

# ПРЕДИСЛОВИЕ

---

История развития обработки металлов резанием показывает, что одним из эффективных путей повышения производительности труда в машиностроении, а также повышения точности и качества обработки является применение новых инструментальных материалов, отличающихся от известных более высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Инструментальными режущими называются материалы, из которых изготавливается рабочая часть режущих инструментов. Это относится как к лезвийному, так и к абразивному инструменту. Свойства инструментального режущего материала существенно сказываются на процессе стружкообразования, износе и стойкости инструмента. Они оказывают решающее влияние на достижимый уровень скоростей резания, что прямо определяет производительность обработки, точность и качество поверхностного слоя металла.

Эффективное резание одного материала инструментом из другого материала возможно при удовлетворении следующих требований:

- инструментальный материал должен иметь твердость, существенно превышающую твердость обрабатываемого материала, для того чтобы в течение длительного времени срезать стружку;
- значительное превышение твердости инструментального материала по сравнению с твердостью материала обрабатываемой заготовки должно сохраняться и при нагреве инструмента в процессе резания;
- режущая часть инструмента должна иметь большую износостойкость в условиях высоких давлений и температур, характерных для зоны резания.

Среди машиностроительных материалов сегодня особое место занимают специальные, высокопрочные, жаропрочные сплавы на основе железа, никеля, кобальта, хрома, титана и т. п. Эти сплавы широко применяются в авиационной и космической технике, в судостроении и энергомашиностроении, в газоперекачивающей аппаратуре и химическом оборудовании.

Однако наряду с уникальными эксплуатационными свойствами эти сплавы закономерно имеют существенный недостаток — низкую обрабатываемость традиционным лезвийным и абразивным инструментом.

Актуальной проблемой является также обработка износостойких высокотвердых покрытий, в том числе наплавленных хромоникелевых.

Интенсификация производства, широкое внедрение многооперационных станков с ЧПУ, ГП-модулей, автоматических станочных линий, роторно-конвейерных комплексов предъявляет повышенные требования к надежности технологических систем, одним из наиболее важных звеньев которых является режущий инструмент.

В настоящее время в металлообрабатывающей промышленности находит все более широкое применение инструмент из сверхтвердых материалов (СТМ), в частности, на основе природного и синтетического алмаза и кубического нитрида бора (КНБ). Главные причины перехода на инструмент из СТМ кроются в его высокой эффективности, увеличенном ресурсе работы, сокращении времени на обработку и получении требуемой точности и качества обработанной поверхности.

Инструменты из СТМ — принципиально новые, как по технологии изготовления, так и по условиям эксплуатации. Эффективность использования лезвийного и абразивного инструмента из СТМ будет зависеть от правильного выбора марки СТМ для каждой конкретной операции, от физико-механических и других свойств обрабатываемого материала, режимов резания, геометрических параметров инструмента и пр. Необходимо четко представлять себе, что нет идеального режущего инструмента. Каждый

инструментальный материал имеет свою область рационального применения.

В настоящем учебном пособии обобщены результаты работ, выполненных авторами. Использованы также результаты работ в этой области, выполненные под руководством В. Н. Бакуля, Г. В. Бокучавы, З. И. Кремня, В. В. Крымова, В. С. Лысанова, Е. Н. Маслова, В. А. Носенко, С. А. Попова, Г. И. Саютина, Л. В. Худобина, А. Н. Унянина и др.

Авторы выражают искреннюю признательность доктору технических наук профессору В. А. Носенко и кандидату технических наук доценту Н. Ю. Ковеленову, взявшим на себя труд рецензирования книги и сделавшим ряд ценных замечаний, которые были учтены при доработке рукописи.

# ГЛАВА 1. СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

---

## 1.1. ПРИРОДНЫЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К естественным сверхтвердым природным материалам относится алмаз. Название «алмаз» происходит от арабского «*al-mas*», что переводится как «твердейший», или греческого «*adamas*» (адамас), что в переводе означает «непреодолимый, несокрушимый, непобедимый». В конце XVIII века было установлено, что алмаз состоит из углерода.

Алмазы встречаются в виде отдельных хорошо выраженных кристаллов или же в виде скопления кристаллических зерен и многочисленных сросшихся кристаллов (агрегатов). Единицей измерения массы алмаза является карат (от арабского *kirat*), что составляет 0,2 г.

Алмаз представляет собой одну из модификаций углерода кристаллического строения. Он кристаллизуется в кубический сингоний и относится к тетраэдрическому виду симметрии, атомы которой образуют ковалентные связи, характеризующиеся тем, что электроны не принадлежат одному атому, а обмениваются с соседними атомами. Для ковалентных видов связей характерно тесное сближение между атомами, направленная высокая электронная плотность. Чрезвычайно прочные связи между атомами из-за общих электронов и большая сопротивляемость деформации тетраэдрических валентных углов обуславливают высокую прочность и твердость кристалла алмаза.

На алмаз не действуют кислоты, даже нагретые до высоких температур. При сгорании алмаза получается зола, в составе которой встречаются алюминий, кремний, магний и другие элементы.

Алмаз является хорошим проводником тепла и плохим проводником электричества, причем с повышением температуры удельное электрическое сопротивление увеличивается.

При высокой температуре ( $700^{\circ}\text{C}$ ) алмаз горит слабым голубым пламенем, образуя углекислоту. При нагревании без доступа воздуха алмаз переходит в графит.

Для изготовления резцов из природных алмазов используются алмазы формы октаэдра и ромбододекаэдра, а также разнообразные сrostки. Все кристаллы перед обработкой подвергаются аттестации по внешней форме, цвету, плотности, включениям, трещиноватости и т. д. К резцам предъявляются жесткие требования по некоторым параметрам. Угол при вершине октаэдра равен  $70^{\circ}$ , поэтому угол заострения резца нельзя рекомендовать менее  $85\ldots 100^{\circ}$  из-за возможности выкрашивания. Для повышения прочности алмазного резца рекомендуются большие углы в плане для главной и малые углы в плане — для вспомогательной режущей кромки и большие углы при вершине резца.

Необходимо помнить, что грани и режущие кромки должны находиться в износоустойчивых направлениях плоских сеток.

Передний угол должен быть отрицательным и изменяться в пределах  $0\ldots(-8^{\circ})$  в зависимости от твердости материала, а задний угол — в пределах  $5\ldots 12^{\circ}$ .

Угол наклона главной режущей кромки у большинства резцов равен нулю, а ее радиус округления изменяется в пределах  $0,2\ldots 1$  мм. Основные конструктивные соотношения по алмазным резцам, используемые при точении и растачивании, приводятся в руководящих материалах (ТУ).

Рекомендуемые геометрические параметры алмазных резцов при обработке различных материалов приведены в таблице 1.1 [5, 36].

**Рекомендуемые геометрические параметры резцов из природных алмазов  
при обработке различных материалов**

Обрабатываемый материал	Геометрия резца, град.				
	$\lambda$	$\gamma$	$\alpha$	$\phi$	$\phi_1$
Сталь различных марок	0	-5...-6	8...10	45...48	28...30
Чугун различных марок	0	-3...-4	12...13	43...45	30...32
Титан и его сплавы	0	-4...-5	10...12	43...45	43...45
Стеклотекстолиты	0	-4...-5	10...12	43...45	43...45
Бронза различных марок	0	-2...-4	12...13	42...44	6...8
Латунь различных марок	0	+1...-2	12...13	42...44	4...6
Дюралюминий различных марок	0	+2...-2	14...15	42...44	2...4
Резина	0	-1...-3	8...10	43...45	45
Пластмассы	0	0...-3	8...10	43...45	45

В последнее время широко используется закрепление алмаза в промежуточной вставке, изготовленной из специальных пресс-порошков. Пресс-порошок спекается с алмазом методом порошковой металлургии.

При конструировании алмазного резца необходимо соблюдать следующие правила:

- 1) все углы резца должны быть тупыми;
- 2) сопряжение главной и вспомогательной режущих кромок в плане должно происходить по радиусу;
- 3) расположение режущей кромки по отношению к нижней части резца должно быть постоянным;
- 4) резцедержатель должен обладать необходимой жесткостью.

Как показывает опыт промышленности [1, 7, 9, 13, 17, 19, 24, 28, 32, 36], часто основным препятствием для использования алмазного инструмента, кроме его высокой стоимости, является отсутствие необходимого оборудования.

Стойкость алмазного инструмента во многом зависит от вибрационного состояния оборудования. Вопросам определения источников колебательных процессов и методам их ликвидации или снижения при создании оборудования необходимо уделять особое внимание. Поэтому одним из важнейших условий успешного применения алмазного инструмента является высокая динамическая жесткость технологической системы, используемой для обработки.

Станок необходимо устанавливать на индивидуальный изолированный фундамент или изоляционные прокладки, исключающие возможность передачи вибрации от близко расположенного другого оборудования. Станок должен обладать необходимыми скоростями вращения шпинделя и скоростями перемещения инструмента, чтобы обеспечить требуемые режимы резания. На станках, предназначенных для алмазной обработки, не рекомендуется выполнять черновое точение с большими нагрузками.

Желательно использовать станок с ЧПУ или оснащенный пневмогидросуппортом, позволяющим получать автоматические подачи. Алмазный инструмент должен закрепляться в жестком приспособлении, а совпадение вершины резца с осью вращения обрабатываемого изделия должно быть максимально точным.

Следует отметить, что все эти требования касаются эксплуатации всех инструментов из СТМ, а также керамики и керметов.

При обработке некоторых материалов на передней поверхности алмазных инструментов может возникать нарост, который ухудшает качество поверхности. Особенно большой нарост возникает при резании алюминия и его сплавов [30].

Основные величины режимов резания, которые можно рекомендовать для обработки материалов, приведены в таблице 1.2 [32, 36, 38].

По результатам использования алмазных резцов в промышленности [32, 36] можно сделать вывод, что на шероховатость поверхности заготовки большое влияние оказывает радиус при вершине резца. При этом оптимальные

**Рекомендуемые режимы резания при обработке цветных металлов  
и других материалов алмазным инструментом**

Обрабатываемый материал	Режимы резания		
	скорость, м/мин	подача, мм/об	глубина, мм
Алюминий	400...500	0,01...0,04	0,1...0,3
Сплавы АЛ8–АЛ10	250...400	0,02...0,04	0,05...0,1
Сплавы АЛ2–АЛ4	600...700	0,01...0,04	0,01...0,2
Сплавы АМгС	400...500	0,01...0,05	0,1...0,2
Дюралюминий АД-1	500...700	0,02...0,04	0,06...0,15
Бронза оловянистая	250...400	0,04...0,07	0,08...0,2
Бронза свинцовистая	Выше 700	0,02...0,04	0,03...0,06
Латунь ЛС59-В1	Выше 500	0,02...0,06	0,03...0,06
Баббит	400...500	0,01...0,05	0,05...0,2
Медь	350...500	0,01...0,04	0,1...0,4
Стеклотекстолит СТ	600...700	0,02...0,05	0,03...0,05
Пластмассы	100...200	0,02...0,05	0,05...0,15
Оргстекло	250...500	0,02...0,03	0,05...0,5
Титан и его сплавы	100...300	0,02...0,05	0,03...0,06
Резина	300...400	0,01...0,04	0,02...0,06
Монель-металл	150...300	0,01...0,02	0,03...0,05

величины радиуса сопряжения для обработки различных материалов не одинаковы. Оптимальная величина радиуса сильно зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Оптимальные размеры радиусов при вершине резца, рекомендуемые при обработке конкретного материала, приведены в таблице 1.3 [36].

Следует отметить, что в настоящее время в металлообработке природные алмазы применяются весьма редко. Как правило, для этих целей используют «борт» («выброшенный за борт»), как называют все алмазы, не идущие на изготовление ювелирных изделий. Для изготовления режущих инструментов (резцов, сверл) применяются кристаллы



**Рекомендуемые размеры радиусов при вершине алмазных резцов  
для обработки различных материалов**

Обрабатываемый материал	Величина радиуса при вершине, мм
Алюминий	0,2...0,5
Сплавы АЛ8–АЛ10	0,3...0,7
Сплавы АЛ2–АЛ4	0,2...0,6
Сплавы АМгС	0,3...1,0
Дюралюминий АД-1	0,2...0,6
Бронза оловянистая	0,2...0,6
Бронза свинцовистая	0,2...0,6
Латунь ЛС59-В1	0,4...0,8
Баббит	0,3...0,8
Медь	0,3...0,8
Стеклотекстолит СТ	0,6...1,0
Пластмассы	0,3...0,6
Оргстекло	0,4...1,0
Титан и его сплавы	0,2...0,5
Резина	0,4...1,0
Монель-металл	0,2...0,6

алмаза весом 0,2...0,6 карата. Алмазные порошки употребляются для изготовления алмазных кругов. Кристаллы алмаза закрепляются в державке путем пайки серебряным припоем или механическим креплением. При заточке алмаз предварительно извлекается из стержня и перешлифовывается в технологической державке на специальных станках с помощью чугунных дисков, шаржированных смесью алмазного порошка с оливковым маслом.

## 1.2. ИСКУССТВЕННЫЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К искусственным СТВ относятся поликристаллические алмазы и кубический нитрид бора.

Поликристаллические алмазы (ПА) и кубический нитрид бора (КНБ) имеют много общих параметров, таких как

высокая твердость и теплопроводность, похожая кристаллическая структура и пр.

Однако ПА склонны к графитизации и легко окисляются на воздухе при высокой температуре, а КНБ стабилен в аналогичных условиях и при обработке черных металлов. Кроме того, он практически химически инертен по отношению к большинству материалов, и при резании сталей на режущей поверхности не образуется нарост. На основании этого можно выделить следующие области применения ПА и КНБ [5, 32, 38]:

- для ПА — обработка цветных металлов и их сплавов, а также дерева, абразивных материалов, пластмасс, твердых сплавов, стекла, керамики;
- для КНБ — обработка черных металлов, сырых и закаленных, а также специальных сплавов на основе никеля и кобальта.

В настоящее время в промышленности в основном используют синтетические ПА, получаемые из углерода (в форме графита) при воздействии высоких давления и температуры, при этом гексагональная гранецентрированная решетка графита превращается в кубическую гранецентрированную решетку алмаза. Температуру и давление, необходимые для структурных превращений, определяют из диаграммы состояния графит–алмаз [32].

Так как бор и азот располагаются по обеим сторонам углерода в таблице Менделеева, путем соответствующей химической реакции можно получить соединение этих элементов, т. е. нитрид бора, который имеет графитообразную гексагональную кристаллическую решетку с приблизительно одинаковым числом атомов бора и азота, расположенных попеременно. Аналогично графиту гексагональный нитрид бора (ГНБ) имеет слоистую рыхлую структуру и может превращаться в КНБ.

Этот процесс описывается диаграммой состояния ГНБ–КНБ.

За счет добавления специальных растворителей-катализаторов (обычно нитридов металлов) интенсивность превращения увеличивается, а давление и температура

процесса снижаются соответственно до 6 ГПа и 1500°C. В процессе превращения кристаллы КНБ увеличиваются. При нагреве отдельные кристаллы КНБ спекаются между собой в зонах контакта и образуют «поликристаллическую» массу. Для интенсификации спекания добавляют также растворители. Кроме того, вся спекаемая масса должна находиться при определенных давлении и температуре, чтобы предотвратить обратное превращение твердых кристаллов КНБ в мягкие гексагональные кристаллы [39].

В результате спекания получают конгломерат КНБ, в котором произвольно ориентированные анизотропные кристаллы соединяются между собой, образуя изотропную массу большого объема. Затем из этой массы получают пластины для режущих инструментов, фильеры для волочения проволоки, инструменты для правки шлифовальных кругов, износостойкие детали и др.

Высокая скорость резания — важнейший фактор интенсификации обработки материалов резанием с применением инструмента из СТМ в условиях, когда резервы существенного повышения скоростей резания для традиционных инструментальных материалов практически исчерпаны.

Создание поликристаллических СТМ в 1970-х гг. и стремительное расширение областей их применения во всех промышленно развитых странах в настоящее время при точении, фрезеровании, сверлении, развертывании, резке заготовок из чугунов и закаленных сталей, цветных сплавов и неметаллических материалов стали возможны благодаря большим достижениям физики, техники и технологии высоких давлений и температур.

Основные свойства алмаза и КНБ приведены в таблице 1.4.

Лезвийный режущий инструмент из КНБ применяется при высокоскоростном фрезеровании, точении, растачивании, сверлении и других видах обработки заготовок из чугунов, закаленных сталей, алюминиевых и цветных сплавов, поликристаллических композиционных материалов (ПКМ) и др. Скорость резания при использовании КНБ значительно

выше допускаемой для твердосплавных инструментов (см. табл. 1.5), а износ их значительно меньше.

В таблице 1.6 приведены рекомендуемые значения скоростей резания при обработке различных материалов. Следует отметить, что надежность инструмента, оснащенного СТМ, возрастает при увеличении скоростей резания в строго рекомендуемых пределах при обработке каждого конкретного материала.

Алмазный инструмент, в отличие от инструмента, оснащенного пластинами КНБ, может эффективно эксплуатироваться на сравнительно низких скоростях, присущих твердосплавному «собрату», обеспечивая многократное — в десятки раз — повышение стойкости инструмента. Это особенно важно в автоматизированном производстве и является существенным показателем работоспособности инструмента.

Вместе с тем, как показывают последние исследования, скорость резания является к тому же весьма действенным фактором решения проблемы стружкодробления — одной из труднейших в металлообработке.

При высокой скорости работа резания почти полностью превращается в тепло и образуется сегментная стружка, у которой сегменты разделяются хрупкой узкой перемычкой сильно деформированного металла; фактически образуется короткая дробленая стружка. Автоматизация процессов обработки материалов со снятием стружки и дальнейший рост скоростей резания неразрывны.

Резкое увеличение скорости резания при прочих равных условиях обеспечивает соответствующее увеличение минутной подачи инструмента, т. е. производительности процесса, а также уменьшение силы резания, наклепа и шероховатости обработанной поверхности, т. е. точности и качества обработки. Кроме того, установлено, что при увеличении скорости резания в определенных пределах возрастает надежность работы инструмента из СТМ; это принципиально важно применительно к автоматизированному оборудованию.

Как правило, часть имеющегося резерва повышения скорости резания при переходе от твердосплавного ин-

Основные свойства алмаза и КНБ

Материал	Микротвердость, НВ	$\sigma_c \cdot 10^3$ , МПа	$\sigma_n \cdot 10^3$ , МПа	Тепло- стойкость, °С	Теплопроводность, кал/(см·°С)
Алмаз	10000	20	2,1...4,9	700...900	0,35
Эльбор	9000	5	—	1200...1400	0,1
Карбид кремния	3200...3600	15	1,5...1,6	1300...1400	0,02
Электрокорунд	2000...2300	10	3...4	1700...1900	0,007
T15K6	1500...1600	39	11...12,5	800	0,065
BK8	1400...1500	40...50	16	900	0,14
ЦМ-332	2000...2300	9...15	4...5,5	1200	0,01

Режимы чистового точения и относительный износ резцов

Обрабатываемый материал	Материал инструмента	Режимы резания		Относительный износ, мкм/км
		скорость, м/мин	подача, мм/об	
1	2	3	4	5
Стали углеродистые конструкционные	Т30К4	100...180	0,04...0,08	6,5
	Эльбор-Р	550...600	0,04...0,06	3,0
Стали конструкционные легированные	Т30К4	120...180	0,04...0,08	6,5
	Эльбор-Р	450...500	0,04...0,06	3,0
Стали высоколегированные, коррозионно-стойкие, жаростойкие	Т30К4	80...120	—	6,5
	Эльбор-Р	200...220	0,02...0,04	3,0
Стали конструкционные закаленные (HRC 40...45)	Т30К4	70...150	0,02...0,05	10
	Эльбор-Р	300...350	0,02...0,04	5,0
Чугун серый; СЧ 10; СЧ 20	ВКЗМ	100...160	0,04...0,08	6,0
	ЦМ-332	220...300	0,03...0,06	3,5
	Эльбор-Р	300...500	0,04...0,06	2,5
Чугун ковкий; КЧ-45-6; КЧ-63-2	ВКЗМ	120...160	0,03...0,06	8,0
	ЦМ-332	200...250	0,03...0,05	5,5
	Эльбор-Р	500...550	0,08...0,06	4,0
Чугуны высокопрочные; ВЧ	ВКЗМ	120...160	0,04...0,08	7,0
	ЦМ-332	300...350	0,03...0,06	4,5
	Эльбор-Р	500...550	0,04...0,06	3,5

**Примечание.** Высота шероховатостей обработанной поверхности  $Ra = 1,25$  мкм. Глубина резания  $t = 0,1...0,3$  мм.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)