокое алмазоудержание, чем изучаемые типы связок.

По современным представлениям [128] удержание алмазов в металлической связке зависит от двух основных факторов — химического взаимодействия алмаза с металлами связки и прочности механического закрепления зерна алмаза в материале связки. При этом степень влияния одного или другого фактора зависит от конкретных параметров изготовления связки (давления горячей допрессовки, среды спекания, температуры спекания), а также от сос-

Таблица 21

Физико-механические свойства и показатели износостойкости связок

Связка	Твердость HRB	Сопротивление двойному сре- зу, кгс/мм ²	Прочность ал- мазодержа- ния, кгс/мм ²	Среднее значение линейного износа за опыт * мм	Скорость из- носа, мм/ч	Относитель- ная износо- стойкость
M1	90	29	19,0	0,015 ± 0,002	45 ± 6	1,00
M3	84	36	21,3	0,023 ± 0,002	69 ± 6	0,79
MЖ	102	47	24,6	0,008 ± 0,001	24 ± 3	1,77
МОЗ	98	51	26,7	0,010 ± 0,001	30 ± 3	1,53
МОЗ	103	54	28,0	0,008 ± 0,001	23 ± 3	1,82

* Продолжительность каждого опыта 20 мин.

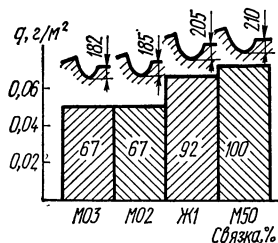
Таблица 22

Результаты сравнительных испытаний алмазных пил
на различных связках

Вид инструмента	Связка	Объем наблюде- ний, квад- ратные метры площади резания	Удельный расход алмазов	
			г/м ²	%
Конструкции КБЗАИ	M50	2,29	0,072	100
Конструкции ИСМ АН УССР	Ж1	4,52	0,066	92
Конструкции фирмы «БТС»	Метал- личес- кая	4,60	0,058	81
Конструкции фирмы «Венариа реале» (Италия)	То же	1,60	0,056	78
Конструкции ИСМ АН УССР	МОЗ	4,52	0,048	67

Примечание. Режим работы испытаний: $V_0 = 21$ м/с; $V_{п} = 500$ мм/мин; $H_p = 30$ мм.

тава связки. Для связок, имеющих температуры спекания выше 900°C и содержащих карбидообразующие металлы, решающее значение имеет химическое взаимодействие алмазов с металлами [68]; для связок, спекающихся при более низких температурах (порядка $800\text{--}850^{\circ}\text{C}$), очевидно,



54. Сравнительные показатели удельного расхода алмазов инструмента на лучших вариантах опытных связок и серийного производства.

преобладает второй фактор. Оба фактора находятся в тесной взаимосвязи: при увеличении прочности механического закрепления усиливается химическое взаимодействие алмазов с металлом, так как усиливаются диффузионные процессы на молекулярном уровне, а также увеличивается контактная поверхность взаимодействия алмазов с материалом связки.

Увеличение прочности механического закрепления алмазов возможно за счет повышения пластической деформации связки до максимального заполнения материалом

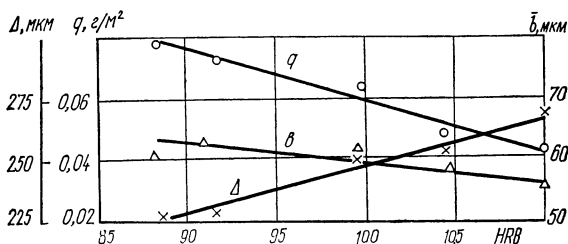
связки микро- и макронеровностей на поверхности алмазов, а также за счет нанесения на алмаз металлических покрытий, повышающих химическое взаимодействие связки с металлом покрытия.

В свете изложенного представляет интерес изучение влияния некоторых технологических параметров алмазоносного слоя на алмазоудержание, и следовательно, на работоспособность алмазного инструмента. В соответствии с полученными выводами таким параметром может быть твердость алмазоносного слоя, являющаяся показателем степени уплотнения связки. Для исследования были приняты алмазные сегментные пилы диаметром 300 мм конструкции ИСМ АН УССР на связке МОЗ с 50%-ной концентрацией алмазов зернистостью 400/315. Алмаз для исследования был выбран одной партией со средней прочностью 8—10 кгс.

Различные значения твердости алмазоносного слоя достигались изменением удельного давления горячей допрессовки. Твердость алмазоносного слоя определялась на приборе ТК-2 по шкале В. На каждом алмазоносном сегменте проводилось не менее трех замеров в точках, равномерно расположенных по длине сегмента. За величину

твердости принималось среднее арифметическое трех замеров. Были изготовлены алмазные дисковые пилы со следующими значениями твердости алмазоносного слоя HRB : 83, 87, 100, 105 и 110 ед.

В качестве покрытия алмазов был применен никель, который наносился на алмазы электролитическим способом с наложением ультразвука; количество наносимого металла



55. Влияние твердости связки МОЗ на удельный расход алмазов q , среднее значение вылета \bar{b} и размер площадок затупления Δ алмазных зерен.

по отношению к исходной массе алмазов составляло 60%. Из металлизированных алмазов изготавливались алмазные дисковые пилы на связке МОЗ с твердостью алмазоносного слоя 105—110 HRB .

Исследование работоспособности инструмента на связке МОЗ с различной твердостью алмазоносного слоя, а также с металлизированными алмазами проводилось при резании гранита Жежелевского месторождения на выбранных рациональных режимах. В процессе экспериментов предусматривалось также изучение состояния поверхности алмазоносного слоя, выполненное на микроскопе МИН-9.

В результате исследований инструмента с различной твердостью связки установлено (рис. 55), что удельный расход алмазов снижается пропорционально увеличению твердости связки и имеет минимальное значение (0,04 г/м) при твердости 110 HRB [8].

При рассмотрении явлений, сопровождающих износ алмазоносного слоя, следует исходить из степени воздействия на него прочности удержания алмазов связкой и износа связки мелкодисперсными продуктами разрушения обрабатываемого материала. Как следует из представленной зависимости, с увеличением твердости связки увеличивается размер площадки затупления алмазных зерен, что

свидетельствует об увеличении продолжительности удержания алмазного зерна в связке, и следовательно, о повышении прочности его закрепления по мере увеличения твердости связки.

Средневзвешенное значение вылета алмазных зерен имеет тенденцию к некоторому снижению при увеличении твердости связки, начиная с величины 85 ед., что можно рассматривать как следствие увеличения долговечности удержания зерен.

В результате исследований работоспособности инструмента на связке МОЗ из металлизированных алмазов было установлено, что этот инструмент имеет удельный расход алмазов ($0,04 \text{ г/м}^2$) на 25% ниже, чем инструмент из обычных алмазов ($0,05 \text{ г/м}^2$), что также обеспечивается повышением алмазодержания за счет взаимодействия связки с материалом покрытия.

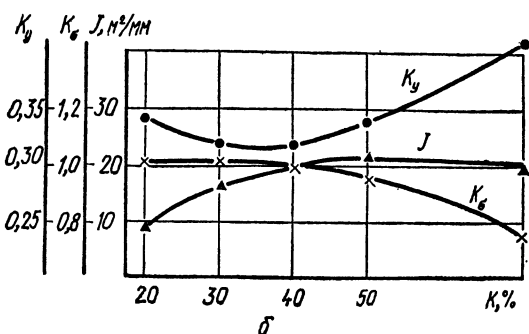
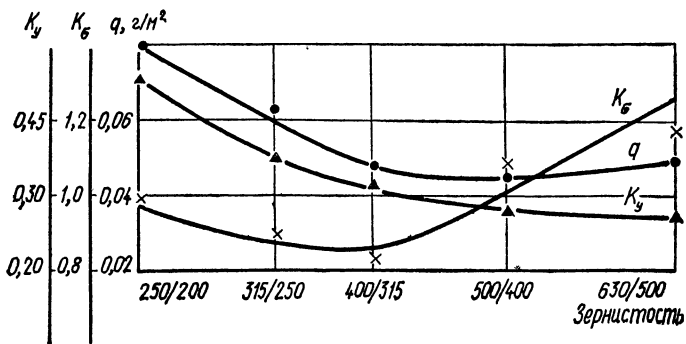
Для резания пород средней твердости и мягких создана металлическая связка МЗ, изготавливаемая методом порошковой металлургии. Лабораторные исследования и производственные испытания алмазных пил на связке МЗ свидетельствуют о том, что по сравнению с серийно выпускаемым инструментом на связке М1 у этих пил износостойкость увеличивается на 30—40%.

Зернистость алмазов в инструменте определяет число режущих элементов на его рабочей поверхности и влияет, при других заданных параметрах, на основные показатели, характеризующие износостойкость и режущие свойства алмазосодержащего слоя сегментных пил. Известно, что в зависимости от значения этих характеристик работоспособность инструмента на одной связке может меняться в широких пределах, что особенно ощутимо при резании твердых разновидностей природного камня.

Принятые для изучения сегментные пилы диаметром 320 мм конструкции ИСМ АН УССР на металлической связке МОЗ оснащались природными алмазами зернистостью 200/160, 315/250, 400/315, 500/400, 630/500 с концентрацией 50% [7].

Анализ зависимости удельного расхода алмазов от их зернистости (рис. 56, а) показывает, что для принятых условий эксперимента кривая $q = f$ (3) не имеет явно выраженного минимума. Так, если при увеличении зернистости в диапазоне 200/160 — 400/315 четко прослеживается тенденция к снижению удельного расхода алмазов, то в диапа-

зоне 500/400 — 630/500 наблюдается незначительное его увеличение. Характер полученной зависимости может быть объяснен с точки зрения влияния на износ алмазосодержащего слоя мелкодисперсных продуктов разрушения, характери-



56. Зависимость коэффициента уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения K_y , относительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой K_σ , удельного расхода алмазов q и износостойкости инструмента J от зернистости алмазов (а) и их концентрации (б).

зующегося коэффициентом уплотнения K_y , и прочности удержания зерен в связке, оцениваемой относительным коэффициентом напряжений K_σ . Расчеты показывают, что с увеличением зернистости алмазов растет толщина среза, снимаемого одним зерном, и следовательно, нагрузка и изгибающий момент на зерно, причем более интенсивно, чем поверхность сцепления зерна со связкой. В связи с этим относительный коэффициент напряжений с увеличением

зернистости алмазов имеет тенденцию к росту, за исключением зернистости 200/160, для которой он несколько выше минимальных значений.

Последний факт хорошо согласуется с характером изменения прочности зерен, определяющих число микровыкрашиваний рабочих зерен. Коэффициент уплотнения продуктов разрушения снижается при увеличении зернистости алмазов, что обусловливается увеличением объема межзеренного пространства за счет роста вылета зерен; объем выступающих алмазов практически не сказывается на величине K_y . Следовательно, уменьшение удельного расхода алмазов при увеличении их зернистости от 200/160 до 400/315 объясняется уменьшением коэффициентов K_y и K_σ , а незначительный рост удельного расхода алмазов при дальнейшем увеличении зернистости — более интенсивным ростом относительного коэффициента напряжений при некотором снижении коэффициента уплотнения.

Совместная оценка влияния двух указанных факторов на износ алмазонасного слоя позволяет также предположить, что увеличение зернистости более 630/500 приведет к повышению удельного расхода алмазов инструмента (для принятых в процессе экспериментов характеристик связки и технологических условий резания).

Рациональное значение зернистости алмазов соответствует 400/315 и 500/400, так как изменение удельной стоимости резания гранита по статье «инструмент» практически идентично изменению удельного расхода алмазов.

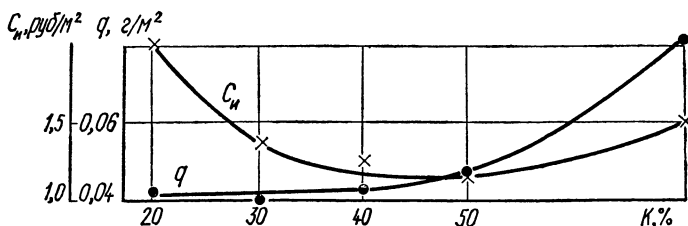
Исследованиями установлено, что для резания пород природного камня средней твердости и мягких рациональное значение зернистости алмазов находится в диапазоне 400/315 — 630/500, причем более мелкие фракции алмазных порошков целесообразно использовать в инструментах малых диаметров, работающих преимущественно в условиях высоких удельных нагрузок на рабочую поверхность, т. е. на операциях окантовки изделий.

Концентрация алмазов определяет насыщенность рабочей поверхности инструмента режущими элементами и влияет, при других постоянных параметрах, на основные показатели, характеризующие износостойкость алмазонасного слоя — удельные нагрузки, воспринимаемые каждым зерном, и коэффициент уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения.

Результаты исследований работоспособности алмазных

дисковых пил с различной концентрацией (20, 30, 40, 50, 75%) и зернистостью 400/315 свидетельствуют о том, что по режущим свойствам, оцениваемым возможными значениями производительности, они практически равноценны.

Износостойкость рабочей поверхности инструмента (рис. 56, б) по мере увеличения концентрации алмазов возрастает до ее значения 50%, после чего стабилизируется.



57. Зависимость удельного расхода алмазов q и удельных затрат по инструменту C_n от концентрации алмазов K .

Характер изменения износостойкости также объясняется приведенными на рис. 56, б зависимостями K_y и $K_\sigma = f(K)$.

Удельный расход алмазов (рис. 57) при увеличении концентрации от 20 до 50% возрастает незначительно, а при дальнейшем увеличении (до 75%) — почти в два раза.

Применительно к условиям эксплуатации камнерезного инструмента, при практически одинаковых его режущих свойствах, для выбора рационального значения концентрации алмазов удельный расход является недостаточным критерием, в связи с чем вводится показатель удельных затрат по инструменту C_n , определяемый его полной стоимостью, приведенной к одному квадратному метру площади резания:

$$C_n = \frac{Cq}{Q'}, \quad (\text{III.1})$$

где C — стоимость пилы, руб; Q' — масса алмазов в пиле, г; q — удельный расход алмазов, г/м².

Как видно из представленной на рис. 57 зависимости, несмотря на рост удельного расхода алмазов при увеличении их концентрации, показатель удельных затрат по инструменту имеет зону минимальных значений, соответствующую концентрации 40—50%.

Для процессов алмазно-дискового резания мраморов, доломитов, известняков и других подобных материалов

экономически целесообразно применять пилы с концентрацией алмазов 30—40%; большие ее значения оправданы в условиях обработки с большими продольными подачами при малых глубинах пропила, а также при значительных по величине окружных скоростях (>40 м/с).

3. Выбор технологических режимов резания

Одним из наиболее сложных вопросов исследования работы алмазных дисковых пил является установление рациональных технологических режимов резания (окружная скорость V_o , скорость подачи V_n , глубина пропила H_p), заключающегося в многообразии факторов, влияющих на работоспособность инструмента в целом.

Окружная скорость резания определяет производительность процесса разрушения и при других заданных условиях влияет на износостойкость алмазоносного слоя. Особенно ощутимо влияние окружной скорости при резании твердых разновидностей природного камня (гранита, лабрадорита и др.). В качестве примера можно привести результаты применения алмазных пил диаметром 400, 500 мм различных конструкций на БЭИКЗ. При резании гранитов на станках итальянской фирмы «Грегори», на которых в первоначальном варианте окружная скорость составляла 50—60 м/с, стойкость инструмента зачастую не превышала одной-двух смен, в то время как при нормальных условиях эксплуатации она должна быть не менее 0,5—1,0 мес.

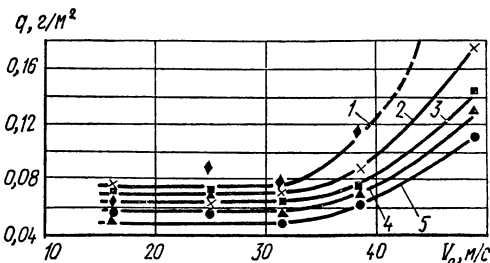
При проведении экспериментов прежде всего важно установить влияние окружной скорости на износостойкость инструмента (удельный расход алмазов), сохранив при варьировании ее значений постоянными возможно большее число других определяющих параметров.

Для абразивных способов резания износостойкость инструмента зависит от двух основных параметров: средней толщины единичного среза $a_{ср}$ и суммарного пути трения $\Sigma l_{тр}$. В свою очередь средняя толщина среза, как видно из выражений (II. 49), (II. 50), определяет толщину среза, снимаемого одним зерном, силы, действующие на зерна, а также факторы, непосредственно влияющие на износ, — уплотнение продуктов разрушения и напряжения, возникающие в месте контакта зерна со связкой. Во время

эксперимента значение средней толщины единичного среза выдерживалось постоянным, обеспечивая тем самым постоянство пути трения.

Исследованиями установлено, что при резании лабрадора изменение окружной скорости в диапазоне 10—30 м/с для различных средних значений толщины единичного среза не влияет на величину удельного расхода алмазов (рис. 58). Дальнейшее увеличение окружной скорости ре-

58. Зависимость удельного расхода алмазов q от окружной скорости резания V_0 лабрадора пилой АПСП-320 (АСК 400/315, Ж1, 35%) с различными значениями средней толщины среза $a_{ср}$, мкм: 1 — 13,6; 2 — 10,8; 3 — 5,4; 4 — 4,3; 5 — 8,6



зания приводит к росту кривой удельного расхода алмазов, что можно объяснить одним из возможных факторов — ухудшением условий охлаждения рабочей поверхности инструмента.

При резании гранита зона минимальных значений удельного расхода алмазов ограничивается 25 м/с (рис. 59), что также обусловлено изменением условий охлаждения алмазоносного слоя.

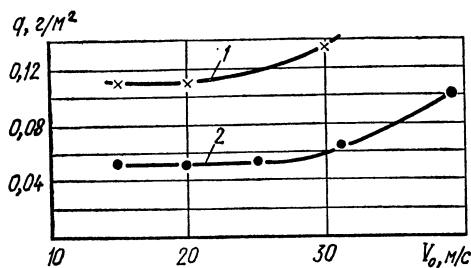
Следует также учитывать, что с увеличением окружной скорости резания возрастает роль динамического эффекта, степень воздействия которого на рабочую поверхность инструмента будет зависеть от свойств алмазных зерен. Влияние этого фактора отмечается в ряде работ по абразивной обработке материалов и учитывается через коэффициент динамичности.

Подтверждением этому может служить представленная на рис. 59 зависимость, согласно которой при резании гранитов пилами, импрегнированными алмазами прочностью 3—4 кгс, их удельный расход при увеличении окружной скорости интенсивно растет, начиная с $V_0 = 20$ м/с.

Следовательно, в целях повышения износостойкости инструмента и производительности процесса резания при увеличении твердости обрабатываемого материала алмазо-

носный слой следует оснащать алмазами более высокой прочности и термостойкости.

При резании пород природного камня средней твердости и мягких (мрамор, доломит, известняк и др.) окружная скорость резания менее ощутимо сказывается на износ алмазоносного слоя и для указанных материалов ее рациональное значение составляет 30—40 м/с.



59. Зависимость удельного расхода алмазов q от различной прочностью зерен P_p от окружной скорости резания V_0 гранита: 1 — $P_p = 4$; 2 — $P_p = 8 \div 10$ кгс.

Сопоставляя результаты исследований, можно ожидать, что верхний предел окружной скорости для устойчивой зоны минимальных значений удельного расхода алмазов будет уменьшаться с увеличением твердости обрабатываемых материалов.

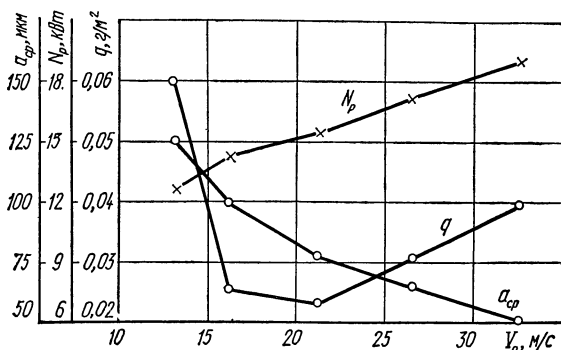
Таким образом, при условии сохранения постоянной средней толщины единичного среза окружная скорость резания существенно влияет на удельный расход алмазов, который растет при ее увеличении. Однако с увеличением окружной скорости при $a_{ср} = \text{const}$ растут и возможные значения производительности резания, в связи с чем, выбирая рабочие значения V_0 , следует исходить из комплексной оценки влияния удельного расхода алмазов и производительности на экономичность процесса.

Исходя из практики применения алмазных пил, для резания твердых разновидностей природного камня следует рекомендовать в качестве рациональной $V_0 = 20—25$ м/с. Подтверждением данному выводу могут служить результаты экспериментов по уточнению рационального значения окружной скорости применительно к условиям резания гранодиорита ($\sigma_{сж} = 2200$ кгс/см², $a = 50$ мг) в технологии поточно-механизированного изготовления ступеней на Шархинском карьере.

На выбранной и выдерживаемой постоянной производительности резания 1000 см²/мин ($V_{п} = 800$ мм/мин,

$H_p = 125$ мм) изучалась работоспособность алмазной дисковой пилы диаметром 500 мм (А/АСС 400/315, МОЗ, 50%) в диапазоне изменения окружной скорости 13—33 м/с.

Из представленных на рис. 60 зависимостей следует, что кривая изменения удельного расхода алмазов имеет зону явно выраженного минимума, соответствующего значениям окружной скорости 17 и 21 м/с.



60. Зависимость удельного расхода алмазов q , мощности резания N_p и средней толщины единичного среза $a_{ср}$, снимаемого пилой, от окружной скорости резания V_0 гранодиорита.

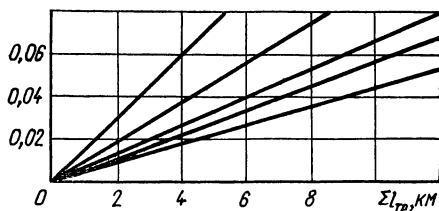
Значительный рост удельного расхода алмазов в левой от минимума области объясняется повышением удельных нагрузок на рабочую поверхность инструмента, создаваемых мелкодисперсными продуктами разрушения, под воздействием которых происходит интенсивный износ связки и постоянное обновление алмазоносного слоя. Изучение состояния рабочей поверхности инструмента показало, что на алмазах практически отсутствуют площадки износа, что в общем не характерно для процессов резания твердых пород камня. Увеличение удельного расхода алмазов в правой от зоны минимума области объясняется термомеханическими явлениями, возникающими в процессе взаимодействия алмазов с обрабатываемым материалом, о чем свидетельствует появление и рост площадок износа на рабочих зернах.

В изученном диапазоне изменения окружной скорости резания при ее увеличении наблюдается практически пропорциональный рост мощности резания при существенном

уменьшении среднего значения толщины среза $a_{\text{ср}}$, снимаемого пилой, что обуславливается в первую очередь изменением состояния рабочих зерен.

Скорость подачи — один из основных режимных параметров резания, определяющих эффективность работы инструмента. Как следует из аналитических выражений (II. 49) — (II. 51), (II. 56), (II. 57), (II. 78), (II. 92), вы-

Δh , мм



61. Зависимость износа алмазоносного слоя Δh от суммарного пути трения $\Sigma l_{\text{тр}}$.

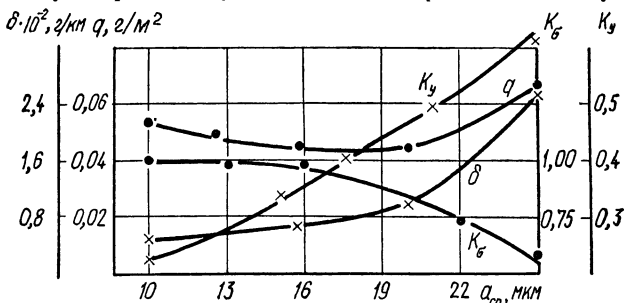
веденных ранее, при $V_0 = \text{const}$ и прочих постоянных условиях скорость подачи влияет на толщину единичного среза, путь трения, толщину среза, снимаемого одним зерном, силы на зерне, на коэффициент уплотнения K_y и напряжения, возникающие в месте контакта зерна со связкой. В процессе проведения экспериментов окружная скорость резания принята равной 21 м/с; выбранная характеристика алмазоносного слоя пилы диаметром 320 мм А 400/315, МОЗ, 50%.

Установлено, что с увеличением пути трения износ алмазоносного слоя пропорционально растет (рис. 61). Удельная величина массового износа алмазоносного слоя изменяется в зависимости от средней толщины единичного среза по кривой второго порядка (рис. 62); интенсивный рост удельного износа характерен для области более высоких значений $a_{\text{ср}}$.

Анализ зависимостей, отражающих совместное влияние средней величины толщины единичного среза и пути трения на удельный расход алмазов, свидетельствует о наличии зоны его минимальных значений, которые соответствуют определенному диапазону скоростей подачи. Так, для принятых условий эксперимента эта зона соответствует $a_{\text{ср}} = 13\text{—}19$ мкм, $\Pi = 150 \div 240$ см²/мин, а для лабраторита $\Pi = 250\text{—}350$ см²/мин. Удельный расход алмазов растет более интенсивно при увеличении скорости подачи от ее рациональной зоны.

Для объяснения установленных закономерностей рассмотрим на примере резания гранита характер изменения основных параметров, определяющих износостойкость инструмента.

Прежде всего для заданных условий эксперимента суммарный путь трения с увеличением скорости подачи умень-



62. Зависимость удельного расхода алмазов q , удельного пути трения (δ), коэффициента уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения K_y и относительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой K_σ от средней толщины единичного среза $a_{ср}$, снимаемого пилой.

шается. Согласно выражению (II.49) толщина среза, снимаемого одним зерном, незначительно уменьшается при увеличении скорости подачи, а силы, действующие на зерно, уменьшаются, несмотря на увеличение средней толщины единичного среза.

Анализ расчетных зависимостей показал, что уменьшение силы резания на зерне в первую очередь вызвано уменьшением размеров площадок износа зерен при возрастании степени воздействия мелкодисперсных продуктов разрушения на связку.

Относительный коэффициент напряжений при увеличении скорости подачи в диапазоне значений производительности резания 75—150 см²/мин практически не изменяется, а при дальнейшем увеличении существенно уменьшается. Следовательно, с точки зрения долговечности удержания зерен связкой при увеличении скоростей подачи условия работы алмазоносного слоя улучшаются.

При совместном влиянии всех параметров характер изменения удельного расхода алмазов при увеличении скорости подачи можно объяснить следующим образом.

Рост удельного расхода алмазов в левой части кривой $q = f(\Pi)$ обуславливается увеличением суммарного пути трения, так как коэффициент уплотнения продуктов разрушения снижается при практически не изменяющемся относительном коэффициенте напряжений. Рост кривой в правой ее части объясняется главным образом увеличением коэффициента уплотнения, так как все другие параметры ($\Sigma l_{\text{тр}}$, K_{σ}) уменьшаются. Важно отметить, что интенсивный износ алмазоносного слоя происходит начиная со значений $K_y > 0,5$.

Минимум зависимости $q = f(\Pi)$ характеризует оптимальное сочетание совместного влияния на износ рабочей поверхности инструмента суммарного пути трения, мелкодисперсных продуктов разрушения и удельных нагрузок на зерна.

Таким образом, при резании гранитов алмазными дисковыми пилами скорость подачи, определяющая производительность процесса разрушения, существенно влияет на один из основных показателей работоспособности — удельный расход алмазов. На основании практики окантовки изделий из гранита, экономичность которой определяется в основном затратами по инструменту, рациональная зона скоростей подач выбирается, исходя из производительности процесса 150—250 см²/мин.

С точки зрения практического использования результатов проведенных экспериментов необходимо отметить, что при применении алмазных пил следует особенно тщательно подходить к вопросу соблюдения граничных условий скорости подачи (производительности), так как незначительное отклонение ее от рациональной зоны ведет к интенсивному росту удельного расхода алмазов.

Таким образом, в результате исследований влияния режимов резания гранита на работоспособность инструмента установлены закономерности изменения одного из основных показателей — удельного расхода алмазов от окружающей скорости резания и скорости подачи; сущность зависимостей хорошо объясняется с позиций принятых в работе критериев оценки износа алмазоносного слоя. Анализ полученных результатов позволил определить рациональные значения режимных параметров резания гранита: $V_0 = 20—25$ м/с; $\Pi = 150—240$ см² (для пил диаметром 320, 400 мм). В практике обработки природного камня по вопросу выбора способа резания алмазными пилами (на всю глу-

бину за один проход или мелкими заходками), что особенно важно применительно к твердым разновидностям камня, существующие представления противоречивы.

Результаты работ отдельных исследователей свидетельствуют о преимуществах резания за один проход, хотя и не конкретизируется верхний предел глубины однопроходного резания. Отдельные авторы не усматривают различия в рассматриваемых способах.

Однако в практической деятельности многие предприятия в силу традиционно унаследованных методов придерживаются мнения о целесообразности ведения процесса резания твердых пород камня многопроходным способом с глубиной пропила до 5 мм.

Следует отметить, что в имеющихся работах по рассматриваемому вопросу не дается объяснений многим факторам, влияющим на эффективность резания дисковым инструментом.

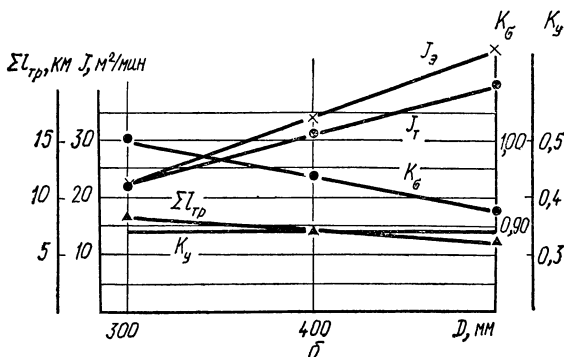
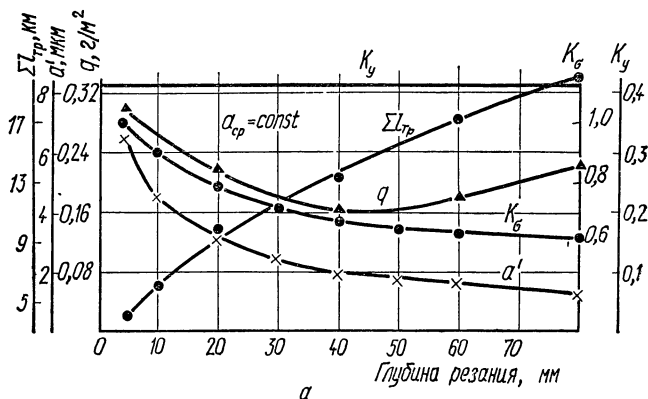
В качестве основного методического условия в процессе исследований выдерживалась постоянная техническая производительность резания гранита, определяющая значение V_{π} при варьировании глубины пропила, — 100 см²/мин.

Условие постоянства производительности резания позволяет сохранить постоянной среднюю толщину единичного среза, снимаемого пилой, т. е. одного из параметров, широко используемого для оценки износа инструмента [11].

Исследования показали (рис. 63, а), что при резании гранита с различной глубиной пропила четко прослеживается зона минимального удельного расхода алмазов в диапазоне $H_p = 30—50$ мм. При этом удельный расход алмазов растет более интенсивно при уменьшении глубины резания до 5 мм, чем при ее увеличении до 80 мм. Характерно, что в исследуемом диапазоне глубин резания потребляемая мощность практически не изменяется. В данном случае, при равной величине производительности резания, а следовательно, и объема разрушенной породы, полученный вывод согласуется с известным законом Кирпичева — Кика о пропорциональной зависимости объема разрушения и энергоемкости процесса.

Приведенные на рис. 63, а кривые изменения других параметров позволяют объяснить сущность зависимости $q = f(H_p)$. Так, при $K_y = \text{const}$ и уменьшающемся K_{σ} с ростом H_p характер правой части кривой хорошо объясняется

изменением пути трения и возможным повышением при этом роли теплового эффекта. Интенсивный рост удельного расхода алмазов в области малых глубин резания (до 5 мм)



63. Зависимость суммарного пути трения $\Sigma l_{тр}$, толщины среза a' , снимаемого одним зерном, удельного расхода алмазов q , износостойкости J , коэффициента уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения K_y и относительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой K_σ от глубины однопроходного резания (a) и диаметра инструмента (D).

обуславливается прежде всего увеличением относительного коэффициента напряжений, увеличением удельных нагрузок на зерна, так как $\Sigma l_{тр}$ имеет тенденцию к снижению при $K_y = const$. Рост удельных нагрузок на зерна при уменьшении глубины резания в свою очередь вызван значительным увеличением толщин среза, снимаемого каждым зер-

ном. Как показывают расчеты, при уменьшении глубины резания с 80 мм до 5 мм толщина среза, снимаемого каждым зерном, увеличивается до пяти раз.

Анализ результатов исследований при резании лабрадорита ($\sigma_{сж} = 1400$ кгс/см², $a = 15$ мг) показал, что износостойкость инструмента с увеличением глубины однопроходного резания практически не изменяется. Полученный вывод имеет практическую значимость прежде всего потому, что доказывает принципиальную возможность осуществления прогрессивной технологии изготовления тонких облицовочных плит из лабрадорита по многодисковой схеме, связанную с применением алмазных пил для резания на большую глубину за один проход — до $0,3 D$.

4. Влияние диаметра инструмента и схемы резания на износостойкость алмазоносного слоя

Диаметр инструмента прежде всего влияет на ряд параметров, определяющих его износостойкость: толщину среза, снимаемого одним зерном, дугу контакта, путь трения (при условии постоянства технологических режимов резания). Кроме того, в применяемых конструкциях пил с изменением их диаметра в целом изменяется и ширина алмазоносного слоя, т. е. алмазоемкость его полезно используемого объема, что диктуется необходимостью выдержать определенные соотношения между этим параметром и толщиной полотна и в конечном итоге обуславливается его жесткостью.

В силу указанных факторов установление влияния диаметра инструмента и толщины алмазоносного слоя на его износостойкость имеет существенное значение для правильного выбора технологических схем обработки и оценки их эффективности.

При проведении экспериментов в качестве основного условия принято постоянство производительности процесса резания ($P = 150$ см²/мин), обеспечивающее $a_{ср} = \text{const}$ для всех изучаемых вариантов резания инструментами различных диаметров. Окружная скорость выбрана равной 21 м/с, глубина резания 30 мм; схема работы «против подачи». К изучению приняты пилы диаметром 320, 400, 500 и 800 мм с характеристикой А 400/315, МОЗ, 50%.

Рассмотрим вопрос о влиянии диаметра инструмента на его износостойкость. Количественное значение изменяющихся

параметров, определяемых поставленным условием и рассчитанных по разработанным аналитическим зависимостям, приведено в табл. 23.

Как видно из таблицы, при увеличении диаметра инструмента суммарный путь трения каждой точки пилы уменьшается, несмотря на увеличение дуги контакта.

Т а б л и ц а 23

Значение кинематических параметров резания для различных диаметров пил

D, мм	Угол контакта, Φ_H		Длина дуги контакта, l_K , мм	Суммарный путь трения, $\Sigma l_{тр}$, км	Толщина среза, снимаемого одним зерном, a' , мкм
	град	рад			
320	35°40'	0,622	99,5	8,3	12,1
400	31°50'	0,556	111,2	7,4	10,4
500	28°20'	0,494	123,5	6,6	9,2
800	22°20'	0,390	156,0	5,2	7,4

П р и м е ч а н и е. Средняя толщина среза $a_{ср}$ у пил данных диаметров равна 12,5 мкм.

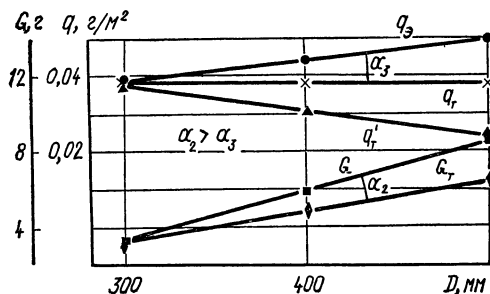
Средняя толщина единичного среза, снимаемого пилой, зависящая от режимных параметров, не изменяется в изучаемом диапазоне диаметров инструмента, однако при постоянной производительности резания и увеличивающейся длине дуги контакта уменьшаются толщина среза, снимаемого одним зерном, силы на зёрна и, как следствие, коэффициент напряжений K_{σ} .

Коэффициент уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения остается постоянным при изменении диаметра инструмента. Степень воздействия K_{σ} и $\Sigma l_{тр}$ показана на рис. 63, б, из которого следует, что с увеличением диаметра инструмента кривая теоретической износостойкости I_T расположена ниже экспериментальной. Отметим, что теоретическое значение износостойкости рассчитывалось, исходя из рабочей длины алмазосносного слоя для различных диаметров без учета влияния $\Sigma l_{тр}$, приняв за начальный диаметр 320 мм.

Следовательно, повышение износостойкости рабочей поверхности инструмента при увеличении его диаметра обуславливается уменьшением суммарного пути трения и от-

носительного коэффициента напряжений в месте контакта зерна со связкой.

Влияние другого параметра, связанного с изменением диаметра инструмента — ширины алмазонасного слоя, — проанализируем на основании данных, приведенных на рис. 64. Для объяснения характера зависимости удельного расхода алмазов от диаметра инструмента представлены



64. Изменение массового содержания алмазов G в пиле и их удельного расхода q в зависимости от диаметра инструмента.

кривые изменения массового содержания алмазов для изучаемых пил G и пил с одинаковой шириной алмазонасного слоя G_t , соответствующей ширине инструмента диаметром 320 мм. Разница угловых коэффициентов этих кривых, условно обозначенная на графике α_2 , будет характеризовать относительный рост алмазоемкости пил при увеличении их диаметра. При отсутствии влияния на фактический удельный расход алмазов q_3 суммарного пути трения и относительного коэффициента напряжений теоретически удельный расход инструмента с одинаковой шириной алмазонасного слоя изменялся бы аналогично изменению относительной алмазоемкости. Однако приведенные на рис. 64 данные свидетельствуют о том, что угловой коэффициент между зависимостями q_3 и $q_t = f(D)$, условно обозначенный α_3 , меньше α_2 . Это может служить подтверждением тому, что для принятого режимного поля степень воздействия $\Sigma l_{\text{тр}}$ и K_0 на процесс износа рабочей поверхности инструмента меньше, чем ширины алмазонасного слоя.

При форсированных режимах резания роль пути трения и нагрузок на зерна значительно возрастает и в отдельных

случаях может привести к тому, что изменение диаметра и толщины сегментов не будет существенно сказываться на удельном расходе алмазов. В связи с этим, когда применение инструмента больших диаметров вызвано технологической необходимостью, процесс резания целесообразно вести на режимах, близких к предельным.

Т а б л и ц а 24

Показатели удельного расхода алмазов для различных схем резания

Скорость подачи, мм/мин	Производительность, см ³ /мин	Объем выработанной работы, м ³	Износ алмазоносного слоя по высоте, мм	Износостойкость, м ³ /мм	Удельный расход алмазов		Мощность резания, кВт
					г/м ²	%	
315	126	2,74	0,244	11,23	0,15	100	5,25
		2,52	0,278	9,06	0,18	123	5,15
400	160	1,56	0,222	7,03	0,24	100	6,40
		1,32	1,976	6,74	0,25	105	5,55
500	200	1,22	1,182	6,70	0,25	100	6,15
		1,72	0,304	5,66	0,29	119	6,15

Примечание. В числителе приведены данные резания «против подачи», в знаменателе — «по подаче».

Таким образом, из анализа проведенных исследований следует, что эффективность процесса окантовки изделий повышается с увеличением диаметра инструмента при сохранении постоянной ширины алмазоносного слоя. В этом случае уменьшаются суммарный путь трения и удельные нагрузки на зерна. Последнее обстоятельство свидетельствует также о том, что с увеличением диаметра инструмента возникают реальные резервы повышения производительности резания.

Схема резания («по подаче» и «против подачи») практически не сказывается на основных кинематических параметрах рабочего процесса (дуге контакта инструмента с изделием, толщине среза), однако при этом изменяется направление результирующей силы резания, а также условия процесса разрушения. Так, при резании «по подаче» вертикальная составляющая силы резания направлена вниз, что создает благоприятные условия для крепления обрабатываемого материала и обеспечения его устойчивости.

Сила подачи для этой схемы будет значительно меньше, чем при обратной схеме, а при определенных условиях она может быть близкой к нулю или способствовать подаче. Уменьшаются при этом также сколы боковых кромок, что особенно важно при изготовлении изделий, предназначенных для внутренней облицовки. В связи с этим схема резания «по подаче» широко используется в практике камнеобработки. Необходимо отметить, что при данной схеме процесс резания более динамичен и сопровождается значительными ударными нагрузками на зерна, так как в этом случае резание начинается с максимальных толщин среза. При этом степень воздействия указанного явления на процесс износа алмазонаосного слоя будет возрастать с увеличением скорости подачи и твердости обрабатываемого материала.

Экспериментальные исследования проводились при резании гранита Жежелевского месторождения пилой АПДС-400, АСК 315/250, Ж, 50%, $V_o = 21$ м/с, $H_p = 40$ мм. Условия экспериментов и полученные при этом результаты представлены в табл. 24.

Как следует из приведенных данных, при схеме работы «по подаче» удельный расход алмазов больше, чем при схеме «против подачи» в среднем на 15%, а энергозатраты практически равнозначны. В зависимости от скорости подачи указанные соотношения не нарушаются.

Таким образом, применительно к алмазному инструменту влияние схемы резания при обработке гранита Жежелевского месторождения можно считать незначительным как по износостойкости, так и по энергоемкости разрушения.

5. Влияние длины сегмента на работоспособность инструмента

Одно из важных направлений совершенствования алмазных дисковых пил — исследование влияния их конструктивных параметров на работоспособность алмазонаосного слоя, в первую очередь длины сегментов и расстояний между ними, применительно к условиям резания различных по свойствам строительных материалов.

Анализ современного состояния этой проблемы показывает, что в отечественной и зарубежной практике используются преимущественно инструменты с одинаковыми размерами и геометрическими формами элементов рабочей

поверхности, причем отсутствуют какие-либо сведения, относящиеся к углубленной проработке и обоснованию их рациональных конструктивных параметров. В то же время всесторонняя оценка влияния этих параметров на механику взаимодействия алмазонасного слоя с обрабатываемым материалом во взаимосвязи с факторами, сопутствующими процессу разрушения, свидетельствует о больших резервах повышения эффективности применения дисковых пил при положительном решении рассматриваемых вопросов. Изменение основных размеров и формы рабочих элементов пилы значительно сказывается, с одной стороны, на величине кинематических и других параметров, определяющих процесс резания, — толщине среза, снимаемого одним зерном, коэффициенте напряжений в месте контакта зерна со связкой и, с другой — на условиях подачи охлаждающей жидкости в контактную зону, размещении и транспортировке взвешенных частиц шлама. Можно утверждать, что влияние указанных факторов существенно для всех условий применения алмазно-дисковых способов резания природного камня, причем ощутимых результатов по сравнению с показателями работоспособности существующих конструктивных исполнений инструмента, по-видимому, следует ожидать в первую очередь в процессах, сопровождающихся большими объемами разрушения материалов, характеризующихся высокими абразивными свойствами.

Остановимся на предварительных результатах одного из этапов комплексной программы изучения работоспособности пяти алмазных дисковых пил диаметром 630 мм с различной длиной сегментов и постоянными расстояниями между ними при резании базальта с пределом прочности на одноосное сжатие 2400 кгс/см^2 и абразивностью 50 мг. Равенство межсегментных расстояний, вызванное стремлением сохранить с максимальным приближением одинаковые условия подачи охлаждающей жидкости в зону резания, предопределило также различия в общей длине алмазонасного слоя для всех изучаемых вариантов дисковых пил с одной и той же его характеристикой (АСК 400/315, МЗ, 35%). Весь комплекс экспериментов выполнен на стенде, созданном на базе продольно-фрезерного станка модели 6622 и оснащенном самопишущим ваттметром Н-383. Резание осуществлялось «по подаче» с глубиной пропила 125 мм. Работоспособность инструментов оценивалась производительностью, износостойкостью (удельным расходом алмазов)

и энергоемкостью процесса резания. Износостойкость определялась как результат деления объема выполненной работы в квадратных метрах площади резания на линейный износ алмазосносного слоя по высоте Δh , определяемый микрометром с точностью $\delta = 0,01$ мм. Для получения погрешности конечного результата не более $f = 10\text{--}15\%$ объем резания принимался равным такой величине, чтобы линейный износ составлял не менее 0,1 мм:

$$\Delta h = \frac{2\delta}{f} \cdot 100\% = 0,1 \text{ мм.}$$

Для замера износа алмазосносного слоя по радиусу инструмента без снятия его со шпинделя станка изготовлено специальное микрометрическое устройство, а в корпусах пил на двух взаимно перпендикулярных диаметрах высверливалось по четыре отверстия диаметром 8 мм.

В процессе экспериментов изучалось также состояние рабочей поверхности алмазного слоя пил АПС-630, АСК 400/315, МЗ, 35% по методике, приведенной в предыдущих разделах, при $V_0 = 33$ м/с и $H_p = 125$ мм. Условия и результаты выполненных исследований представлены в табл. 25.

Анализ полученных данных позволяет сформулировать основные положения, подлежащие учету в процессе последующей углубленной проработки и решения задачи обоснования рациональных конструктивных параметров алмазных дисковых пил в зависимости от различных технологических условий обработки.

Один из основных показателей работоспособности инструмента, удельный расход алмазов, при уменьшении длины сегмента незначительно увеличивается при $V_n = \text{const}$. Уменьшение производительности резания пилами с l_c равной 7 и 21 мм на величину, обеспечивающую примерное равенство отношения объема разрушенного материала к общей длине алмазосносного слоя, по сравнению с другими конструктивными вариантами инструментов привело к некоторому уменьшению этого показателя. Важно отметить, что для первых трех конструктивных исполнений инструмента рост удельного расхода алмазов сопровождается, при практически равнозначных вылетах зерен \bar{b} и площадках износа Δ , некоторым увеличением толщин среза, снимаемого одним зерном, с 2,7 до 3,5 мкм; величина K_y не претерпевает существенных изменений (0,48; 0,50 и 0,53).

Т а б л и

Результаты исследования работоспособности алмазных дисковых пил с

Конструктивные параметры			Скорость подачи, мм/мин	Объем наблюдений, квадратные метры площади резания	Износ алмазового слоя по радиусу, мм
l_c , мм	L_a , мм	z , шт			
50	1700	34	800	16,3	0,12
35	1610	46	800	12,4	0,13
50	1450	29	800	8,5	0,11
21	1428	68	800	9,6	0,12
21	1428	68	630	8,4	0,11
7	952	136	800	6,6	0,14
7	952	136	500	11,7	0,19

Следовательно, в данном случае объяснение установленному факту — изменение величины a' и связанных с ней других определяющих параметров. Для пил с $l_c = 21$ и 7 мм при $V_{\pi} = 800$ мм/мин рост удельного расхода алмазов объясняется главным образом увеличением коэффициента уплотнения K_y .

Обобщая полученные данные, следует подчеркнуть, что при достаточных прочности алмазных зерен и алмазостойкости инструмента для условий обработки абразивных пород природного камня преобладающее влияние на износ рабочей поверхности инструмента будет оказывать степень воздействия на нее мелкодисперсных продуктов разрушения, оцениваемых величиной K_y , причем наиболее интенсивно начиная с $K_y > 0,5$.

Энергоемкость резания со скоростью подачи 800 мм/мин при уменьшении длины сегментов и общей алмазостойкости инструмента также имеет тенденцию к уменьшению. При этом минимальное ее значение ($2,3$ (кВт·ч) /м²) получено для инструмента с наименьшей длиной сегмента ($l_c = 7$ мм), показавшего самый большой удельный расход алмазов. Это объясняется главным образом благоприятным сочетанием толщины среза, снимаемого одним зерном, и геометрических форм режущих элементов, определяющим процентное соотношение хрупкого разрушения и упруго-пластического деформирования в процессе резания — царапания, а также небольшим сопротивлением материала внедрению зерен, так как размер площадок затупления для них незначителен.

различной длиной сегментов и одинаковыми расстояниями между ними

Удельный расход алмазов, г/м ²	Энергоемкость резания (кВт·ч)/м ²	Параметры состояния рабочей поверхности инструмента, мкм		a' , мкм	K_y
		\bar{b}	Δ		
0,018	3,5	77	98	2,7	0,48
0,024	3,0	80	101	3,1	0,50
0,026	3,0	82	100	3,5	0,53
0,026	3,0	66	48	2,4	0,66
0,026	3,1	66	52	3,2	0,52
0,028	2,3	78	71	4,7	0,84
0,022	2,8	70	74	6,3	0,58

Из полученной зависимости также следует, что роль шлама, воздействие которого на алмазонасный слой может быть выражено через коэффициент уплотнения K_y , в формировании энергетических показателей резания не является определяющей.

Таким образом, перспективы инструментов с «короткими» сегментами, имеющих особо важное значение для практического использования их в многодисковых установках, заключаются прежде всего в небольших энергозатратах на резание и высокой производительности. Ведение процесса со значительными по величине скоростями подачи, как свидетельствуют полученные данные, является необходимым условием достижения минимальных значений мощности резания; при их уменьшении (резание с подачей 500 мм/мин) растут размеры площадок затупления и, как следствие, повышается и энергоемкость разрушения, в то время как удельный расход алмазов уменьшается вследствие уменьшения коэффициента уплотнения.

Установленные взаимосвязи кинематических и других параметров с показателями работоспособности являются, в отличие от распространенного мнения, еще одним подтверждением отсутствия прямой пропорциональной зависимости между износостойкостью и энергоемкостью в алмазно-абразивных способах резания.

**НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ,
ОСНАЩЕННЫХ СВЕРХТВЕРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ,
И ТЕХНОЛОГИЯ РЕЗАНИЯ**

**1. Алмазный инструмент с рациональной
конфигурацией рабочей поверхности**

Многолетний опыт эксплуатации алмазных дисковых пил, свидетельствующий о неполном использовании ресурсов алмазных сегментов, обусловленном неравномерным износом их рабочей поверхности, заставляет искать новые пути совершенствования конструктивного исполнения режущих инструментов.

Анализ состояния амортизированных инструментов показал, что в них всегда имеет место неиспользованный остаток алмазоносного слоя, причем величина его больше в задней по направлению вращения части сегмента. Единственным объяснением указанному явлению может служить наличие безалмазного промежутка в сегментных пилах, обуславливающее диспропорцию в нагрузках, воспринимаемых каждым рабочим элементом алмазоносного слоя.

Величина неиспользованной части амортизированных пил во многом зависит и определяется как конструктивными особенностями инструмента, так и условиями резания, определяемыми режимными параметрами и свойствами обрабатываемых материалов. Безусловно, величина таких потерь будет расти при интенсификации процессов обработки, определяющей удельные нагрузки на рабочую поверхность алмазоносного слоя.

Известны конструкции сегментных пил, у которых с целью улучшения условий охлаждения в рабочей зоне и загрузки передней в направлении вращения части сегментов они размещаются на различных диаметрах. Однако значительное по величине понижение передней по направлению вращения части элемента не обеспечивает равномерного распределения между всеми рабочими зернами тол-

щины снимаемой стружки, вызванного наличием безалмазного промежутка между элементами. Алмазные зерна, расположенные по передней в направлении вращения части элемента, при этом не участвуют в работе, а более нагруженной является задняя часть элемента, которая быстро изнашивается. Кроме того, величина этого понижения не увязана с режимными параметрами работы сегментной пилы, что делает весьма проблематичным получение должного эффекта от такого конструктивного исполнения.

Суть нового конструктивного решения рабочей конфигурации дискового инструмента с прерывистым алмазоносным слоем, обеспечивающего равномерное загрузку и износ каждого режущего элемента, базируется на учете всех факторов, определяющих кинематику и эффективность процесса резания [6].

В процессе эксплуатации алмазных дисковых сегментных пил инструменту сообщается окружная скорость V_0 и продольная подача $V_{\text{п}}$. В результате суммы этих движений каждое алмазное зерно на рабочей поверхности перемещается по удлинненной циклоиде.

На кинематической схеме работы пилы (рис. 65) можно выделить следующие участки: *I* — траектория последней точки предшествующего сегмента; *II* — траектория передней (по направлению вращения) точки рабочей поверхности сегмента, расположенной на диаметре D_1 ; *III* — траектория передней (по направлению вращения) точки рабочей поверхности сегмента, расположенной на диаметре D ; *IV* — траектория задней точки c_1 последующего сегмента.

При глубине резания H_p центральный угол участка, находящегося в контакте с обрабатываемым материалом, будет равен φ_h . При равномерном распределении алмазных зерен на рабочей поверхности на некотором расстоянии (центральный угол между зернами φ_3) каждое зерно снимает одинаковую по величине толщину стружки, определяемую по зависимости

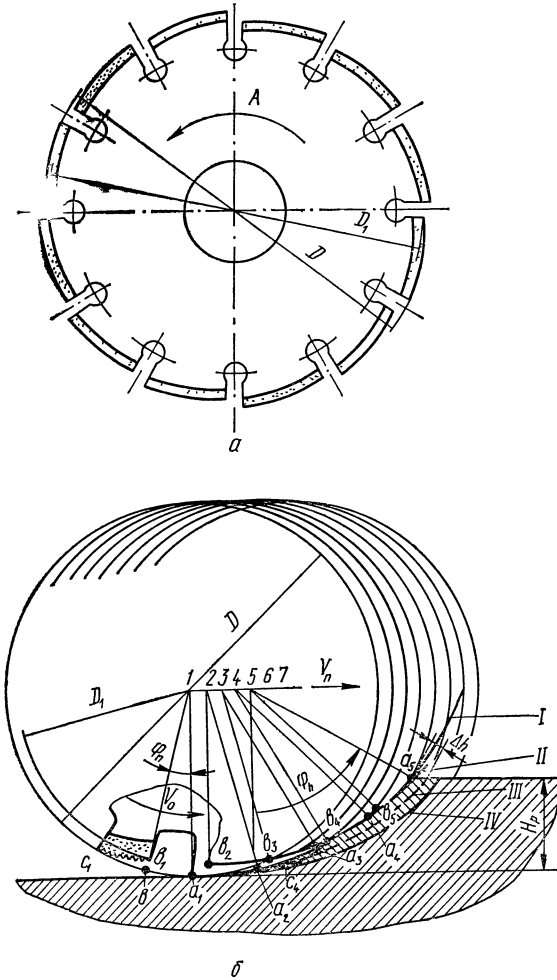
$$a' = \frac{DV_{\text{п}}\varphi_3 \sin \varphi_h}{120V_0} . \quad (\text{IV.1})$$

Однако в инструменте с прерывистым алмазоносным слоем, к которому относятся и дисковые сегментные пилы, имеется определенный безалмазный промежуток с центральным углом $\varphi_{\text{п}}$, благодаря чему толщина стружки, снимаемой зерном, расположенным на рабочей поверхности за пазом,

увеличивается на величину ΔH_p :

$$\Delta H_p = \frac{DV_n \varphi_n \sin \varphi_h}{120V_o} . \quad (IV.2)$$

Таким образом, если алмазное зерно находится на диаметре в следующей за пазом точке b , оно снимает стружку



65. Общий вид (а) и кинематическая схема (б) работы алмазной дисковой пилы с понижением сегментов по заданному уровню.

толщиной ΔH_p , а часть материала между траекториями III и IV равномерно снимается остальными зернами сегмента. Следовательно, алмазные зерна в этом случае нагружены неравномерно, что приводит к неравномерному износу рабочей поверхности алмазоносного слоя каждого сегмента и повышенному удельному расходу алмазов. Чтобы распределить несрезанный в связи с наличием безалмазного промежутка материал между всеми зернами рабочей поверхности сегмента, необходимо переднюю (по направлению вращения) часть элемента расположить на диаметре

$$D_1 = D - 2\Delta H_p. \quad (\text{IV.3})$$

После элементарных преобразований эта формула имеет вид

$$D_1 = \frac{D}{60V_o} (60V_o - V_{пфп} \sin \varphi_h). \quad (\text{IV.4})$$

В этом случае точка b_1 опишет траекторию II, близкую к траектории I, в результате чего величина снимаемого слоя будет равномерно распределена между алмазными зернами, расположенными на элементе. Это позволяет уменьшить вибрацию пилы и повысить коэффициент использования алмазоносного слоя. Ориентировочные расчеты показывают, что данным конструктивным решением может быть достигнута экономия алмазного сырья на каждой пиле до 5—10%.

2. Алмазный инструмент для окантовки твердых разновидностей природного камня

Особенность операции окантовки — относительно малая глубина резания (20—50 мм) и большие удельные нагрузки на режущую поверхность. Для окантовки твердых разновидностей природного камня обычно используют алмазные пилы диаметром 320, 400 и 500 мм.

В результате проведенного исследования влияния диаметра инструмента на его износостойкость установлено, что для окантовки гранитов целесообразно использовать пилы увеличенного диаметра. В этом случае при соблюдении одинаковых режимных параметров удельная величина суммарного пути, проходящего каждой точкой (зерном) пилы, имеет тенденцию к уменьшению (см. табл. 22). В свою очередь, исходя из пропорциональности износа алмазоносного

слоя суммарному пути трения, можно заключить что это соответственно приведет к увеличению износостойкости инструмента в целом.

Следовательно, при сохранении постоянной толщины алмазосодержащего слоя с увеличением диаметра инструмента удельный расход алмазов в количественном отношении будет уменьшаться пропорционально изменению суммарного пути трения.

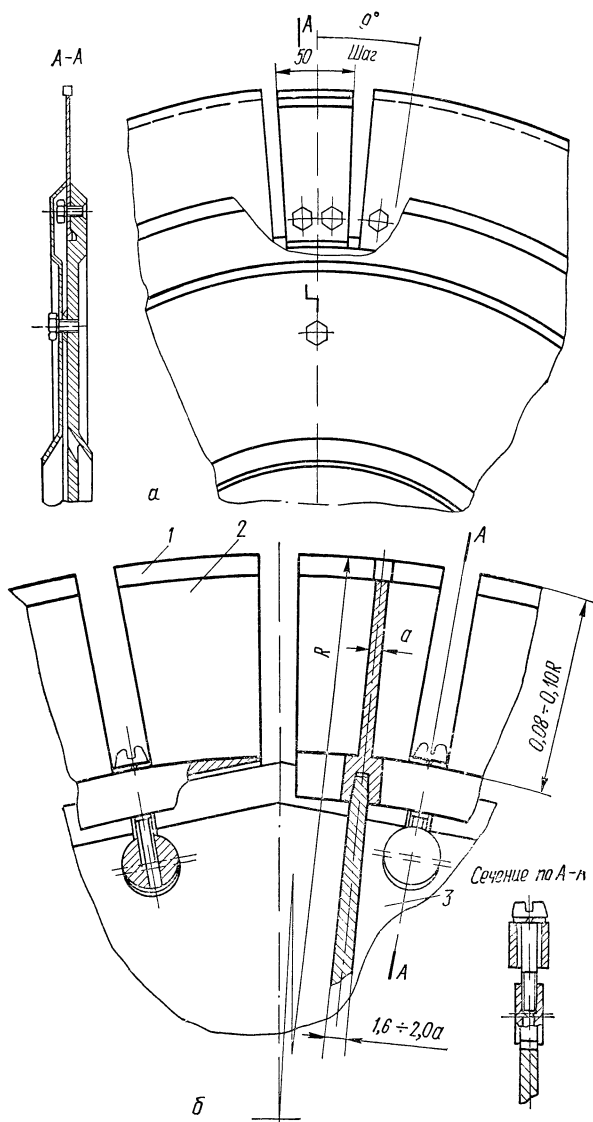
Необходимо отметить, что применение увеличенных диаметров обычных типов дискового инструмента нерационально, так как при этом растет и толщина алмазосодержащего слоя, что диктуется необходимостью выдержать определенные соотношения между этим параметром и толщиной полотна и в конечном счете обуславливается жесткостью корпуса. Экспериментально доказано, что влияние толщины алмазосодержащего слоя на удельный расход алмазов сказывается в большей степени, чем уменьшение суммарного пути трения.

Исходя из указанных предпосылок, разработана конструкция дискового инструмента для окантовки строительных материалов, на периферии которого закреплены сменные режущие элементы с абразивосодержащим слоем. Ширина корпуса в 1,6—2,0 раза больше ширины режущих элементов, а их длина составляет 0,08—0,10 радиуса инструмента.

Для практической реализации такой конструкции инструмента разработано два варианта крепления сменных режущих элементов к корпусу пилы, обусловленных стремлением к упрощению их замены в случае поломок или амортизации.

По первому варианту — пила диаметром 800 мм — промежуточные элементы с закрепленным на их периферии алмазосодержащим слоем крепятся к корпусу инструмента с помощью двух винтов (рис. 66, а). Головки винтов скрыты крышкой, которая одновременно служит своего рода коллектором для подачи жидкости в зону резания. С другой стороны на корпусе имеется конический буртик, также предназначенный для направленной подачи охлаждающей жидкости в рабочую зону и предотвращения ее разбрызгивания.

По второму варианту (рис. 66, б) — алмазный сегмент 1 закреплен на периферии сменных режущих элементов 2, которые соединены с корпусом инструмента 3 с помощью закладных штифтов и прижимных элементов. Алмазные



66. Конструкция алмазной пилы со сменными утоненными режущими элементами для окантовки изделий с боковым расположением резцов и водосборной емкостью для направленной подачи жидкости в зону резания (а) и центральным расположением резцов (б).

сегменты изготавливаются методом порошковой металлургии и закрепляются на периферии сменных режущих элементов посредством пайки. Для повышения надежности соединения режущих элементов с корпусом инструмента контактирующая поверхность по второму варианту крепления имеет клиновидное сечение.

Применение алмазных пил данной конструкции кроме уменьшения суммарного пути трения и возможностей повышения производительности резания имеет ряд других существенных преимуществ. Принцип съёмности алмазных резцов обеспечивает многократное использование корпуса пилы и взаимозаменяемость рабочих элементов в случае преждевременного выхода их из строя, что позволяет рассчитывать на получение значительного экономического эффекта, так как затраты на обработку и изготовление этих элементов в себестоимости инструмента составляют до 30%. Кроме того, высокая жесткость корпуса пилы позволяет уменьшить толщину державки резца, а следовательно, и толщину алмазонасного слоя, что в свою очередь обеспечивает снижение общей алмазоемкости рабочей поверхности инструмента.

Как показывает практика алмазно-дискового резания материалов, в инструментах обычного исполнения довольно часто низкая прочность их несущей основы не позволяет полностью использовать возможные ресурсы алмазонасного слоя.

В последнее время рядом зарубежных фирм предпринимаются попытки устранить указанные недостатки путем различных конструктивных решений, позволяющих производить замену алмазосодержащих сегментов при их износе или поломке. Характерным для них является соединение алмазосодержащего слоя с промежуточными элементами с помощью пайки и механическое закрепление последних на корпусе.

Например, известна конструкция алмазной дисковой пилы [75], в которой специальные промежуточные элементы соединяются с корпусом либо с помощью штифтов, либо посредством пайки. Для более прочного соединения промежуточных элементов с алмазосодержащими контактирующая часть первых подвергается специальной обработке в виде насечки, перфорации и т. д.

Данное конструктивное исполнение инструмента обеспечивает возможность надежного крепления алмазных

сегментов, однако затруднена их замена в случае необходимости. Оно не предусматривает также повторное использование корпуса и не располагает перспективами повышения производительности процесса резания, которые в данном случае аналогичны традиционным конструкциям алмазных дисковых пил и определяются многими фактора-

Т а б л и ц а 26

Результаты производственных испытаний алмазной дисковой пилы диаметром 500 мм со сменными утоненными режущими элементами

Обрабатываемый материал	Производительность резания, см ² /мин	Объем, м ²		Износ инструмента по радиусу, мм	Удельный расход алмазов, г/м ²		Удельный расход алмазов, приведенный к граниту второй категории, г/м ²	
		готовой продукции	площади резания		готовой продукции	площади резания	готовой продукции	площади резания
Гранит Корнинского месторождения	660—800	13,4	2,760	0,82	0,07	0,32	0,07	0,32
Гранит Емельяновского месторождения	470—480	6,0	1,09	0,45	0,08	0,45	0,06	0,33
Гранит Танского месторождения	520	4,4	2,00	0,18	0,04	0,10	0,04	0,20

ми, из которых решающее значение имеет толщина среза, снимаемого одним зерном.

Испытание созданной конструкции алмазной пилы диаметром 500 мм (АСС 400/315, МОЗ, 50% — 5,44 г) со сменными утоненными режущими элементами и шириной алмазосносного слоя $s = 2,6$ мм проводилось в производственных условиях киевского завода «Гранит» на станке модели СМР-015 при окантовке изделий из гранита месторождений УССР. Рабочий процесс осуществлялся однопроходным способом с глубиной пропила 3—5 см «по подаче». Замер износа алмазосносного слоя по радиусу инструмента проводился с помощью микрометрического глубиномера с точностью $\pm 0,01$ мм.

На протяжении всего периода испытаний инструмент сохранял постоянными режущие свойства для различных условий работы (табл. 26). Характерная особенность эксплуатации разработанной конструкции алмазной пилы — практически бесшумная работа. Для сравнительной оценки ее работоспособности были проведены хронометражные наблюдения за производительностью окантовки изделий

Т а б л и ц а 27

Показатели эксплуатации алмазных пил серийного производства

D, мм	Содержание алмазов в пиле, г	Израсходовано пил	Израсходовано алмазов		Окантовано продукции м ²	Удельный расход алмазов, г/м ²
		шт	шт	всего, г		
400	6,72	30	201,6		14255	0,1
500	10,02	135	1352,7	1554,3		

из гранита серийно выпускаемыми КБЗАИ пилами на связке М50 в тех же условиях и установлен средний фактический удельный расход алмазов на один квадратный метр готовой продукции за 10 месяцев 1977 г. (табл. 27).

Окантовка гранитных плит толщиной 3—5 см пилами КБЗАИ осуществляется в два прохода «против подачи» и «по подаче» со средней производительностью 240—260см²/мин. Следует отметить, что рабочий процесс при этом сопровождается периодической потерей инструментом режущей способности и необходимостью соответствующего «вскрытия» алмазного слоя.

Как следует из представленных в таблицах данных, по сравнению с существующим способом выполнения операции окантовки изделий из гранита применение специальной конструкции алмазных дисковых пил диаметром 500 мм позволяет:

повысить производительность обработки в два-три раза (в первую очередь за счет более полного использования установленной мощности привода вращения станка);

снизить удельный расход алмазов в 1,5—2,0 раза;

улучшить санитарно-гигиенические условия работы за счет значительного снижения уровня шума.

Экономический эффект от реализации указанной разработки составляет 2 руб. на один квадратный метр готовой продукции.

Исследованиями также установлено, что применение пил диаметром 800 мм с шириной алмазоносного слоя режущих элементов $s = 2,6$ мм при соответствующем увеличении мощности приводов вращения и подачи станка модели СМР-0.5 позволит существенно повысить производительность окантовки гранитных плит и, следовательно, экономический эффект.

Таким образом, выполненный комплекс исследовательских работ в лабораторных и производственных условиях подтвердил правильность заложенных принципов создания специальной конструкции алмазных инструментов для окантовки облицовочных изделий из твердых и других разновидностей природного камня и перспективность их реализации в промышленности строительных материалов с точки зрения интенсификации производственных процессов и повышения экономичности их осуществления.

3. Инструмент с ориентированным расположением рабочих элементов из сверхтвердых материалов

Разработка способов получения крупных поликристаллических и композиционных сверхтвердых материалов (баллас, корбонадо, исмит, гексанит и др.) открывает широкие перспективы их применения в дисковых инструментах с ориентированным расположением абразивных элементов для эффективной обработки строительных материалов. В отличие от импрегнированных алмазно-абразивных инструментов, режущие элементы которых в виде зерен располагаются на их рабочей поверхности случайным образом и размер их ограничивается величиной до 1 мм, использование больших агрегатов из сверхтвердых материалов значительно расширяет возможности интенсификации процессов резания. Успешное решение всех вопросов, связанных с созданием работоспособных конструкций дисковых инструментов и разработкой эффективных технологических процессов обработки на их основе, предполагает всестороннее изучение и полный учет всех факторов, определяющих резание, — геометрические формы и размеры рабочих элементов, способы и обеспечение надежности их закрепления, силовые параметры, износ, характеристики обрабатываемых материалов и др.

В практике обработки камня известны конструкции дискового инструмента для обработки камня (например патент ФРГ № 848477), в которых рабочая поверхность оснащается металлическими вставками, импрегнированными алмазными зернами. По своему содержанию такое исполнение инструмента предполагает осуществление процесса резания аналогично резцовому с меньшим, чем импрегнированный, диспергированием продуктов разрушения и пониженной энергоемкостью.

Однако расположение металлических вставок на рабочей поверхности инструмента не регламентируется их прочностью и свойствами обрабатываемого материала и не увязано с кинематическими параметрами резания, в связи с чем обеспечение должной эффективности в конкретном технологическом процессе становится проблематичным. Кроме того, геометрические формы рабочей поверхности выбраны без учета транспортировки и выноса продуктов разрушения, существенно влияющих на ее износ.

В такой постановке, примерно, конструктивно решен инструмент (патент США № 3513821), где в качестве рабочих элементов используются укороченные импрегнированные алмазные сегменты, расположенные на его рабочей поверхности со смещением, которое также не регламентируется основными параметрами, характеризующими эффективность процесса резания.

При разработке и обосновании конструкций дисковых инструментов с ориентированным расположением режущих элементов из сверхтвердых материалов в качестве исходных использованы основные положения, характеризующие кинематику процесса резания, свойства обрабатываемого материала и режущих элементов, параметры разрушения и конструктивные особенности рабочей поверхности инструмента. Исходя из этого для определения одного из основных конструктивных параметров — расстояния между режущими элементами по длине концентрических окружностей на цилиндрической поверхности инструмента — в качестве основных критериев выбора их рациональных значений принимались два параметра, зависящие от условий резания: критические напряжения разрушения элементов $\sigma_{кр}$ в опасном сечении (у основания их заделки в корпусе пилы) и коэффициент уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения. По первому из них величина l_3 рассчитывается в тех случаях, когда эффективность ра-

бочего процесса лимитируется главным образом прочностными характеристиками режущих элементов, т. е. применительно к условиям обработки более твердых разновидностей природного камня. Коэффициент уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения, служащий относительной мерой износа инструмента, является определяющим при назначении величины l_3 для процессов обработки мягких и абразивных пород природного камня с большими объемами разрушения.

Как известно, производительность алмазно-дисковых способов резания во многом зависит от конструктивных параметров инструмента, из которых прежде всего следует выделить выступание режущих элементов над уровнем опорной поверхности или связки. С увеличением вылетов растет возможная толщина стружки, снимаемой одним элементом, т. е. производительность обработки, что обуславливается размерами элементов, их прочностью и способом закрепления.

Исследованиями установлено, что для более полного использования возможностей абразивных элементов глубина их заделки в корпусе инструмента должна составлять одну треть среднего размера.

С учетом указанных положений для определения рациональных значений расстояний между элементами из сверхтвердых материалов по длине разработаны следующие аналитические выражения (для полусферической формы элементов):

по критерию $\sigma_{кр}$

$$l_{3(\sigma_{кр})} = \frac{\pi D n_{об} \sigma_{кр}}{3,4 V_n \sin \varphi_h \sigma_a} ; \quad (IV.5)$$

по критерию K_y

$$l_{3(K_y)} = \frac{\sqrt{(V_n H_p K_p - 78 V_o K_y r)^2 - 36 K_y^2 r^2 V_n V_o \left(1 + \frac{2\delta}{h}\right) \sin \varphi_{cp} + 78 V_o K_y r - V_n H_p K_p}}{2 V_n K_y \sin \varphi_{cp}}, \quad (IV.6)$$

где σ_a — сопротивление обрабатываемого материала разрушению; h — толщина корпуса пилы; δ — боковое выступание режущих элементов над торцевой плоскостью пилы.

Исследованиями по царапанию различных пород камня алмазными зернами сопротивление его разрушению σ_a с погрешностью до 10% коррелирует с контактной прочностью P_k и может быть определено из выражения

$$\sigma_a = \frac{(54 + 0,28P_k) 10^3}{700 - 1,49P_k}. \quad (IV.7)$$

Напряжение разрушения абразивного элемента $\sigma_{кр}$ определяется экспериментально или расчетным путем по формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{M_n z_{\max}}{I_c}. \quad (IV.8)$$

Здесь M_n — изгибающий момент от действия тангенциальной составляющей силы резания,

$$M_n = \frac{(54 + 0,28P_k) 10^3}{700 - 1,49P_k} \left[r \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + 2a_1r} - (r - a_1) \sqrt{2a_1r - a_1^2} \right] \frac{\frac{2}{3} r \sin^3 \alpha}{2 - \sin \alpha \cos \alpha}, \quad (IV.9)$$

где a_1 — толщина среза, снимаемого одним режущим элементом; α — центральный угол контакта режущего элемента с обрабатываемым материалом (зависит от размера элемента и a_1); z_{\max} — расстояние от центра тяжести площади контакта абразивного элемента с корпусом пилы до ее периферии в плоскости, перпендикулярной направлению резания,

$$z_{\max} = 0,576 \sqrt{2h_3r - h_3^2}, \quad (IV.10)$$

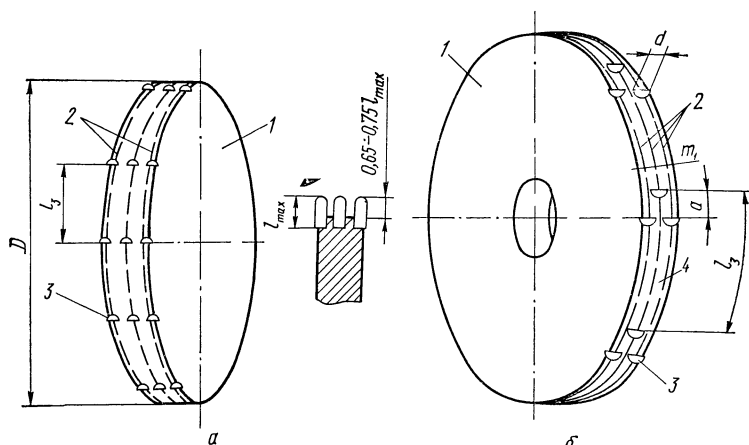
где h_3 — глубина заделки режущего элемента в корпусе пилы, $h_3 = \frac{1}{3} d$; I_c — момент инерции площади контакта абразивного элемента с корпусом инструмента относительно центра тяжести этой фигуры,

$$I_c = 0,502 (h_3d - h_3^2)^2. \quad (IV.11)$$

Выполненный в соответствии с разработанными параметрами дисковый инструмент, принципиальная схема которого изображена на рис. 67, а, позволяет максимально использовать потенциальные возможности сверхтвердых материалов на различных технологических операциях об-

работки природных и искусственных строительных материалов [26].

Необходимо отметить, что рассмотренная схема расчета конструктивных параметров инструментов может быть использована и при их оснащении режущими элементами с другими геометрическими формами.



67 Дисковый инструмент с регламентированным по длине (а) и ширине (б) рабочей поверхности расположением режущих элементов:

1 — корпус; 2 — линии резания; 3 — режущий элемент; 4 — рабочая поверхность

Другим не менее важным конструктивным параметром дисковых пил, оснащенных крупными абразивными элементами из сверхтвердых материалов, является расстояние между ними по ширине рабочей поверхности инструмента. Как показывает анализ взаимодействия резового инструмента с обрабатываемым материалом, определенные перспективы с точки зрения повышения коэффициента использования сверхтвердых материалов и снижения энергозатрат имеются в схеме разрушения и условиях эвакуации шлама из зоны резания. С учетом указанных факторов разработана конструкция дискового инструмента для обработки природных и искусственных строительных материалов (рис. 67, б), в смежных окружностях (линиях резания) цилиндрической поверхности которого расположены с шагом l_3 выступающие над ней режущие элементы из

сверхтвердых материалов, причем их геометрические центры в параллельных смежных окружностях смещены на величину, определяемую из неравенства $d < a < 0,5l_3$, а расстояния между этими окружностями определяются из выражения

$$m_1 = \sqrt{\frac{3dV_n l_3 \sin \varphi_{cp}}{n_{об} D}}, \quad (IV.12)$$

где φ_{cp} — угол, характеризующий среднюю толщину среза, снимаемого одним элементом.

Величина смещения геометрических центров двух соседних режущих элементов, расположенных в смежных окружностях, выбрана из следующих соображений:

ограничение по нижнему пределу ($d < a$) обуславливает возможность размещения близлежащего элемента на рабочей поверхности инструмента;

ограничение по верхнему пределу ($a < 0,5l_3$) вызвано необходимостью увеличения свободного объема между элементами, в котором транспортируются продукты разрушения, образующиеся в результате работы впереди расположенных элементов в смежных окружностях, с целью уменьшения их абразивного воздействия на последующие в направлении вращения инструмента рабочие элементы.

При разработке аналитических выражений для определения расстояний между смежными окружностями m_1 учитывалась, на основании экспериментальных данных, величина «развала» обрабатываемого материала при снятии стружки режущим элементом, имеющим форму полусферы. По данным выполненных исследований применительно к обработке таких пород камня, как доломит, песчаник, мрамор и лабрадорит, величина «развала» (отношение сечения среза в обрабатываемом материале к площади контактирующего с ним режущего элемента) составляет в среднем 1,5.

Практическая реализация рассмотренных конструкций дисковых пил с ориентированными режущими элементами из сверхтвердых материалов, разработанных с учетом кинематических особенностей, физико-механических характеристик абразивных рабочих элементов и обрабатываемых материалов, а также механики взаимодействия в процессе разрушения и условий транспортировки образующихся при этом продуктов, позволит значительно повысить технико-экономические показатели в различных технологических операциях добычи и обработки природного камня.

4. Технология ступенчатого резания алмазным инструментом

В настоящее время распиловка гранита на облицовочные изделия производится с использованием традиционных абразивов на рамных распиловочных станках, характеризующихся низкой производительностью и неудовлетворительным качеством поверхности распиливаемых плит, вызывающим неоправданно высокие затраты на их фактурную обработку.

Попытки использовать для распиловки блоков гранита алмазные полосовые пилы в отечественной и зарубежной камнеобрабатывающей промышленности носят экспериментальный характер и не получили широкого распространения.

Анализ отечественных и зарубежных литературных и патентных источников, а также проведенные исследования свидетельствуют о том, что с точки зрения эффективной работы алмазных дисковых пил распиловку пород природного камня средней твердости и мягких целесообразно производить однопроходным способом, а твердых пород, например гранита, — многопроходным.

Многопроходный способ резания гранитов и других подобных материалов, осуществляемый опусканием пил на величину рациональной глубины пропила или соответствующим подъемом обрабатываемого материала, имеет ряд недостатков. Так, при распиловке камня на большую глубину возникает необходимость в применении инструмента соответствующего диаметра, величина которого растет с увеличением размеров выпускаемых изделий. Одновременно с этим увеличивается и ширина алмазонасных сегментов, в связи с чем многопроходный способ резания одной или несколькими пилами отличается повышенной алмазоемкостью. Кроме того, необходимость возврата пилы после выполнения реза в исходное положение (спуско-подъемные установочные операции) уменьшают коэффициент полезно используемого машинного времени, что, безусловно, отражается на общей производительности процесса. При многопроходном способе резания ухудшается также и качество поверхности распила, имеющей, как правило, ступенчатую форму, вследствие чего растет и трудоемкость последующей фактурной обработки.

Одним из примеров реализации многопроходного способа резания гранита могут служить отечественный много-

дисковый станок модели 3970-А и поточная линия «Лазер» фирмы «Грегори»

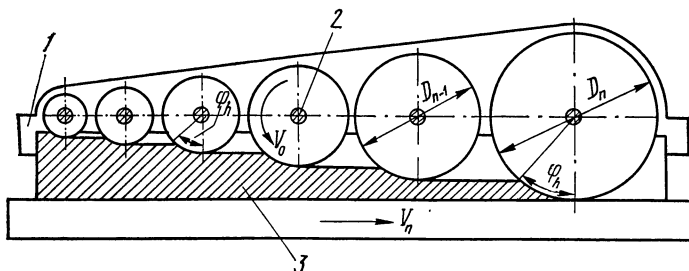
Механизм регулирования глубины резания в станке модели 3970-А выполнен в виде клиновой пары с углом наклона плоскости скольжения $20\text{--}30^\circ$, причем на одном клине закреплен стол, а другой клин смонтирован на тележке. Станок снабжен приспособлением для дозированной подачи абразивной смеси к дисковым пилам, что свидетельствует о необходимости периодического вскрытия алмазосодержащего слоя инструмента. Это характеризует определенную неточность в выборе технологических режимов резания и назначения соответствующего инструмента, что ограничивает возможные области эффективного применения этого станка в камнеобрабатывающей промышленности.

На международной выставке «Камнеобработка-78» (г. Ереван) в проспекте фирмы «Грегори» рекламировалась поточная линия «Лазер» для изготовления облицовочных изделий из гранита. Распиловка блока гранита на плиты осуществляется на ортогональном станке Bull-4G, оснащенном пятью алмазными пилами диаметром 1200 мм, установленными в вертикальной плоскости, а вырезка плит из блока производится горизонтальной алмазной пилой диаметром 350 мм. Рабочая установка на заданную глубину пропила выполняется путем вертикального перемещения блока гранита, закрепленного на платформе (столе) станка. Поточная линия состоит из устройства S—A для съема плит со станка Bull-4G с помощью пневматических прижимов, станка «Минисьюпер», оснащенного алмазной пилой диаметром 350 мм, для окантовки плит по заданным размерам и двух шлифовально-полировальных конвейеров с инструментами из обычных абразивов. Максимальная производительность поточной линии $6\text{--}7\text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине плит до 30 мм. К достоинствам линии «Лазер» следует отнести практически полную механизацию технологического процесса, к недостаткам — многопроходность резания, вызывающую необходимость использования двух шлифовально-полировальных конвейеров.

Следует отметить, что проектная производительность линии ввиду определенных трудностей процесса распиловки гранитов, особенно их твердых разновидностей, на глубину 120—150 мм за один проход горизонтальной алмазной пилой диаметром 350 мм труднодостижима

В результате комплекса теоретических и эксперименталь-

ных исследований процесса резания гранита в ИСМ АН УССР разработано «Устройство для распиловки труднообрабатываемых материалов». В конструктивном отношении оно представляет собой станину, на которой закреплены параллельные приводные валы с последовательно расположенными на них алмазными дисковыми пилами различных диаметров (рис. 68). Отличительная особенность



68. Схема устройства для распиловки труднообрабатываемых материалов на основе многоступенчатого резания алмазными дисковыми пилами: 1 — станина; 2 — приводной вал; 3 — обрабатываемый материал.

устройства — расположение осей приводных валов в одной плоскости, причем диаметр каждой последующей пилы определяется из соотношения $D_n = (1,25—1,27) D_{n-1}$, а ширина алмазосносного слоя — из соотношения $s_n = (1,1—1,3) s_{n-1}$ (D_n и s_n — соответственно диаметр и ширина алмазосносного слоя последующей пилы, а D_{n-1} и s_{n-1} — диаметр и ширина алмазосносного слоя предыдущей пилы).

Угол контакта пил с обрабатываемым материалом принят постоянным и равен $0,65—0,66$ рад.

Расположение приводных валов в одной плоскости предусматривает использование пил последовательно увеличивающегося диаметра.

Как показывают расчеты, величина угла контакта определяемая по известной формуле $\varphi_n = \arccos\left(1 - \frac{H_p}{R}\right)$, равна $0,65—0,66$ рад и соответствует для данной схемы отношению $\frac{H_p}{R} = 0,20—0,21$.

В разработанном устройстве при постоянных угле контакта φ_n (а следовательно, и отношении $\frac{H_p}{R}$), окружной скорости V_o , скорости подачи V_n и различных глубине реза-

ния H_p и диаметре пил D толщина стружки a' , снимаемой одним зерном, и удельный путь трения одинаковы.

Учитывая, что с увеличением диаметра объем работы, выполняемой каждой алмазной пилой, растет пропорционально числу зерен в них, срок службы каждой пилы в устройстве будет одинаков.

Существенное отличие разработанного устройства от известных заключается в том, что применение пил различных диаметров с соответствующей шириной алмазоносного слоя позволяет снизить общую алмазоемкость инструмента и, следовательно, снизить удельный расход алмазов.

Соотношение размеров последовательно расположенных алмазных пил позволяет использовать с незначительной корректировкой длины алмазоносного слоя инструментов, регламентированных в СССР государственными стандартами и техническими условиями и приведенных в проспектах и каталогах ведущих зарубежных фирм.

Наличие пропила от предшествующей пилы и увеличение в 1,1—1,3 раза ширины пропила последующей пилой позволяют стабилизировать работу инструмента и повысить качество поверхности распиливаемых плит за счет того, что каждая последующая пила формирует новую поверхность. Повышение качества поверхности распиливаемых плит обеспечивает снижение трудоемкости последующей фактурной обработки, исключив операции обдира и грубого шлифования, которые являются наиболее трудоемкими.

Экспериментальная проверка способа распиловки гранита на плиты алмазными пилами с последовательно увеличивающимся диаметром в лабораторных условиях подтвердила отсутствие на них «ступенек».

В настоящее время создается опытно-промышленная поточная линия для изготовления ступеней и тонких облицовочных плит из гранита Ново-Даниловского месторождения.

Принята следующая технологическая схема производства:

на поточной линии № 1, оснащенной двумя рядами алмазных пил различных диаметров с диапазоном их изменения от 400 до 1250 мм, распиливают заготовки из гранита размером 450 × 700 × 200 мм на две плиты размером 150 × 450 мм и брусок-заготовку размером 400 × 450 мм;

на поточной линии № 2, оснащенной четырьмя рядами пил различных диаметров с диапазоном их изменения от 500 до 1250 мм, распиливают брусок-заготовку размером 400 × 450 мм на одну ступень размером 120 × 400 мм и две ступени размером 130 × 400 мм, а также на две плиты размером 20 × 400 мм.

Предварительные расчеты показали, что осуществление рассмотренной технологической линии (на период ее освоения) при односменной работе и коэффициенте машинного времени 0,5 позволит переработать в год до 5,5 тыс. м³ блоков, обеспечив выход продукции до 80 тыс. м. ступеней и 15 тыс. м² облицовочных плит, и получить экономический эффект до 1,5 млн. руб.

В настоящее время на основе разработанных ИСМ АН УССР исходных данных завершены проектные работы по поточным линиям, которые согласно комплексной программе в 1980 г. должны пройти апробацию в производственных условиях.

**РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛМАЗНОГО
ДИСКОВОГО ИНСТРУМЕНТА**

**1. Условия рационального применения
инструмента**

Эффективность применения алмазных дисковых пил зависит от многих факторов: конструктивных особенностей инструмента, режимов резания, характеристики алмазного слоя, условий эксплуатации и др.

При выборе конструктивного исполнения дисковых сегментных пил (из природных и синтетических алмазов), регламентируемых действующими стандартами, прежде всего следует исходить из функционального назначения и условий эксплуатации инструмента. Пилы с узкими межсегментными пазами целесообразно использовать для резания твердых разновидностей природного камня (гранит, лабрадорит, габбро-норит, базальт, гранодиорит, сиенит и др.), а также в условиях, сопровождающихся высокими удельными нагрузками на рабочую поверхность инструмента (однопроходное резание с небольшой глубиной пропила) независимо от вида обрабатываемого материала. Лучшие результаты этот инструмент обеспечивает и в тех случаях, когда в качестве основного технологического требования ставится условие сохранения целостности кромок обрабатываемого изделия.

Пилы с широкими (нормальными) межсегментными пазами предназначаются для резания пород природного камня средней твердости и мягких (известняк, туф, доломит, мрамор), а также некоторых видов твердых пород камня, когда рабочий процесс осуществляется с большой глубиной пропила. Общим признаком, определяющим выбор такого конструктивного исполнения инструмента, может служить необходимость распиловки с большой производительностью и объемами разрушения. Увеличение межсегментных

расстояний в инструменте по сравнению с первым его типом улучшает условия охлаждения и выноса мелкодисперсных продуктов разрушения и позволяет вести процесс резания с меньшими энергозатратами. Как уже отмечалось, уменьшение энергоемкости резания имеет большое значение в практике работы многодисковых распиловочных станков, в создании которых одним из основных факторов является возможность обеспечения необходимой установленной мощности привода вращения.

При выборе рациональных параметров характеристики алмазоносного слоя следует исходить из комплексной оценки каждого из них, так как все они взаимосвязаны и обеспечивают необходимый эффект только в результате правильно выбранного сочетания.

Существенное влияние на экономичность процесса резания оказывают технологические режимы работы инструмента, роль которых в формировании основных параметров, определяющих кинематику единичного зерна, силовую картину и износ, — решающая. Основные рекомендации по рациональным параметрам характеристики алмазоносного слоя и режимам резания различных пород природного камня представлены в табл. 28.

Необходимо отметить, что большое разнообразие в свойствах природного камня даже в пределах указанных групп, отличие в характеристиках алмазов и многообразии технологических требований к рабочему процессу предопределяют соответствующие тенденции при выборе рекомендуемых параметров. Так, в повышении твердости обрабатываемых материалов следует применять пилы с меньшей зернистостью и большей концентрацией (для указанных диапазонов их изменения); при увеличении удельных нагрузок на рабочую поверхность инструмента, когда процесс резания осуществляется с большими скоростями подачи и малой глубиной пропила, также более эффективно применение инструментов с большей концентрацией алмазов. С точки зрения алмазоносного слоя при увеличении твердости камня и прочности алмазных зерен необходимо стремиться к уменьшению окружной скорости резания, определяющей условия охлаждения и динамику взаимодействия рабочей поверхности инструмента с обрабатываемым материалом.

Кроме конструктивного исполнения инструмента, при решении проблемы обеспечения целостности кромок изделия одним из способствующих факторов является также

Т а б л и
Основные рекомендации по при

Обрабатываемый материал	Характеристика материала		Характеристика алмазосвязного слоя		
	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	α , мг	Марка алмазов	Зернистость	Концентрация, %
Гранит	2000—2500	30—60	А, АСС, смесь А и АСС с отношением по массе 1 : 1	400/315—630/500	50
Лабрадорит, габбро-норит, тешенит и др.	1000—1800	5—20	АСС	400/315—630/500	50
Мраморы, доломит, известняк, туф	200—1200	1—5	АСС, АСС	400/315—630/500	30—40

Примечание. В скобках приводятся типы связок, применяемых в настоящее время инструмента приведены минимальные

уменьшение твердости связки и применение алмазных порошков более мелких фракций.

По критерию износа инструмента схема резания («по подаче» или «против подачи») не имеет существенного значения при обработке пород камня средней твердости и мягких. При резании твердых его разновидностей «по подаче» износостойкость снижается на 15—20%; энергоемкость разрушения практически не зависит от выбранной схемы работы. Следует иметь в виду, что для резания «по подаче» вертикальная составляющая силы резания направлена в сторону обрабатываемого изделия, способствуя тем самым более устойчивому его положению на столе станка, потому ее целесообразно применять при обработке малогабаритных и легких изделий, требующих надежного закрепления, а для распиловки изделий большой массы — «против подачи».

Правила эксплуатации инструмента. Работоспособность и долговечность алмазной пилы во многом зависят от ее установки. Для работы пила должна быть жестко закреплена зажимной гайкой на выходном валу привода вращения станка между двумя фланцами. Следует учитывать, что

менению алмазных дисковых пил

Связка	Технологические режимы работы			Стойкость инструмента, квадратные метры площади резания
	Окружная скорость, м/с	Глубина пропилы, мм	Производительность, см ² /мин	
МОЗ (М50)	20—25	30—50	200 (для пил диаметром 500 мм)	40—60 (для пил диаметром 500 мм)
МОЗ	25—30	до 0,3	300 (для пил диаметром 500 мм)	100—200 (для пил диаметром 500 мм)
МЗ (М1)	30—40	до 0,3	1000—1500 (для пил диаметром 1100 мм)	1200—1400 (для пил диаметром 1100 мм)

время в инструментах серийного производства. Данные по производительности и стой-

вибрация исполнительного органа увеличивает износ инструмента.

При креплении пилы на шпинделе станка необходимо соблюдать следующие условия:

пила устанавливается в таком положении, чтобы направление вращения совпадало с выгравированной на полотне стрелкой;

для самозатягивания фланцевого узла направление резьбы под зажимную гайку и вращение шпинделя должны быть противоположными;

диаметр фланцев должен увеличиваться пропорционально диаметру пилы (обычно для условий, сопровождающихся повышенными нагрузками, диаметр фланцев должен быть не менее $0,3D$, для других, менее сложных условий, его величина принимается равной $0,20—0,25D$; в центре фланцы фрезеруются на глубину до 1 мм так, чтобы на торце периферийной части было выступающее кольцо шириной 10—15 мм);

при установке пилы следует обращать внимание на чистоту посадочного места и фланцев, на их деформацию;

при демонтаже пилы и фланцы следует устанавливать в первоначальном положении по отношению к шпинделю станка по предварительно нанесенной метке.

При установке допустимое торцевое биение пилы обычно составляет 1/1000 ее диаметра. Биение, вдвое превышающее указанную величину, считается недопустимым.

При хранении пилы должны находиться в подвешенном состоянии.

Одно из условий нормальной эксплуатации алмазных дисковых пил — сохранение постоянными режущих свойств на протяжении всего срока службы инструмента. Обеспечение этого условия зависит и от первоначального состояния рабочей поверхности алмазоносного слоя. В соответствии с техническими требованиями все поступающие в работу пилы должны быть вскрыты, т. е. иметь определенное выступание зерен над уровнем связки (на 70—80% общей площади алмазоносного слоя). В противном случае при вводе инструмента в работу с режимными параметрами, обусловленными технологическим процессом, возможны поломки сегментов или деформация корпуса вследствие превышения допустимых нагрузок.

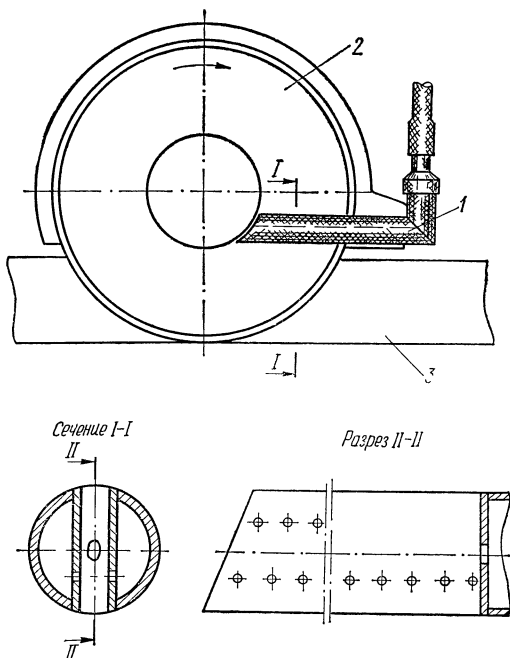
При обнаружении отклонений от указанных норм следует вскрывать алмазоносный слой, выполняя серию резов по однородному абразивному материалу (отходы абразивных кругов, известняк, огнеупоры, песчано-цементный камень и др.) Критерием достаточного вскрытия алмазных зерен может служить момент стабилизации мощности резания.

Бывают случаи, когда в процессе резания материалов с практически одинаковыми физико-механическими свойствами из-за недостаточно правильного назначения режимных параметров и характеристики алмазоносного слоя возникает необходимость в «дообнажении» алмазной пилы. В таких ситуациях режущие свойства восстанавливают обычным методом — резанием однородных абразивных материалов или выполнением нескольких резов с большой скоростью подачи при небольшой глубине пропила. Требуется приработка и при смене обрабатываемого материала, причем необходимость ее осуществления важна при переходе с твердых и абразивных пород камня на мягкие и малоабразивные.

Частая приработка и «дообнажение» дорогостоящих алмазных пил приводит к увеличению их износа, в связи с чем

обеспечение нормальных условий эксплуатации инструмента является одним из факторов снижения себестоимости продукции.

Охлаждение инструмента. Работа алмазных дисковых пил должна сопровождаться обильной подачей в зону реза-



69. Схема охлаждения алмазной дисковой пилы:
 1 — устройство для подачи охлаждающей жидкости; 2 — пила; 3 — обрабатываемый материал.

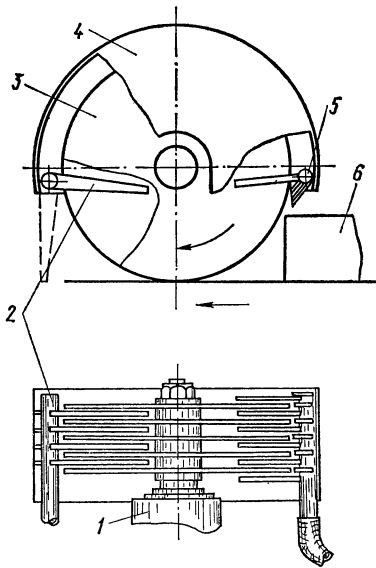
ния охлаждающей жидкости, в качестве которой в практике обработки камня используется, как правило, вода. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на водной основе, несмотря на то что они способствуют повышению износостойкости алмазных инструментов в среднем на 20—40%, в настоящее время ограничивается рядом причин. В качестве основных следует указать на определенные трудности в решении проблемы очистки СОЖ, циркулируемой по замкнутому циклу, от взвешенных тонкодисперсных частиц разрушения и поддержания заданной концентрации добавок. Как показали эксперименты, в определенный

период времени, по мере насыщения СОЖ продуктами разрушения мелких фракций, они начинают способствовать износу алмазонасного слоя. Система, обеспечивающая необходимые условия для эффективного функционирования

СОЖ, сложна в реализации. Количество подаваемой жидкости $V_{ж}$ для различных диаметров пил ориентировочно можно определить из выражения

$$V_{ж} = \frac{D}{40} \cdot (V.I)$$

Подвод охлаждающей жидкости к пиле осуществляется специальными устройствами, один из простых вариантов которых представлен на рис. 69. Устройство несложно в изготовлении, состоит из трубы с просверленными по внутренней стороне отверстиями и обеспечивает подачу воды как к торцевой поверхности пилы, так и к периферии алмазонасного слоя пилы.



70. Устройство для охлаждения алмазных пил многодисковых распиловочных станков:

1 — шпиндельный узел; 2 — защитное приспособление; 3 — пилы; 4 — защитный кожух; 5 — охлаждающее устройство; 6 — обрабатываемый материал

При уменьшении глубины резания устройство для подачи охлаждающей жидкости перемещается к обрабатываемому изделию. Для регулировки его положения относительно алмазной пилы оно выполняется на шарнире. Желательно, чтобы охлаждение алмазных дисковых пил осуществлялось водой, поступающей непосредственно из сети.

При использовании для охлаждения оборотной воды необходимо принимать меры к тщательной ее очистке, так как наличие в воде абразивных частиц (продуктов разрушения) способствует увеличению износа алмазного инструмента.

Для многодисковых установок разработана конструкция охлаждающего устройства, представленная на рис. 70.

Необходимо отметить, что в указанных приспособлениях

водоподводящие перфорированные трубки могут иметь плоскую форму.

Требования, предъявляемые к оборудованию. Высокая эффективность и производительность при применении алмазных дисковых пил возможны только на станках, обладающих достаточной жесткостью и точностью.

При монтаже и пуске станка следует обращать внимание на уравнированность ротора двигателя и шпиндельного узла у станка, влияющих на величину вибрации исполнительного органа. Шпиндель станка должен иметь по возможности минимальный вылет, радиальное биение — не более 0,02 мм.

Для алмазно-абразивных способов резания природного камня в целях сохранения режущих свойств инструмента целесообразно применять дифференциально-винтовую подачу, обеспечивающую постоянную ее скорость. Подача должна осуществляться плавно, без рывков. Работающая дисковая пила должна быть максимально закрыта кожухом. Все направляющие станка, а также другие трущиеся узлы должны быть по возможности защищены от попадания на них воды с абразивными частицами (продуктами разрушения материала). Несоблюдение этого требования приводит к быстрому износу трущихся пар станка и, как следствие, к вибрациям и резкому повышению износа алмазного инструмента.

В станке должно предусматриваться в определенном диапазоне регулирование числа оборотов, чтобы обеспечить требуемые окружные скорости при изменении диаметра инструмента или обрабатываемого материала. Диапазон чисел оборотов определяется назначением станка или требованиями технологического процесса.

Станок обязательно должен быть оснащен контрольными электроизмерительными приборами и соответствующей электрической защитой.

Продольный люфт в подшипниках стола и на винте подачи не должен превышать 0,1 мм.

Поперечное перемещение стола при боковых нагрузках не должно превышать 0,2 мм.

Для эффективной распиловки направление движения стола должно совпадать с плоскостью пилы. Непараллельность проверяется компаратором при движении стола на величину диаметра пилы и контролируется по показаниям прибора по одной точке на корпусе.

Отклонения от параллельности не должны превышать для алмазных пил диаметром 250—300 мм 0,1 мм; 400—630 — 0,2; 800—1250 — 0,3 мм.

Выбор мощности приводов вращения и подачи. Применительно к производственным условиям мощность привода вращения в зависимости от диаметра пилы и типа обрабатываемого материала может быть определена из следующего упрощенного выражения:

$$N_{дв} = \frac{sP_{п}\Pi}{3} + N_{х.х}, \quad (V.2)$$

где s — толщина алмазных сегментов пилы, мм; $P_{п}$ — обобщенный показатель энергоемкости резания пилой диаметром 320 мм различных пород камня на рекомендуемых режимах (для гранитов $P_{п} = 4-5$ кВт · ч/м²; лабрадорита, габбро-норита, тешенита $P_{п} = 2-3$ кВт · ч/м²; мраморов, доломита, известняка, туфа $P_{п} = 1,0-1,5$ кВт · ч/м²); $N_{х.х}$ — мощность холостого хода двигателя и потери на трение в передающей цепи, кВт.

Для дифференциально-винтовой подачи стола мощность привода подачи $N_{п}$ ориентировочно принимается равной $0,1N_{дв}$.

По результатам расчета мощности привода вращения с определенным приближением по выведенным ранее формулам могут быть рассчитаны и другие показатели, характеризующие силовую картину процесса алмазно-дискового резания.

1. Нормальная составляющая силы резания

$$F_N = mF_{\tau} = \frac{mA_{об}}{\pi D}, \quad (V.3)$$

где

$$A_{об} = \frac{(N_{дв} - N_{х.х}) 60 \cdot 102}{n_{об}}. \quad (V.4)$$

2. Сила подачи $P_{г}$ и вертикальная составляющая силы резания $P_{в}$ (например для резания «по подаче»)

$$P_{г} = F_N \sin \varphi_{ср} - F_{\tau} \cos \varphi_{ср},$$

$$P_{в} = F_{\tau} \sin \varphi_{ср} + F_N \cos \varphi_{ср}.$$

2. Сравнительная оценка работоспособности инструмента в производственных условиях

Учитывая, что в процессе эксплуатации инструмента объемы резания обрабатываемых материалов с различными физико-механическими свойствами для каждой пилы не

одинаковы, удельный расход алмазов, рассчитанный через амортизационную стойкость, не может служить критерием их сравнительной оценки.

Для получения сопоставимых данных по удельному расходу алмазов возникает необходимость в расчете приведенной стойкости пил посредством относительных коэффициентов K_i , которыми в определенной мере можно характеризовать «обрабатываемость» различных природных строительных материалов.

За относительный коэффициент алмазной «обрабатываемости» принято отношение удельного расхода алмазов, полученного на любом материале, к удельному расходу алмазов по эталонному материалу [96]:

$$K_i = q_i/q_s, \quad (V.5)$$

где q_i — удельный расход алмазов по различным типам изучаемых материалов; q_s — удельный расход алмазов по эталонному материалу, за который обычно принимается наиболее легко обрабатываемый.

Таким образом, задача в начальной стадии сводится к дифференцированному определению удельного расхода алмазов инструмента по каждому из изучаемых разновидностей природного камня. Необходимо отметить, что показатели удельного расхода алмазов для различных материалов не только дают представление об их «обрабатываемости», но и имеют практическое значение при определении норм расхода, потребности в инструменте и могут быть использованы в экономических расчетах камнеобрабатывающих предприятий.

По каждому из обрабатываемых материалов значения удельного расхода алмазов q_{cp} определяются как средневзвешенные по всем сравниваемым инструментам одной конструкции. Чтобы получить достоверный результат, число алмазных пил одного типа должно быть не менее трех единиц:

$$q_{cp} = \frac{q_{i_1}S_{i_1} + q_{i_2}S_{i_2} + \dots + q_{i_n}S_{i_n}}{\Sigma S_i}, \quad (V.6)$$

где $q_{i_1}, q_{i_2}, \dots, q_{i_n}$ — удельный расход алмазов, полученный на изучаемых пилах одного типа по каждому из обрабатываемых материалов; $S_{i_1}, S_{i_2}, \dots, S_{i_n}$ — площадь резания, выполненная каждой пилой одного типа по различным обрабатываемым материалам.

В табл. 29 приведены относительные коэффициенты «обрабатываемости» широко распространенных в практике строительства гранитов некоторых украинских месторождений, полученные на основании испытаний алмазных дисковых пил конструкции ИСМ АН УССР в условиях БЭИКЗ. Удельный расход алмазов при резании гранитов Капустинского и Емельяновского месторождений соответственно

Т а б л и ц а 29
Относительный коэффициент алмазной «обрабатываемости» гранитов

Материал	Предел прочности при сжатии, кгс/см ²	Истираемость, г/см ²	K_t
Гранит Жежелевского месторождения	2040—2170	0,28—0,39	1,0
Гранит Капустинского месторождения	1870—1970	0,20—0,31	1,4
Гранит Емельяновского месторождения	2400	0,22	1,9

в 1,4—1,9 раза больше, чем при резании гранита Жежелевского месторождения.

В процессе экспериментов также установлено, что относительные коэффициенты «обрабатываемости» указанных гранитов для пил, выпускаемых КБЗАИ, аналогичны полученным для инструментов конструкции ИСМ АН УССР.

Полученные относительные коэффициенты позволяют определить приведенные к одному материалу значения стойкости алмазных дисковых пил ($C_{пр}$) сравниваемых конструкций из выражения

$$C_{пр} = K_1 S_1 + K_2 S_2 + \dots + K_n S_n, \quad (V.7)$$

где K_1, K_2, K_n — относительные коэффициенты «обрабатываемости» различных материалов; S_1, S_2, \dots, S_n — объемы резания каждой пилой одного типа различных материалов, м².

В табл. 30 представлены результаты сравнительных испытаний алмазных дисковых пил конструкций ИСМ АН УССР и КБЗАИ, проведенных на БЭИКЗ, которые наглядно иллюстрируют различные значения фактической стойкости пил до амортизации и приведенной. При этом

только дифференцированный подход к оценке объема работы, выполненной каждой алмазной дисковой пилой, позволяет получить объективные данные, характеризующие износостойкость алмазосодержащего слоя инструмента в целом.

При проведении экспериментальных исследований в производственных условиях зачастую возникает необходимость в определении линейной величины потерь алмазо-

Т а б л и ц а 30
Результаты сравнительных испытаний алмазных дисковых пил при резании гранитов

Вид инструмента	Объемы выполненной работы по граниту, м ²			Фактическая стойкость пилы до амортизации, м ²	Стойкость пилы, приведенная к граниту Железновского месторождения, м ²
	Железово, K _Ж = 1,0	Капустино, K _К = 1,4	Емельяновка, K _Е = 1,9		
Конструкции ИСМ АН УССР	14,3	—	24,9	39,2	63,6
диаметром 400 мм	17,0	7,4	16,7	41,1	58,8
	3,2	3,4	21,5	28,5	48,1
	16,9	22,0	—	38,9	48,4
	57,9	0,6	—	58,5	58,7
	13,5	5,3	19,3	38,1	57,0
	22,7	6,0	11,7	40,4	53,0
Конструкции КБЗАИ	10,7	3,4	17,4	31,4	49,3
диаметром 500 мм	17,7	15,6	6,5	39,8	51,1

носного слоя по высоте при известном общем его износе и объеме выполненной работы при резании одновременно нескольких типов строительных материалов. Расчетная зависимость для нахождения линейного износа алмазосодержащего слоя выводится исходя из известного метода определения средневзвешенного значения износостойкости и имеет вид

$$\Delta h_{\pi} = \frac{h' S_{\pi} \left(\frac{K_{\pi}}{K_1} S_1 + \frac{K_{\pi}}{K_2} S_2 + \dots + S_{\pi} \right)}{\Sigma S^2}, \quad (V.8)$$

где Δh_{π} , S_{π} — соответственно искомая величина износа алмазосодержащего слоя по высоте (мм) и объем выполненной работы по материалу, для которого определяется износ (м²); h' , ΣS — соответственно износ алмазосодержащего слоя по высоте (мм) и объем выполненной работы по всем материа-

лам (m^2); K_p — относительный коэффициент обрабатываемости материала, по которому определяется износ; K_1 , K_2 — относительный коэффициент обрабатываемости других материалов.

Таким образом, разработанный метод позволяет производить сравнительную оценку работоспособности опытных конструкций алмазных дисковых пил при резании различных по физико-механическим свойствам гранитов.

3. Производственные испытания алмазного инструмента

Проведение широких производственных испытаний на различных стадиях исследовательских работ предусматривало получение представительного фактического материала для окончательного суждения по разнообразным вопросам, связанным с разработкой различных конструктивных решений алмазных дисковых пил, технологией их изготовления, выбором и обоснованием рациональных параметров характеристики алмазоносного слоя и технологических режимов резания. Как правило, опытно-промышленной проверке предшествовали теоретические разработки и экспериментальные исследования в лабораторных условиях. В отдельных случаях, когда решение какой-либо задачи экспериментально-лабораторным путем лимитировалось большими объемами наблюдений, как, например, при отработке различных элементов исследований по малоабразивным породам средней твердости и мягким, результаты производственных испытаний являлись единственным критерием и имели самостоятельное значение.

В качестве обязательного условия при оценке работоспособности конструктивных и технологических вариантов алмазно-дискового резания ставилось сравнение их с аналогичными показателями применения промышленных образцов инструментов отечественного и зарубежного производства.

Одна из наиболее представительных — опытная проверка работоспособности связки МОЗ, созданной для условий обработки твердых пород природного камня, основной объем работ по которой выполнен на БЭИКЗ. При постановке задачи предусматривалось создание связки, которая бы обеспечивала конкурентоспособные показатели не только по сравнению с серийно освоенной отечественной промыш-

ленностью связкой М50, но и с лучшими аналогами ведущих зарубежных фирм в этой области независимо от марки алмазных порошков.

На основании лабораторных исследований для проведения экспериментальных работ в производственных условиях изготовлены дисковые сегментные пилы диаметром 400 и 500 мм на двух перспективных связках — МОЗ и

Таблица 31

Производительность резания гранитов алмазными пилами на опытных связках

Вид инструмента	Связка	Гранит Жежелевского месторождения			Гранит Капустинского месторождения			Гранит Емельяновского месторождения		
		Площадь резания, см ²	Время резания, мин	Производительность, см ² /мин	Площадь резания, см ²	Время резания, мин	Производительность, см ² /мин	Площадь резания, см ²	Время резания, мин	Производительность, см ² /мин
Конструкция ИСМ АН УССР Конструкция КБЗАИ	МОЗ, МО2	37800	191	198	26300	132	191	31300	147	212
	М50	10400	54	193	16000	84	190	11800	104	113

МО2 — с использованием природных и синтетических алмазов с прочностью зерен на раздавливание 8—15 кгс для зернистостей, изменяющихся в диапазоне от 400/315 до 630/500. При сравнении изучаемых вариантов алмазных дисковых пил показатели работоспособности в соответствии с разработанным методом оценивались отдельно по каждому из видов гранитов украинских месторождений, которые были представлены всеми тремя категориями по трудности обработки.

Как показали испытания (табл. 31), производительность резания алмазными пилами на опытных связках для всех видов гранитов практически равнозначна и составляет в среднем 190—210 см²/мин. Для серийного инструмента на связке М50 производительность резания гранитов Жежелевского и Капустинского месторождений аналогична пилам конструкции ИСМ АН УССР, а при обработке гранита Емельяновского месторождения она ниже в 1,8 раза.

Полученные для пил конструкции ИСМ АН УССР значения производительности резания гранитов, характери-

зующихся высокой прочностью и абразивностью, находятся в пределах величин, рекомендуемых для этих условий большинством зарубежных фирм.

Установлено, что лучшие показатели по стойкости и удельному расходу алмазов обеспечивает инструмент на опытных связках МОЗ и МО2 (табл. 32), подтверждая тем

Таблица 32

Обобщенные результаты испытаний алмазных пил на опытных связках по стойкости при резании гранитов

Вид инструмента	Связка	Число амортизированных пил, шт.	Суммарный объем выполненной работы, приведенный к граниту Жезелевского месторождения, квадратные метры площади резания	Средняя приведенная стойкость пилы до амортизации, квадратные метры площади резания	Удельный расход алмазов	
					г/м ²	%
Конструкция КБЗАИ диаметром 500 мм	М50	4	204	50	0,20	100
Конструкция ИСМ АН УССР диаметром 400 мм	МО2	2	110	55	0,14	70
	МО3	5	227	55	0,14	70

самым правомерность выводов лабораторных исследований. Однако принимая во внимание, что в процессе эксплуатации алмазных пил на связке МО2 наблюдались случаи ее выкрашивания и микроразрушений, в качестве основной для обработки твердых пород камня рекомендована связка МОЗ.

Аналогичные результаты получены и в процессе испытаний алмазных пил диаметром 500 мм на связке МОЗ при резании твердых разновидностей природного камня — тешенита, гранитов месторождений «Салесао» и «Охомира» — на Кутаисском камнеобрабатывающем комбинате, где повышение производительности и стойкости до амортизации по сравнению с серийным инструментом соответственно составило 1,6 и 1,7 раза.

Особое внимание в процессе производственных испытаний уделено определению показателей работоспособности дисковых сегментных пил, оснащенных различными марками синтетических алмазов, и сравнению их с соответ-

ствующими показателями инструментов из природных алмазов в аналогичных конструкциях и серийно выпускаемых образцах. Постановка такой задачи предусматривала решение не только научно-исследовательских вопросов, направленных на повышение эффективности алмазно-дисковых способов обработки, но и проблемы о возможности замены природных алмазов синтетическими, необходимые объемы производства которых могут быть обеспечены при соответствующей технической оснащенности отрасли с целью более полного удовлетворения потребностей развивающейся камнеобрабатывающей промышленности в алмазном инструменте.

По данному направлению производственные испытания проводились на операциях одно- и многодискового резания мраморов различных месторождений и других подобных материалов и окантовки твердых разновидностей природного камня.

Полученные в условиях БЭИКЗ результаты при изготовлении облицовочных плит из мраморов, туфа, травертина и мозаичных плит дисковыми сегментными пилами диаметром 1100 мм с различными параметрами характеристики алмазоносного слоя (табл. 33) свидетельствуют о том, что наиболее высокие показатели по стойкости обеспечивает инструмент с широкими межсегментными пазами, оснащенный синтетическими алмазами марки АСС.

По этому показателю сегментные пилы с узкими межсегментными пазами (АПСИ), оснащенные природными и синтетическими алмазами марки АСС, можно считать практически равноценными. Однако по стойкости они превосходят инструмент того же конструктивного исполнения, оснащенный синтетическими алмазами марки АСК.

Отличительной особенностью сегментных пил конструкции ИСМ АН УССР на связке МЗ, как установлено в процессе их эксплуатации на протяжении длительного времени, является постоянство режущих свойств алмазоносного слоя в установленном диапазоне режимных параметров.

До настоящего времени распространено применение алмазных пил на связке М50 серийного производства при обработке пород средней твердости и мягких, когда производительность резания периодически снижается, что предопределяет необходимость дополнительного вскрытия алмазоносного слоя. Величина удельного расхода алмазов этого инструмента составляет для указанных выше условий

Т а б л и

**Удельный расход алмазов дисковых пил конструкции ИСМ АН УССР
(производительность)**

Характеристика инструмента	Объем наблюдений,				
	Мрамор				
	коелгин- ский	газган- ский	уфалей- ский	бахмаль- ский	армян- ский
АПСИ-1100, А 500/400, МЗ, 35%	534,43	164,86	60,37	—	—
АПСИ-1100, А 500/400, МЗ, 35%	532,30	164,20	54,30	—	—
АПСИ-1100, А 500/400, МЗ, 35% (2 шт.)	Об щ и й о б ъ е м				
АПСИ-1100, АСС 500/400, МЗ, 35%, (2 шт.)	То же				
АПСИ-1100, АСК 500/400, МЗ, 35%, (2 шт.)	»				
АПСИ-1100, А 400/315, МЗ, 40%	82,32	70,00	—	—	—
	126,90	—	—	22,18	9,20
АПСИ-1100, АСС 400/315, МЗ, 40%	116,48	75,61	—	—	—
	134,84	—	—	29,14	7,56

0,036—0,040 г/м², что безусловно является прямым следствием использования его не по назначению.

Применение пил из синтетических алмазов при распиловке мрамора обеспечивает целостность кромок плит и повышение качества поверхности распила, что снижает трудоемкость последующих операций по шлифованию.

Высокую работоспособность показали инструменты конструкции ИСМ АН УССР и в многодисковой технологии распиловки мрамора Газганского месторождения в условиях Львовского объединенного цеха треста «Львовнерудпром». Процесс распиловки осуществлялся шестью алмазными пилами диаметром 1100 мм с широкими межсегментными пазами, установленными для одновременной работы на многодисковом станке конструкции СКБ ВНИИНСМ (г. Москва), со скоростью продольной подачи 180—200 мм/мин при глубине однопроходного резания 400 мм. Проведенными испытаниями с общим объемом наблюдений 730 м² площади резания установлено, что для данной технологической схемы обработки износостойкость инструментов практически не изменяется для всех принятых к изучению при-

при резании пород природного камня средней твердости и мягких
1400—2100 см²/мин)

квадратные метры площади резания				Износ инстру- мента по ра- диусу, мм	Удельный рас- ход алмазов, г/м ² площади ре- зания
Травер- тин	Ракушеч- ник	Мозаичные плиты	Всего		
69	170,36	79,43	1073,45	Амортизация	0,026
70	168,35	76,60	1066,48	То же	0,026
резания			2320,00	»	0,026
То же			2264,00	»	0,026
»			1646,00	»	0,036
—	—	—	152,32	0,74	0,022
—	—	—	158,28	0,98	0,028
—	—	—	192,09	0,42	0,010
—	—	20,58	192,12	0,83	0,018

родных и синтетических алмазов марок АСК и АСС зернистостью 400/315 и 500/400; расчетное значение их удельного расхода составило в среднем 0,006 г/м².

Как и для условий однодискового резания, рабочий процесс осуществлялся устойчиво с заданной производительностью, в отличие от серийных образцов инструментов на связке М50, для которых требовалось периодическое вскрытие алмазонасного слоя. По сравнению с ним применение алмазных дисковых пил изучаемой конструкции позволило достигнуть общего увеличения производительности распиловки до 3 раз и снизить удельный расход алмазов в 1,5 раза.

Аналогичные результаты получены также в процессе производственных испытаний дисковых пил из синтетических алмазов в условиях Кондопожского и Газалкентского камнеобрабатывающих комбинатов, Шархинского карьера треста «Крымнерудпром», Хустского камнеобрабатывающего завода и ряда других предприятий на различных операциях алмазно-дискового резания природного камня средней твердости (мраморы Коелгинского и Газганского месторождений, гранодиорит, доломит и др.).

Как отмечалось ранее, осуществлением комплекса исследовательских работ в ИСМ АН УССР удалось решить проблему значительного повышения прочностных ресурсов корпусов дисковых пил путем совершенствования технологии выполнения межсегментных пазов, выбора их рациональной конфигурации и размеров, а также путем разработки нового состава стали 9ХФМ, что открывает га-

Таблица 34

Удельный расход алмазов дисковых сегментных пил АПСН-500/400, А 500/400, МОЗ, 50% с различной высотой алмазоносного слоя

h_c , мм	Число пил, шт.	Объем наблюдений, приведенный к граниту Корнинского месторождения, квадратные метры площади резания		Удельный расход алмазов, г/м ²
		на одну пилу	всего	
5	10	54,7	547,0	0,22
8	11	86,6	952,6	0,21
10	8	100,9	807,2	0,20

рантированные возможности полного использования алмазоносных сегментов увеличенной высоты.

Проведенными в условиях БЭИКЗ испытаниями опытной партии инструмента диаметром 500 мм установлено, что на протяжении всего срока службы происходит незначительный боковой износ сегментов, при этом обеспечиваются нормальные условия эксплуатации до амортизации без затирания корпуса для удвоенной (против стандартной) высоты алмазоносного слоя — 10 мм (табл. 34).

В процессе обработки экспериментальных данных обнаружена некоторая диспропорция в интенсивности износа сегментов по высоте: большая в центральной части и снижающаяся к периферии с двух сторон. Представленные данные позволяют говорить о тенденции незначительного снижения удельного расхода алмазов по мере увеличения высоты рабочего слоя, что является следствием уменьшения отношения неиспользованного остатка алмазоносного слоя к его объему.

При обработке твердых разновидностей природного камня в условиях БЭИКЗ и завода «Гранит» (г. Киев) на операции окантовки облицовочных изделий испытана большая партия опытных вариантов дисковых пил диаметром

500 мм, оснащенных прочными синтетическими алмазами различных марок с высотой сегментов 5 и 10 мм. Из приведенных в табл. 35 и 36 данных следует, что минимальное значение удельного расхода алмазов в опытных образцах

Таблица 35

Удельный расход алмазов опытных конструкций сегментных пил диаметром 500 мм при резании гранита в условиях БЭИКЗ

Характеристика инструмента	Содержание алмазов в инструменте, г	Объем наблюдений, квадратные метры площади резания				Износ инструмента по радиусу, мм	Удельный расход алмазов, г/м ² площади резания
		Граниты					
		Капустинское месторождение	Кудашевское месторождение	Корнянское месторождение	Всего		
Конструкции ИСМ АН УССР							
АПСИ-500, АСС 400/135, МОЗ, 50%	11,88	12,06	29,48	5,18	46,72	4,6	0,23
АПСИ-500, АСС 400/315, МОЗ, 50%	24,04	13,36	14,85	—	28,11	2,86	0,24
АПСИ-500, А 400/315, МОЗ, 50% ($P_p = 5-6$ кг)	22,32	14,40	14,17	9,71	38,28	8,18	0,48
АПСИ-500, АСК 400/315, МОЗ, 50%	22,32	21,82	10,71	—	32,53	4,38	0,30
АПСИ-500, А/АСС 400/315, МОЗ, 50%	11,88	26,33	3,80	1,63	31,76	3,61	0,27
АПСИ-500, А/АСК 400/315, МОЗ, 50%	22,32	60,43	10,96	7,93	79,32	9,26	0,26
Конструкции КБЗАИ							
АПС-500, А 5000/400, М50, 50%	10,02	18,33	—	0,52	18,85	2,17	0,23

Примечание. Производительность резания колебалась в пределах 190—250 см²/мин

обеспечивает инструмент, оснащенный шлифпорошками марки АСС. Пилы, оснащенные природными алмазами с прочностью зерен на раздавливание $P_p = 5-6$ кгс, характеризуются повышенным значением их удельного расхода, что согласуется с выводами лабораторных исследований.

Удельный расход алмазов опытных конструкций сегментных пил диа

Характеристика инструмента	Содержание алмазов в инструменте, г	Производительность резания, см ² /мин	Объем наб	
			I категория	
			Гранит Тавского месторождения	
Конструкции ИСМ АН УССР				
АПСИ-500, АСС 400/315, МОЗ, 50%	22,32	240—360	9,80	
АПСИ-500, АСК 400/315, МОЗ, 50%	22,32	240—360	—	
АПСИ-500, $\frac{А 400/315}{АСС 400/315}$, МОЗ	22,32	240—360	—	
АПСИ-500, А 400/315, МОЗ, 50% ($P_p = 5-6$ кгс)	22,32	240—360	3,62	
Конструкции КБЗАИ				
АПС-500, А 500/400, М50, 50%	10,02	240—320	0,4	
АПС-500, концентрат, М50, 50%	10,02	240—280	—	

По износостойкости инструменты конструкции ИСМ АН УССР, оснащенные синтетическими алмазами марки АСС, и серийного производства из природных алмазов обеспечивают практически равнозначные показатели при более высоком качестве поверхности распила и точности окантовки для первых. В процессах взаимодействия зерен с твердыми породами камня, в которых превалирующее воздействие на износ оказывают термомеханические явления, определяемые (при других равных условиях) свойствами разрушаемого материала, влияние добавок в алмазосный слой менее прочных порошков не сказывается на стойкостных показателях инструмента.

Износостойкость дисковых пил с увеличенной высотой алмазосного слоя по высоте сегмента изменяется аналогично предыдущему случаю, хотя в целом стойкость таких инструментов соответствует общему уровню этого показателя. Тем не менее для окончательных выводов об эффективности применения инструментов с увеличенной высо-

метром 500 мм при резании гранитов в условиях завода «Гранит»

людений, квадратные метры площади резания				Износ инструмента по радиусу, мм	Удельный расход алмазов, приведенный к граниту II категории, г/м ² площади резания
II категория	III категория	IV категория	Суммарный, приведенный ко II категории		
Граниты Корвинского, Капустинского месторождений	Гранит Железевского месторождения	Лабрадорит			
6,96	5,21	—	23,98	2,59	0,24
2,36	17,54	0,8	15,37	1,9	0,27
1,87	6,35	5,41	9,57	1,3	0,30
10,47	20,73	6,05	33,76	5,76	0,38
8,43	3,34	1,52	12,26	1,55	0,25
2,14	0,85	1,75	4,41	0,53	0,24

той алмазосносного слоя и обоснования рациональной величины этого параметра в зависимости от диаметра пилы и условий эксплуатации целесообразна постановка и проведение специальных комплексных исследований. При решении этой задачи следует также учитывать состояние оборудования, технологические требования к процессу резания, во многом определяющие долговечность и прочность как самих сегментов, так и паяных соединений.

В результате выполнения комплекса научно-исследовательских и проектно-технологических работ созданы новые конструк-

Таблица 37

Сравнительные данные по стойкости до амортизации алмазных дисковых пил

D, мм	Стойкость, квадратные метры площади резания	
	конструкции ИСМ АН УССР	фирмы «Диамант Борт»
500	595	147
630 (600)	735	239
1000	1319	1215

Показатели применения алмазных дисковых пил конструкции ИСМ АН УССР и фирмы «Диамант борт» на камнеобрабатывающих предприятиях ЧССР в 1976—1977 гг.

Предприятие	Инструмент		Обрабатываемый материал	Стойкость до амортизации, квадратные метры площади резания	
	Д, мм	Характеристика алмазного слоя		одной пилы	средняя
Чешско-моравская промышленность камня (г. Градец-Кралове)	400	Конструкции ИСМ АН УССР А/СС 315/250, МЖ, 50% А/СС 400/315, МОЗ, 50% А/СС 400/315, МОЗ, 50% А/СС 315/250, МОЗ, 50% » А/СС 315/250, МОЗ, 50% А/СС 400/315, МОЗ, 50% » 400/315, МОЗ, 50%	Песчаник Сиенит Гранит	26,4	27,4
	500			28,3	119,8
	500			106,3	
				125,0	
				145,4	
				102,4	
				42,1	
				51,5	
				57,3	
				48,0	
	97,2				
		Гранит + андезит	78,0	78,0	
630	АСС 315/250, МОЗ, 50% А 630/500 АСС 500/400 АСС 500/400, МЗ, 40%	Сиенит	60,6	99,0	
			128,6		
			107,9		

Словенская промышленность камня (г. Крушина)	630	400/315, МОЗ, 50% » » 500/400, МОЗ, 50% » » » » »	9-6005	Гранит + + андезит	138,29	125,5			
			9-5987		145,36				
			9-6001		90,55				
			8-48995		103,44				
			8-48997		154,60				
			8-49071		127,27				
			8-49001		106,01				
			8-49057		138,50				
Чешско-моравская промышленность камня (г. Градец-Кралове)	1100	A/ACC 500/400, МОЗ, 50%	19115	Сиенит	473,5	241,8			
	1100	A/CC 500/400, МОЗ, 50% »	8-48963		70,9				
	1100	»	7-19117		411,6				
					11,0*				
	1100	A/ACC 500/400, МОЗ, 50% A/ACC 400/315, МОЗ, 40%	7-19119 7-34753	Сиенит + + гранит	278,0 234,6	256,3			
	Чешско-моравская промышленность камня (г. Градец-Кралове)	500	Конструкция фирмы «Диамант борт» — — — — — — — — — —		6517678		Сиенит	75,0	69,6
		6517670		64,2					
		6517668		57,8					
		6521981		72,9					
		6517659		68,3					
		6517664		69,0					
		6521961		58,0					
		6521965		60,3					
600		602821		120,0	Сиенит	120,0		105,4	
		6522010		90,8		90,8			
600	602824	89,8	Сиенит +	89,8	82,0				
1200	6522155	74,3	+ гранит	74,3	106,4				
	431535	66,0	Сиенит	66,0					
	6424326	146,8		146,8					

* Низкое значение стойкости обусловлено поломкой.

ции дисковых сегментных пил, оснащенных прочными синтетическими алмазами марок АСК и АСС, не уступающих по работоспособности инструментам из природных алмазов, а в некоторых случаях и превышающих их. Созданные инструменты могут полностью заменить серийно выпускаемые из природных алмазов и быть рекомендо-

Таблица 39

Обобщенные показатели применения алмазных дисковых пил
(по данным табл. 38)

Конструкция инструмента	D, мм	Обрабатываемый материал	Число амортизированных пил, шт.	Суммарный объем выполненной работы, м ²	Среднее значение стойкости пыли, м ²
ИСМ АН УССР	500, 630 1000, 1100	Гранит, снетит	21 6	2155,7 1479,6	102,6 246,6
Фирма «Диамант борт»	500, 600 1200	Андезит	12 2	901,6 212,8	75,1 106,4

ваны к широкому внедрению в промышленность строительных материалов.

Убедительным свидетельством высоких эксплуатационных качеств алмазных дисковых пил конструкции ИСМ АН УССР может служить то, что в течение десяти последних лет они используются широким спросом и в зарубежной промышленности — Болгарии, Чехословакии, Венгрии, Польше, ГДР, Югославии и других странах. Экспортные поставки в эти страны осуществляются в виде как готовых инструментов, так и алмазодносных сегментов.

В качестве примера значительный интерес представляют данные о работоспособности алмазных дисковых пил конструкции ИСМ АН УССР диаметром 400, 500, 630, 1000 и 1100 мм, полученные в результате их применения в различных условиях на камнеобрабатывающих предприятиях ЧССР, а также показатели применения аналогичных инструментов одной из ведущих зарубежных фирм «Диамант борт» (табл. 37). Инструмент советского производства, применяемый в камнеобрабатывающей промышленности ЧССР на протяжении длительного времени (более пяти лет), получил широкое распространение на различных технологических операциях — распиловке негабаритных блоков,

окантовке изделий из природного камня и нарезке деформационных швов в бетонных покрытиях дорог и аэродромов. Алмазный дисковый инструмент используется на оборудовании зарубежных фирм: «Нью стар» (Италия), «Торпедо» (Польша), «Сметкорен» (Швеция), Чехословацкого производства (модели ПМК-6, ПМК-12, МОП, «Ганшел» и др.)

Т а б л и ц а 40

Показатели применения алмазных дисковых пил при резании твердых материалов на предприятии Словенской промышленности камня (г. Левице)

Конструкция инструмента	D, мм	Стойкость до амортизации, квадратные метры площади резания		Относительная стоимость затрат на окантовку, %
		одной пилы	суммарная	
ИСМ АН УССР	630	124,60	2262	51
Фирма «Диамант борт»	500	80,00	240	81
	600	101,35	1723	100

Пилы советского производства оснащаются синтетическими и природными алмазами, а также смесью синтетических и природных алмазов с массовым соотношением 1 : 1; инструмент фирмы «Диамант борт» в основном оснащен смесью синтетических и природных алмазов.

Из приведенных в табл. 38 данных следует, что при резании твердых пород камня показатели работоспособности инструмента советского производства и фирмы «Диамант борт» практически равнозначны, а в ряде случаев, особенно для пил диаметром 1000 и 1100 мм, инструмент советского производства по стойкостным показателям превосходит в 1,3—2,0 раза.

При резании мрамора преимущества инструмента советского производства более убедительны. Так, предприятием «Промышленность камня» (г. Пржибрам) по результатам использования инструмента в 1976—1977 гг. представлены следующие обобщенные показатели (табл. 39).

Показателен с точки зрения экономической целесообразности применения алмазного дискового инструмента различного производства анализ затрат на 1 м² продукции, произведенной народным предприятием г. Левице по ре-

зультатам использования большого числа пил (табл. 40). Из приведенных данных видно, что стойкость пил советского производства на 20—25% выше стойкости инструмента фирмы «Диамант борт», а удельные затраты в два раза ниже.

4. Методика расчета экономической эффективности применения алмазного инструмента

В последние годы в камнеобрабатывающую промышленность и строительное производство широко внедряется инструмент на основе природных и синтетических алмазов. Его эффективность обусловлена высокими эксплуатационными качествами, благодаря которым открываются реальные перспективы интенсификации производственных процессов и совершенствования технологических схем и методов обработки. Внедрение нового прогрессивного инструмента выдвигает перед работниками камнеобрабатывающих предприятий в качестве основной задачи овладение аппаратом определения эффективности его применения.

Оценка результатов внедрения новой техники производится с помощью системы технико-экономических показателей (основных и дополнительных), поскольку один показатель вне связи с другими не может характеризовать многообразие технического прогресса, происходящего в народном хозяйстве и его отдельных отраслях.

Показатели технико-экономической эффективности внедрения алмазного инструмента могут быть подразделены на четыре группы: технические, организационные, экономические, социальные [98].

К техническим относятся прежде всего понижение шероховатости и повышение точности обработки изделий, интенсификации режимов обработки, в частности повышение производительности применяемого оборудования, снижение технологического брака и др.

В число организационных показателей входят такие, как уменьшение длительности цикла изготовления изделий, сокращение числа технологических операций, уменьшение переналадок оборудования и инструмента и др. На основе комплекса соответствующих технических и организационных показателей определяются экономические показатели. Последние отражают повышение производительности труда и снижение себестоимости продукции. Они

могут рассчитываться как на единицу продукции, так и на весь ее годовой объем. Сначала определяются частные показатели экономического эффекта внедрения алмазного инструмента, а затем на их основе общие.

К частным показателям экономического эффекта, выражающим величину экономии на отдельных элементах затрат общественного труда, относятся снижение затрат по заработной плате, изменения затрат на инструмент, содержание и эксплуатацию оборудования и ряд других.

Общие показатели экономического эффекта суммируют экономию (перерасход) на различных затратах труда, обусловленных изготовлением (использованием) продукции, обработанной с помощью алмазного инструмента. К числу общих показателей относятся изменения себестоимости продукции, капиталовложений, приведенных затрат. Последний показатель является обобщающим при оценке сравнительной экономической эффективности внедрения технологических процессов алмазной обработки.

Для характеристики социальной значимости внедрения и использования алмазных инструментов следует применять соответствующие социальные показатели, которые характеризуют улучшение условий труда и повышение культуры производства.

Оценка экономической эффективности внедрения алмазного инструмента должна, с одной стороны, исходить из общих методических положений оценки экономической эффективности капиталовложений и новой техники, а с другой — отображать особенности технологических процессов алмазной обработки различных материалов и изделий.

Определение экономической эффективности внедрения алмазного инструмента обычно проводится с целью принятия решения об экономической целесообразности внедрения данного технологического процесса обработки; текущего и перспективного планирования эффективности мероприятий по внедрению алмазной обработки; установления величин отчислений в фонд экономического стимулирования и материального поощрения научно-исследовательских институтов и предприятий; проведения технико-экономического анализа результатов внедрения алмазного инструмента; установления размеров премий за внедрение нового инструмента.

В общем случае годовой экономический эффект от внедрения алмазного инструмента при различных техноло-

гических процессах обработки рассчитывается на основе сопоставления приведенных затрат. Последние учитывают как себестоимость продукции, так и определенные отчисления от капиталовложений в основные и оборотные производственные фонды в соответствии с нормативным коэффициентом эффективности в расчете на годовой объем выпускаемой продукции. Если в сравниваемых вариантах технологических процессов до и после внедрения алмазной обработки обеспечивается одинаковый производственный результат по объему выпускаемой продукции, ее качеству и срокам поставки, то годовой экономический эффект определяется по разности приведенных затрат в производство, рассчитанных для условий до и после внедрения синтетических алмазов.

Расчет производится по формуле

$$\Theta = (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2), \quad (V.9)$$

где Θ — годовой экономический эффект, или годовая экономия, руб.; C_1 — себестоимость годового объема продукции (деталей) при производстве ее в условиях, существовавших до внедрения алмазного инструмента в расчете на годовой объем продукции (деталей), выпускаемой после внедрения, руб.; C_2 — себестоимость годового объема продукции после внедрения алмазного инструмента, руб.; K_1 — капиталовложения в производственные фонды (основные и оборотные) в условиях, существовавших до внедрения алмазного инструмента, в расчете на годовой объем продукции, выпускаемой после внедрения, руб.; K_2 — капиталовложения в производственные фонды (основные и оборотные) в расчете на годовой объем продукции после внедрения алмазного инструмента, руб.; E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности.

При определении годового экономического эффекта величина нормативного коэффициента принимается такой, как в действующем или аналогичном производстве, но не ниже 0,12.

Преобразовав формулу (V.9), получим следующее выражение для определения годового экономического эффекта:

$$\Theta = \Delta C \pm \Sigma_n \Delta K, \quad (V.10)$$

где ΔC — изменение себестоимости годового объема продукции, руб.; ΔK — дополнительные капиталовложения в производственные фонды, руб.

Годовой экономический эффект от внедрения алмазного инструмента можно определить по формуле

$$\Theta = [(C_1' + E_n K_1') - (C_2' + E_n K_2')] A_2, \quad (V.11)$$

где C_1 и C_2' — себестоимость единицы продукции до и после внедрения алмазного инструмента, руб.; K_1' и K_2' — удельные капиталовложения на единицу продукции до и после внедрения алмазного инструмента, руб.; A_2 — годовой объем продукции, производимой после внедрения алмазного инструмента, руб.

Внедрение технологических процессов алмазной обработки часто влечет за собой дополнительные капиталовложения на приобретение нового оборудования (в том числе специального), отвечающего требованиям алмазной обработки, модернизацию действующего, а также изготовление оборудования и приспособлений.

Кроме того, в отдельных случаях в связи с внедрением новых технологических процессов с применением алмазного инструмента иногда возникает необходимость в изменении технологической планировки цеха, что также ведет к дополнительным капитальным затратам. В этих случаях годовой экономический эффект определяется по формулам (V.9) — (V.11).

Частным случаем может быть вариант, когда внедрение алмазного инструмента не вызывает необходимости в дополнительных капиталовложениях. При этом годовой экономический эффект определяется по формулам

$$\Theta_1 = C_1 - C_2 = \Delta C; \quad (V.12)$$

$$\Theta = (C_1' - C_2') A_2. \quad (V.13)$$

Если при внедрении алмазного инструмента возрастает объем выпуска продукции действующего производства, то необходимо определять экономию условно-постоянной части накладных расходов Θ_n по формуле

$$\Theta_n = \frac{(A_2 - A_1) N_y}{A_1} = K_A N_y, \quad (V.14)$$

где A_1 — годовой объем продукции, производимой до внедрения алмазного инструмента, руб.; N_y — годовая сумма условно-постоянной части накладных расходов, руб.; K_A — коэффициент прироста продукции

При использовании алмазного инструмента, как правило, изменяются не только затраты на производство продукции,

но и ее потребительские свойства. В связи с этим годовой экономический эффект от внедрения алмазного инструмента следует определять с учетом изменения затрат как в сфере производства, так и в сфере потребления продукции улучшенного качества.

Необходимо, чтобы хозрасчетные результаты внедрения алмазного инструмента (хозрасчетный эффект) были неразрывно связаны и достигались в полном соответствии с народнохозяйственными интересами (народнохозяйственный эффект), так как основой технического прогресса является не просто достижение экономического эффекта от внедрения алмазного инструмента, а снижение суммы затрат на единицу продукции, производимой с их применением.

Если в результате внедрения алмазного инструмента улучшаются качественные показатели продукции, то на такую продукцию может быть установлена более высокая цена.

Годовой экономический эффект, получаемый производителем продукции улучшенного качества, определяется по следующей формуле:

$$\Delta_{пр} = [Ц_2 - (C_2 + E_n K_2)] - [Ц_1 - (C_1 + E_n K_1)], \quad (V.15)$$

где $(C_2 + E_n K_2)$ — приведенные затраты на производство годового объема продукции улучшенного качества, руб.; $(C_1 + E_n K_1)$ — приведенные затраты на производство годового объема продукции прежнего качества, эквивалентного при потреблении годовому объему новой продукции, руб.; $Ц_2$ — стоимость годового объема новой продукции, исчисленная по новым оптовым ценам, руб.; $Ц_1$ — стоимость годового объема старой продукции, эквивалентного при потреблении годовому объему новой продукции, исчисленная по ранее действовавшим ценам, руб.

Годовой экономический эффект, получаемый потребителем продукции улучшенного качества, определяется по формуле

$$\Delta_{потр} = (Ц_1 - Ц_2) + \frac{И'_1 - И'_2}{P_{a_2} + E_n}, \quad (V.16)$$

где $И'_1$ и $И'_2$ — годовые издержки потребителя при эксплуатации старой и новой продукции без учета затрат на ее приобретение, руб.; P_{a_2} — коэффициент амортизационных отчислений, определяемый с учетом срока службы продукции

Поскольку выбор наиболее эффективного варианта обработки должен быть направлен в конечном счете на повышение общей эффективности капитальных вложений и действующего производства, применение расчетов сравнительной эффективности не снимает необходимости анализа и оценки (абсолютной) эффективности сравниваемых вариантов капиталовложений.

В связи с этим наряду с определением сравнительной экономической эффективности внедрения алмазного инструмента на обработку необходимо определять и общую (абсолютную) экономическую эффективность как отношение эффекта прибыли ко всей сумме капиталовложений для внедрения алмазного инструмента:

$$\mathcal{E}_{\text{кп}} = \frac{\mathcal{C} - C}{K}, \quad (\text{V.17})$$

где K — капитальные затраты на внедрение алмазной обработки, руб.; \mathcal{C} — стоимость годового выпуска продукции, обрабатываемой с применением алмазного инструмента, в оптовых ценах предприятия (без налога с оборота) руб.; C — себестоимость годового выпуска продукции, руб.

Для предприятий, где применяются расчетные цены, а также плано-убыточных предприятий показатель общей экономической эффективности характеризуется отношением экономии от снижения себестоимости обрабатываемых деталей к вызвавшим эту экономию капиталовложениям:

$$\mathcal{E}_{\text{ск}} = \frac{C_1 - C_2}{K}. \quad (\text{V.18})$$

Для расчета экономического эффекта внедрения алмазного инструмента и технологических процессов алмазной обработки и определения экономической эффективности дополнительных капиталовложений необходимо располагать данными о величине себестоимости продукции.

Себестоимость алмазной обработки материалов определяется как сумма следующих основных элементов затрат, отнесенная к единице обрабатываемой поверхности изделия: заработная плата основных рабочих (с начислениями), затраты на эксплуатацию оборудования и использование инструмента. Размер капиталовложений на внедрение алмазного инструмента определяется как разность затрат, необходимых на приобретение оборудования и высвобож-

Таблица 41

Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатель	Условные обозначения	До внедрения	После внедрения
Годовой объем выпуска, м ²	A_T		1000
Норма времени на операции резки 1 м ² , ч	t	0,49	0,31
Средняя часовая ставка основных рабочих, руб.	$З_ч$		0,42
Коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату	$K_{доп}$		1,2
Коэффициент, учитывающий отчисления в фонд социального страхования	$K_{соц}$		1,06
Коэффициент выполнения норм времени	$K_{вд}$		1,1
Стоимость дисковой пилы, руб.	$Ц_{ин}$	49,0	101
Стойкость дисковой пилы, м ²	$q_{ст}$	140	2500
Содержание алмазов в дисковой пиле, г	B	—	2,88
Число заточек дисковой пилы, шт	$n_{зат}$	2	—
Затраты на одну заточку, руб.	$З_{зат}$	0,24	—
Действительный годовой фонд времени работы единицы оборудования (форматно-раскrojного станка), ч	F_d		3950
Часовая производительность форматно-раскrojного станка при работе одной пилой, м ²	$q_ч$	0,11	0,16
Стоимость единицы оборудования, руб.	$Ц_{об}$		1000
Коэффициент загрузки единицы оборудования по времени	$K_{об.вд}$		0,85
Нормативный коэффициент экономической эффективности	E_H		0,15

Примечание. Для упрощения примера принимаем $A_T = A_2$.

Таблица 42
Расчет экономического эффекта

Показатель	Формула для расчета	До внедрения	После внедрения	Экономия
Заработная плата основных рабочих с начислением на 1000 м ² пропила, руб.	$C_z = Z_q K_{доп} K_{соц} t$	260	164	96
Технологическое оборудование, шт.	$Q_{об} = \frac{A_r}{q_q K_{вр} F_d K_{об.вр.}}$	3	2	1
Затраты по инструменту на 1000 м ² пропила, руб.	$C_{ин} = \frac{Ц_{ин} + n_{зат} Z_{зат}}{q_{ст}}$	357,1	40,8	316,3
Суммарная себестоимость операции 1000 м ² пропила, руб	$C_{оп} = C_z + C_{ин}$	617,1	204,8	412,3
Себестоимость годового объема выпуска плит, руб.	$C = C_{оп} A_r$	6171	2048	4123
Капиталовложения на оборудование, руб.	$K_{об} = Ц_{об} Q_{об}$	3000	2000	1000
Годовой экономический эффект, руб.	$\mathcal{E} = \Delta C - E_n \Delta K$	—	—	4273

Таблица 43
Исходные данные для расчета экономического эффекта

Показатель	Окантовка изделий из гранита до и после внедрения	
	обозначение	величина
Годовой выпуск продукции, м ²	A_r	15720
Годовой фонд рабочего времени, ч	T	3714
Часовая производительность, м ² /ч	Π_1^*	1,35
Часовая тарифная ставка рабочего, руб./ч	Z_q	0,627
Коэффициент, учитывающий доплаты к тарифу	$K_{доп}$	1,23

* Часовая производительность после внедрения равна 4 м²/ч.

Показатель	Окантовка изделий из гранита до и после внедрения	
	обозначение	величина
Балансовая стоимость оборудования, руб.	Б	22000
Норма амортизации	а	0,122
Коэффициент, учитывающий затраты на эксплуатацию и текущий ремонт оборудования	К _о	0,31

Таблица 44
Расчет экономического эффекта

Показатель	До внедрения		После внедрения		Расчетная формула
	Обозначение	Величина	Обозначение	Величина	
Расчетное число оборудования	Q ₁	3,14	Q ₂	1,06	$Q = \frac{A}{T\Pi}$
Удельная основная заработная плата в начислениями, руб/м ²	C _{з1}	0,57	C _{з2}	0,18	$C_z = \frac{3_z K_{доп} TQ}{A}$
Удельные затраты на амортизацию	C _{а1}	0,54	C _{а2}	0,18	$C_a = \frac{BaQ}{A}$
Удельные затраты на содержание и ремонт оборудования	C _{о1}	0,17	C _{о2}	0,06	$C_o = C_a K_o$
Удельные затраты на инструмент, руб/м ²	C _и	1,80	C _и	0,99	—
Себестоимость окантовки по переменным статьям расходов, руб./м ²	C ₁	3,08	C ₂	1,43	$C = C_z + C_a + C_o + C_{и}$
Удельные капиталовложения, руб./м ²	K ₁	4,39	K ₂	1,48	$K = \frac{BQ}{A}$

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_r = (3_1 - 3_2) A_r = (C_1 + E_H K_1) - (C_2 + E_H K_2) A_r = [(3,08 + 0,15 \times 4,39) - (1,43 + 1,48 \times 0,15)] \times 15720 = [3,74 - 1,43 + 0,22] \times 15720 = 32,85$ тыс. руб.

даемых в результате отказа от ставшего ненужным оборудования.

Ниже в качестве примера приведены расчеты годового экономического эффекта от применения алмазных пил диаметром 320 мм [30] взамен твердосплавных пил (исходные данные — табл. 41, расчет — табл. 42) и от применения новой конструкции алмазных пил диаметром 500 мм со сменными утоненными режущими элементами для окантовки изделий из гранита (исходные данные — табл. 43, расчет — табл. 44).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительный прогресс в камнеобрабатывающей промышленности неразрывно связан с использованием высокопроизводительных алмазных инструментов и эффективных технологических схем обработки на основе алмазно-дискового резания.

Последние достижения в теории и практике процессов алмазно-дискового резания природного камня убедительно свидетельствуют о больших перспективах дальнейшего их развития, несмотря на значительные трудности, обусловленные многообразием взаимосвязанных факторов и явлений, подлежащих изучению.

В области теории наиболее важно дальнейшее углубленное исследование и разработка математических моделей, описывающих основные параметры рабочей поверхности алмазонасного слоя инструмента, его кинематику, износ и механику взаимодействия с разрушаемым материалом.

Решение этих задач может базироваться на разработке и использовании новых более совершенных методов изучения контактных явлений (тепловых и механических) в зависимости от свойств обрабатываемых материалов и рабочих алмазонасных композиций, режимов и условий микрорезания, а также на основе дальнейшего развития и совершенствования аппарата вероятностно-статистического анализа и описания формы и геометрии алмазных зерен, основных кинематических параметров процессов алмазно-абразивного резания материалов и др.

Реализация указанных вопросов послужит надежным фундаментом в создании научно обоснованных методов конструирования инструментов и управления процессами

алмазно-дискового резания природных каменных материалов.

В настоящее время на основе выполнения комплекса экспериментально-исследовательских работ созданы эффективные конструкции дисковых сегментных пил из синтетических алмазов, которые при обработке твердых разновидностей природного камня не уступают по своим эксплуатационным качествам серийно выпускаемым инструментам из природных алмазов, а при резании других материалов и превосходят их в 1,5—2,0 раза. Решение ряда организационно-технических вопросов, связанных с освоением отечественной промышленностью технологии производства прочных крупных фракций синтетических алмазов марок АСК и АСС в необходимых объемах, является важным фактором всемерного развития камнеобрабатывающей промышленности и строительной индустрии.

В связи с растущими требованиями к надежности и эффективности использования алмазных дисковых инструментов разработаны и освоены промышленностью технологические процессы изготовления листового проката из стали 9ХФМ и корпусов для пил, что позволяет значительно увеличить их прочностные ресурсы. С точки зрения максимального использования этих ресурсов целесообразны исследования по разработке технологии спекания алмазных сегментов с увеличенной высотой алмазоносного слоя, обеспечивающей стабильные свойства по всему объему, и по определению оптимального диапазона этого размера в зависимости от диаметра инструмента, его назначения и условий эксплуатации.

Перспективы разработки и использования новых связок, обладающих повышенными алмазоудержанием и износостойкостью, должны рассматриваться в неразрывной взаимосвязи с успехами в области создания высокопрочных и термостойких алмазных порошков. В теоретическом плане задачей исследователей технологического профиля является разработка системы комплексных показателей и требований к алмазоносному слою, которые могли бы быть трансформированы в соответствующие свойства связок и реализованы специалистами-материаловедами.

В области совершенствования существующих и создания новых эффективных конструкций алмазных дисковых пил определенные перспективы имеются в решении вопросов, связанных с обоснованием и выбором их рациональ-

ных конструктивных параметров (длины и высоты сегментов, расстояний между ними, размеров и конфигураций пазов) в зависимости от назначения инструмента и технологических требований. В качестве определяющих параметров, позволяющих оценивать изучаемые варианты, должны приниматься толщина среза, снимаемого одним зерном, характеризующая напряженное состояние в месте контакта зерна со связкой, и коэффициент уплотнения мелкодисперсных продуктов разрушения.

Одним из примеров практического использования теоретических выводов может служить создание специальной конструкции алмазных дисковых пил увеличенного диаметра со сменными утоненными режущими элементами, обеспечивающей по сравнению с обычным исполнением инструментов повышение производительности и износостойкости в 1,5—2,0 раза.

Для более полного использования алмазов как инструментального материала представляется целесообразным разработка способов стабилизации дисковых пил пневматическими, гидродинамическими, механическими и другими средствами, а также обеспечение предварительного напряженного состояния в корпусах инструментов методами вальцевания или проковки. Реализация всех рассмотренных направлений не только позволит значительно повысить технико-экономические показатели применения инструментов в традиционных процессах резания, но и открывает реальные перспективы совершенствования технологических схем обработки, из которых наиболее прогрессивными являются поточно-механизированные линии по распиловке. Одно из таких решений — разработка многоступенчатой технологии алмазно-дисковой распиловки изделий из твердых пород природного камня, освоение которой, по предварительным расчетам, существенно интенсифицирует производственные процессы (более чем в пять раз) и повысит их эффективность.

В настоящее время имеются все основания считать, что постоянное совершенствование и широкое применение высокопроизводительных процессов алмазно-дискового резания в практике обработки природного камня позволит успешно решить одну из важнейших задач по значительному снижению себестоимости облицовочно-декоративных изделий, доведя их по этому показателю до уровня искусственных облицовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абезгауз В. Л.* Режущие органы машины фрезерного типа для раз работки горных пород и грунтов.— М.: Машиностроение. 1965 — 280 с.
2. *Александров В. А., Дмитриев В. И., Заметайло В. В. и др.* Распи ловка строительных материалов алмазными полосовыми и дисковы ми пилами.— В кн.: Синтетические алмазы — ключ к техниче скому прогрессу. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 2, с. 226—233.
3. *Александров В. А., Мифлиг Д. М.* Износ синтетических алмазов и связки при шлифовании природного камня.— Синтет алмазы, 1977, № 5, с. 36—41.
4. *Александров В. А., Левин М. Д.* Обработка природного камня ал мазным инструментом.— Синтег. алмазы, 1976, № 5, с. 63—68
5. *Александров В. А., Галицкий В. Н., Муровский В. А., Хукален ко К. П.* Влияние прочности алмазов на работоспособность дисковых пил для резания прочных разновидностей камня.— Синтет. алмазы, 1973, № 4, с. 59—60.
6. *Александров В. А., Селех В. Ф.* К расчету рабочей поверхности ал мазных дисковых сегментных пил.— Синтет. алмазы, 1972, № 5, с. 39—40.
7. *Александров В. А., Левин М. Д.* Режимы работы и характеристика алмазного слоя дисковых пил для резания природного камня.— Пром-сть неруд. и неметаллоруд. материалов, 1971, вып. 3, с. 26—31
8. *Александров В. А., Муровский В. А., Хукаленко К. П.* Работоспо собность дисковых пил для резки гранита.— Синтет. алмазы, 1971, № 4, с. 47—48.
9. *Александров В. А.* Определение возвышений связки в дисковых пилах.— В кн.: Горный породоразрушающий инструмент. Киев: Техніка, 1970, с. 44—47.
10. *Александров В. А., Карюк Г. Г., Левин М. Д.* Конструктивные параметры алмазных дисковых пил для резания природного кам ня.— Пром-сть неруд. и неметаллоруд. материалов, 1970, вып. 4, с. 47—51.
11. *Александров В. А., Левин М. Д.* Влияние глубины однопроходного резания на износостойкость алмазных пил.— Строит. материалы и конструкции, 1970, № 1, с. 21—23.
12. *Алмазные дисковые пилы:* Проспект / «Босси» (США).— 4 с.
13. *Алмазные дисковые пилы:* Проспект / «Диамант борт» (Бельгия).— 6 с.

14. *Алмазные дисковые пилы*: Проспект / «Компани диамант» (Франция). — 2 с.
15. *Алмазные дисковые пилы*: Проспект/ «Нортон». — 4 с.
16. *Алмазные пилы для гранита и мрамора*: Проспект / «Корпорация Андерсон». — 3 с.
17. *Алмазный инструмент*: Проспект / «Дженерал Даймонд» (Италия). — 3 с.
18. *Алмазный инструмент для обработки камня*: Проспект / «Дж. К. Смит и сыновья» (Англия). — 4 с.
19. А. с. 397334 (СССР).
20. А. с. 396265 (СССР).
21. А. с. 501870 (СССР).
22. А. с. 360214 (СССР).
23. А. с. 311734 (СССР).
24. А. с. 262687 (СССР).
25. А. с. 262688 (СССР).
26. А. с. 568544 (СССР).
27. *Байкалов А. К., Сукенник И. Л.* Алмазный правящий инструмент на гальванической связке. — Киев: Наук. думка, 1976. — 204 с.
28. *Байкалов А. К., Вал Е. И.* Исследование закономерностей износа чашечных кругов из кубического нитрида бора. — Синтет. алмазы, 1970, № 6, с. 24—29.
29. *Бакуль В. Н.* Число зерен в одном карате — одна из важнейших характеристик алмазного порошка. — Синтет. алмазы, 1976, № 4, с. 22—27.
30. *Бюттнер А.* Показатели применения алмазного камнеобрабатывающего инструмента: Докл. на семинаре по обраб. камня, организ. ИСМ АН УССР и фирмой «Эрнст Винтер и сын» (ФРГ). — Нордерштедт, 1975. — 29 с.*
31. *Бюттнер А.* Станок для автоматизированного резания блоков твердых пород камня алмазным инструментом: Докл. на семинаре по обраб. камня, организ. ИСМ АН УССР и фирмой «Эрнст Винтер и сын» (ФРГ). — Нордерштедт, 1975. — 17 с.
32. *Бюттнер А.* Эффективность обработки — это алмаз плюс мощность привода: Докл. на семинаре по обраб. камня, организ. ИСМ АН УССР и фирмой «Эрнст Винтер и сын» (ФРГ). — Нордерштедт, 1975. — 14 с.
33. *Варданян К. С.* Оптимизация режимов резания с использованием закономерностей механики и изнашиваемости при алмазной обработке камня. — В кн.: Синтетические алмазы — ключ к техническому прогрессу. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 2, с. 245—250.
34. *Варданян К. С.* Современные камнеобрабатывающие станки и поточные линии. — Ереван: Айастан, 1975. — 226 с.
35. *Василевский В. В., Захаров К. Н., Перепеч К. А.* Алмазный инструмент для обработки горных пород и строительных материалов. — Абразивы и алмазы, 1967, вып. 3, с. 19—23.
36. *Выбор рабочих параметров при распиловке камня алмазными дисковыми пилами* / Rigvall В.: ИСМ АН УССР. — № 1379. — 10 с., ил. 3. — Информ. фирмы «Де Бирс», 1971, L 10.
37. *Гинзбург Б. И., Зисман М. С., Александров В. А., Хукаленко К. П.* Экономическая эффективность применения алмазного инструмента. — Строит. материалы, 1974, № 2, с. 8—9.

* Работы под № 30—32, 36, 41, 44, 91, 104 хранятся в б-ке ИСМ АН УССР

38. *Гмурман В. Е.* Введение в теорию вероятностей и математическую статистику.— М.: Высш. школа, 1963.— 238 с.
39. *Горбовец М. Н., Палей Л. М.* Состояние и перспективы развития оборудования для промышленности строительных материалов.— М., 1977.— 57 с. — (Обзор. информ. /ЦНИИТЭстроймаш).
40. *Дмитриев В. И., Мифлиг Д. М., Шухамет Н. Д.* Оборудование для камнеобработки.— Синтет. алмазы, 1976, № 5, с. 58—63.
41. *Заметайло В. В.* Прочность корпусов алмазных дисковых пил для резания строительных материалов: Докл. на семинаре по обраб. камня, организов. ИСМ АН УССР и фирмой «Эрнст Винтер и сын» (ФРГ).— Киев, 1976.— 29 с. Препринт ИСМ.
42. *Заметайло В. В.* Исследование долговечности корпусов алмазных дисковых пил в процессе резания строительных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1975. — 20 с.
43. *Игнатов С. Н.* Исследование разрушения горных пород алмазным инструментом применительно к исполнительному органу породопроходческого комбайна: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Караганда, 1966.— 26 с.
44. *Исследование* парапин горных пород с помощью алмазного конуса / Сасаки К., Хирота Т.; ИСМ АН УССР.— № 61.— 20 с.— Статья техн. исслед. бюро Японии. [1960].
45. *Карюк Г. Г., Александров В. А., Кацалуха С. А.* Исследование рабочих поверхности алмазосодного слоя дисковых камнерезных пил.— В кн.: Горный породоразрушающий инструмент. Киев: Техніка, 1970, с. 36—44.
46. *Карюк Г. Г., Александров В. А.* Оценка износа алмазосодного слоя дисковых камнерезных пил.— В кн.: Горный породоразрушающий инструмент. Киев: Техніка, 1970, с. 22—28.
47. *Карюк Г. Г., Александров В. А.* Расчет сил резания при обработке природного камня алмазными пилами.— Алмазы, 1970, вып. 3, с. 15—20.
48. *Карюк Г. Г., Александров В. А.* Исследование процесса распиловки лабрадорита алмазными дисковыми пилами.— В кн.: Теория и практика алмазной обработки. Сер. С-II. М.: НИИмаш, 1969, с. 106—111.
49. *Карюк Г. Г., Александров В. А., Кацалуха С. А., Левин М. Д.* Экономическая эффективность многодисковой распиловки природного камня.— Строит. материалы и конструкции, 1969, № 5, с. 41—42.
50. *Кондратов А. С., Старков В. К.* Закономерности расположения зерен на рабочей поверхности алмазного круга.— В кн.: Внедрение алмазов в промышленность. М.: НИИмаш, 1967, с. 7—20.
51. *Коновалов В. А., Александров В. А., Левин М. Д.* Влияние прочности алмазоудержания и скорости абразивного износа связки на работоспособность алмазно-абразивного камнерезного инструмента.— Синтет. алмазы, 1975, № 2, с. 26—28.
52. *Коновалов В. А., Александров В. А.* Исследование износостойкости связок алмазного камнерезного инструмента.— Синтет. алмазы, 1974, № 5, с. 27—29.
53. *Ковман А., Крюон Р.* Массовое обслуживание.— М.: Мир, 1965.— 302 с.
54. *Кузнецов М., Голосов И. П.* Влияние геометрических параметров синтетических алмазов на их режущие свойства.— Станки и инструмент, 1964, № 12, с. 28—29.

55. Кулинич С. И. Распределение расстояний между алмазными зернами в связке алмазно-абразивного инструмента.— В кн.: Докл. на II конф. мол. ученых ИСМ АН УССР. Киев, 1967, с. 85—87.
56. Левин М. Д. Влияние прочности алмазов на работоспособность дисковых пил при резании известняка и туфа.— Синтет. алмазы, 1970, № 5, с. 45—46.
57. Лукомский Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства.— М.: Госстатиздат, 1961.— 375 с.
58. Макадамс Г. Т. Влияние характера поверхности абразивного инструмента на его режущие свойства.— Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Сер. В. Конструирование и технология машиностроения, 1964, № 1, с. 88—95.
59. Макадамс Г. Т. Описание структуры абразивных поверхностей при помощи цепей Маркова.— Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Сер. В. Конструирование и технология машиностроения, 1964, № 4, с. 93—99.
60. Макадамс Г. Т. Статистическая многогранная модель абразивного зерна.— Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков Сер. В. Конструирование и технология машиностроения, 1963, № 4, с. 83—90.
61. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов.— М.: Машгиз, 1951.— 177 с.
62. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов — М.: Машиностроение, 1974.— 320 с
63. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев и др.— М.: Наука, 1965 — 524 с.
64. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом /А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, А. Г. Лазуткин, И. Я. Янцен — М.: Недра, 1972.— 256 с.
65. Мифлиг Д. М., Александров В. А. Экспериментальное определение параметров сечения стружек, срезаемых зернами алмазного инструмента.— Синтет. алмазы, 1976, № 2, с. 60—64
66. Мифлиг Д. М., Шор Г. М. Фактурная обработка гранита инструментами новых конструкций.— Синтет. алмазы, 1974, № 4, с. 33—37.
67. Может ли число меш характеризовать зернистость абразивного порошка?— Синтет. алмазы, 1969, № 4, с. 84—86.
68. Найдич Ю. В., Колесниченко Т. А. Исследование смачивания графита и алмаза жидкими металлами.— В кн.: Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии. Киев, 1963, с. 271—277.
69. Орлов А. М. Добыча и обработка природного камня.— М.: Стройиздат, 1977.— 350 с.
70. Орлов А. М., Рощина Р. Л., Сычев Ю. И., Селуянов В. Н. Новая технологическая линия по выпуску тонких облицовочных плит из мрамора и известняка.— Строит. материалы, 1967, № 4, с. 10— 12.
71. Осколков В. А. Сырьевая база облицовочного камня в СССР.— Пр-во облицовоч. и стеновых материалов и изделий из естеств. камня, 1976, вып. 1, с. 3—8.
72. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента /В. Н. Бакуль, Ю. И. Никитин, Е. Б. Верник, В. Ф. Селех.— М.: Машиностроение, 1975.— 296 с.
73. Пат. 885794 (Великобритания).
74. Пат. 880643 (Великобритания).
75. Пат. 938680 (Великобритания).
76. Пат. 3092094 (США).

77. Пат. 3133533 (США).
78. Пат. 3028710 (США).
79. Пат. 3127715 (США).
80. Пат. 3036567 (США).
81. Пат. 3048160 (США).
82. Пат. 3763601 (США).
83. Пат. 2991599 (США).
84. Пат. 3016661 (США).
85. Пат. 1347980 (Франция).
86. Пат. 2287314 (Франция).
87. Пат. 1231261 (Франция).
88. Пат. 1132479 (ФРГ).
89. *Пекленик Д.* К вопросу о применении корреляционной теории к процессу шлифования.— Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Сер. В. Конструирование и технология машиностроения, 1964, № 4, с. 3—13.
90. *Поволоцкий С. В.* Новое отечественное камнеобрабатывающее оборудование.— Пр-во облицовоч. и стеновых материалов и изделий из естеств. камня, 1976, вып. 1, с. 8—17.
91. *Разработка карьеров в странах Европы с применением алмазного инструмента* /Hallez С. Р.; ИСМ АН УССР.— № 2332.— 25 с., ил. 7.— Докл. на семинаре в Токио по техн. алмазам, 1972.
92. *Резников А. Н.* Краткий справочник по алмазной обработке.— Куйбышев: Кн. изд-во, 1967.— 202 с.
93. *Резников А. Н., Федосеев О. Б., Щипанов В. В.* Вопросы теории процесса резания при шлифовании сверхтвердыми материалами.— В кн.: Синтетические алмазы — ключ к гехническому прогрессу. Киев: Наук. думка, 1977, ч. 1, с. 88—95.
94. *Рогов В. В.* Работоспособность кругов из синтетических алмазов при резке искусственного рубина.— Синтет. алмазы, 1969, № 5, с. 49—53.
95. *Русаков К. И., Сычев Ю. И.* Алмазный инструмент для строительных и дорожных машин.— М.: НИИИнфстройдоркоммунмаш, 1965 — 65 с.
96. *Рылев Э. В., Александров В. А., Хукаленко К. П.* Оценка работоспособности алмазных дисковых пил.— Строит. материалы и конструкции, 1975, № 5, с. 25—26.
97. *Самусев В. П., Сычев Ю. И., Васильев В. И., Никулина О. И.* Получение тонких плит из гранита на алмазно-многопильных станках.— Строит. материалы, 1977, № 10, с. 13—14.
98. *Синтетические алмазы в машиностроении* /В. Н. Бакуль, Б. И. Гинзбург., Л. Л. Мишнаевский и др.— Киев: Наук. думка, 1976.— 351 с.
99. *Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента* /В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин, М. З. Мильштейн.— Киев: Техніка, 1971.— 208 с.
100. *Сычев Ю. И.* Современные тенденции совершенствования алмазно-камнеобрабатывающего инструмента.— Пром-сть неруд. и неметаллоруд. материалов, 1976, вып. 11, с. 27—33.
101. *Сычев Ю. И.* Аналитический метод определения оптимальных режимов работы алмазного режущего инструмента.— Алмазы, 1973, вып. 3, с. 13—15.
102. *Сычев Ю. И.* Новое в технике алмазной обработки природного камня.— Пром-сть неруд. и неметаллоруд. материалов, 1970, вып. 5, с. 21—24.

103. *Сычев Ю. И., Русаков К. И.* Оборудование для производства строительных материалов, оснащенное алмазным инструментом.— М.: НИИИИИнфстройдоркоммунмаш, 1965 — 74 с
104. *Технология распиловки камня дисковыми пилами /Büttner A ; ИСМ АН УССР.— № 2926.— 17 с., ил 7 —* Материалы коллоквиума по камнеобработке (Технический университет, г Ганновер, 1974).
105. *Тимофеев И. И.* К расчету длины и толщины среза при шлифовании. Изв. вузов. Машиностроение, 1958, № 7/8, с. 114—124.
106. *Узунян М. Д.* Расчет числа зерен, участвующих в резании, и расстояний между ними на поверхности алмазного круга.— Станки и режущие инструменты, 1966, вып. 1, с. 81—85
107. *Хинчин А. Я.* Работы по теории массового обслуживания.— М.: Физматгиз, 1963.— 235 с.
108. *Чеповецкий И. Х., Нелипович П. В.* Характер износа брусков при хонинговании.— Синтез алмаза, 1970, № 1, с. 67—69.
109. *Шрейнер Л. А.* Твердость хрупких тел.— М.: Изд-во АН СССР, 1949.— 144 с.
110. *A new idea.*— Stone, 1964, 84, N5, p. 29.
111. *Automation and diamonds modernise an old craft.*— Ind. Diamond Rev., 1962, N 255, p. 52—58.
112. *Bienert P.* Ritzversuche zum Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen.— Ind. Diamant. Rdsch., 1977, N1 S. 17—22.
113. *Büttner A., Mummehoff H.* Die Prüfung der Spannung an Diamantkreissägeblättern für die Natur-und Betonwerksteinbearbeitung.— Ind. Diamant. Rdsch., 1973, N2, S 69—73
114. *Calvi M.* Le Sidobre face aux nouvelles techniques.— Mausolee, 1974, N454, p. 1167—1172.
115. *Collin W. D.* Der Einfluss von Schlits-und Segmentausbildung auf die Leistung von Diamant-Sägeblättern.— Ind. Diamant. Rdsch., 1977, N 1, S. 23—28.
116. *De Barra C.* Natürliche und synthetische Diamant-Sägekörnungen für unterschiedliche Einsatzerfordernisse der Natursteinindustrie.— Ind. Diamant., Rdsch., 1976, N 1, S. 17—20.
117. *Diamantwerkzeuge* bei der Gewinnung und Verarbeitung von Schiefer.— Ind. Diamant. Rdsch., 1974, N1, S. 34—37.
118. *Diamond saws revolutionise Italian marble industry.*—Ind. Diamond Rev., 1962, N265, p. 334—335.
119. *Finnigan G.* Machining stone with diamond tools-1.— Ind. Diamond Rev., 1968, N 332, p. 310—316.
120. *Finnigan G.* 400% increase in quarry output in three years.— Ind. Diamond Rev., 1955, N 180, p. 215.
121. *Gargi R.* Debiteuse a disque diamante de 2,50m dans une graniterie bretonne.— Mausolee, 1974, N 457, p. 1812—1816.
122. *Giant stone sawing machine.*— Ind. Diamond Rev., 1955, N 180, p. 215.
123. *Hallez M.* Les méthodes de sciage des pierres naturelles ou reconstituées et les paramètres principaux d'utilisations de ces outils. — Mausolee, 1975, N765, p. 993—1004.
124. *Horszowski S. M.* Weniger Lärm beim Steinsägen mit Diamantblättern— Ind. Diamant. Rdsch., 1971, N 4, S. 186—193.
125. *Mahomed M. A., Young R. B.* Spannungsanalyse für segmentierte Kreissägeblättern.— Ind. Diamant. Rdsch., 1973, N2, S. 62—68.

126. *Proof that MEYERS MARK II can do a better job in your kind of stone!*— Stone, 1965, 85, N 8, p. 30.
127. *Quarrying by on-site sawing.*— Ind. Diamond Rev., 1958, N211, p. 113—114.
128. *Real F. A.* The importance of Bonding to Diamant surface industrial application. — Ind. Diamond Rev., 1968, N 336, p 495—497.
129. *Rohr G., Westphal R.* Ein Beitrag zur Geräuschminderung an Kreissägemaschinen der Steinindustrie.— Ind. Diamant. Rdsch., 1976, N 1, S. 37—42.
130. *Takubo T.* Sägen, Schleifen and Polieren von Hartgestein mit Diamantwerkzeugen.— Ind. Diamant. Rdsch., 1974, N 1, S. 30—33.
131. *Tönshoff H. K., Warnecke G.* Der Beitrag der Forschung zum Sägen von Stein.— Ind. Diamant. Rdsch., 1977, N1, S 5—11.
132. *Tönshoff H. K., Warnecke G., Bienert P.* Voraussetzungen und Möglichkeiten für eine Automatisierung in der Steinbearbeitung.— Ind. Diamant. Rdsch., 1976, N 1, S. 8—16.
133. *Walker R. D., Wood M. G.* Granite sawing techniques.— Ind. Diamond Rev., 1971, N 1, p. 4—7.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Глава I. Технология алмазной дисковой распиловки	7
1. Анализ процессов обработки камня	7
2. Конструкция алмазного инструмента	28
3. Распиловочное оборудование	62
Глава II. Теоретические основы алмазного дискового резания.	71
1. Параметры рабочей поверхности алмазного инструмента	71
2. Кинематические параметры работы алмазного инструмента	93
3. Силовые зависимости при резании алмазным инструментом	103
4. Исследование составляющих силы резания	109
5. Износ алмазоносного слоя инструмента	117
Глава III. Экспериментальное исследование работоспособности алмазного дискового инструмента	131
1. Современное состояние и тенденции развития исследований	131
2. Выбор характеристик алмазоносного слоя	139
3. Выбор технологических режимов резания	154
4. Влияние диаметра инструмента и схемы резания на износостойкость алмазоносного слоя	163
5. Влияние длины сегмента на работоспособность инструмента	167
Глава IV. Новые конструкции дисковых инструментов, оснащенных сверхтвердыми материалами, и технология резания	172
1. Алмазный инструмент с рациональной конфигурацией рабочей поверхности	172
2. Алмазный инструмент для окантовки твердых разнородностей природного камня	175

3. Инструмент в ориентированном расположении рабочих элементов из сверхтвердых материалов	181
4. Технология ступенчатого резания алмазным инструментом	187
Глава V. Рациональное использование алмазного дискового инструмента	192
1. Условия рационального применения инструмента . .	192
2. Сравнительная оценка работоспособности инструмента в производственных условиях	200
3. Производственные испытания алмазного инструмента	204
4. Методика расчета экономической эффективности применения алмазного инструмента	218
Заключение	228
Список литературы	231

Виктор Адамович Александров

**ОБРАБОТКА ПРИРОДНОГО КАМНЯ
АЛМАЗНЫМ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

*Печатается по постановлению ученого совета
ордена Трудового Красного Знамени
Института сверхтвердых материалов*

Редактор *Н. И. Сухомлинская*
Редактор-библиограф *А. Т. Чусов*
Оформление художника *В. Я. Мохнатова*
Художественный редактор *И. В. Козий*
Технические редакторы *Г. М. Терезюк,*
В. И. Самборук
Корректоры *Л. П. Осьмушикова,*
Р. С. Коган

Информ. бланк № 2553

Сдано в набор 03.03.79. Подп. в печ. 02.08.79.
БФ 00662. Формат 84×108/32. Бумага типогр. № 1.
Лит. гарн. Выс. печ. Усл. печ. л. 12,6. Уч.-изд. л.
12,23.

Тираж 1800 экз. Цена 1 руб. 60 коп.

Издательство «Наукова думка», 252601, Киев ГСП
Регина, 3.

Отпечатано с матриц Головного предприятия Рес-
публиканского производственного объединения
«Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, Киев, Дов-
женко, 3 в областной книжной типографии,
Львовского облполиграфиздата.
Львов, Стефаника, 11 Зак. 4747.

1 р. 60 к.

«НАУКОВА ДУМКА»