

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.171.2

## Выбор метода определения прочности закрепления алмаза в матрице бурового инструмента

Т. Б. Коноваленко, В. П. Уманский, В. А. Евдокимов, А. А. Бугаев

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина

*Рассмотрены основные способы моделирования и определения прочности закрепления алмаза в инструменте. Показано, что составляющие алмазоудержания включают: механический охват и адгезию к матрице. Предложен метод определения адгезионной составляющей алмазоудержания и приведены результаты, полученные в зависимости от содержания адгезионно-активного элемента в матрице инструмента.*

**Ключевые слова:** инструмент, алмазоудержание, прочность контакта, адгезия, связка, шихта.

При создании эффективного алмазного инструмента значительную роль играет прочность контакта алмазного режущего элемента с материалом матрицы. Высокие значения работы адгезии являются необходимым условием создания прочного соединения. Адгезия жидкого сплава к твердой поверхности определяет также его высокие капиллярные свойства: хорошее смачивание и растекание. Иногда физико-химическая адгезия может дополняться так называемой механической адгезией, при которой происходит механическое зацепление затвердевшего сплава за неровности и шероховатости твердой поверхности.

Количественной мерой адгезии служит удельная работа  $W_A$  – энергия, затраченная на разделение тел и отнесенная к единице площади контакта. При контакте твердых тел можно определить силовую характеристику адгезии – усилие, при котором происходит отрыв.

Принципиальная связь между удельной работой и усилием отрыва описывается уравнением

$$W_A = \int_a^{\infty} F(x) dx \cong F(x_h) x_h,$$

где  $a$  – равновесное расстояние между поверхностями контактирующих тел;  $F(x)$  – сила притяжения между  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  поверхности двух контактирующих тел при расстоянии  $x$  между ними;  $F(x_h)$  – максимальное усилие отрыва, нормальное к поверхности контакта и являющееся теоретическим значением прочности адгезионных связей,  $F(x_h) \cong W_A / x_h$ .

Определение прочности контакта алмаза с металлом представляет значительные трудности. Это обусловлено тем, что не существует атомно-гладких поверхностей, и любой процесс формирования достаточно больших площадей контакта между взаимодействующими телами сопровождается значительной упругой и пластической деформацией неровностей поверхностей [1]. Необходимо, чтобы прочность составляющих контактирующей пары была намного больше прочности их сцепления, что не всегда соблюдается. Часто в результате химического взаимодействия возникают промежуточные слои, свойства которых заметно отличаются от свойств исходных материалов [2, 3]. Эти слои при известных условиях могут оказаться слабыми и, измеряя силу, необходимую для отрыва одного материала от другого, можно получить лишь сведения о прочности промежуточного слоя.

Важно, чтобы в процессе разрывных испытаний разъединение материалов происходило одновременно. В противном случае результаты измерений окажутся заниженными [4]. На практике выполнить такие требования очень сложно. Поэтому обычно результаты испытаний позволяют судить лишь о прочности контакта данного конкретного соединения, выполненного из определенной комбинации материалов по определенной технологии.

Прочность межфазного контакта можно определить путем прямых механических испытаний и косвенными методами. При механических испытаниях измеряются усилие разрушения контакта и площадь возникшей поверхности (как это делается при определении прочности твердых тел). Таким образом можно измерить прочность контакта при разрыве, изгибе, кручении.

При определении прочности алмазметаллического контакта наиболее часто используется метод нормального отрыва, имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими: равномерность приложения усилий; одновременность разъединения материалов. В работах [5, 6] в специальных устройствах (рис. 1, 2) использовалось соединение стальных испытательных стержней посредством пайки к поверхности алмаза исследуемым сплавом, химически взаимодействующим с углеродом. Этот метод пригоден также при определении прочности контакта алмаза с покрытием, ранее нанесенным на его поверхность. В последнем случае необходимо паять стержень к металлизированной поверхности алмаза любым пластичным припоем, который хорошо смачивает покрытие и имеет прочность контакта при отрыве, превышающую таковую алмазметаллического соединения.

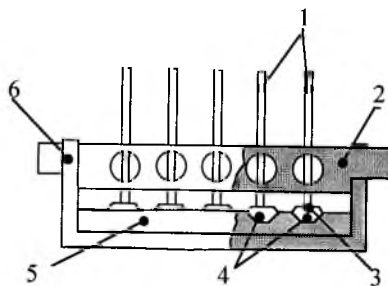


Рис. 1. Схема приспособления для пайки стержней к кристаллам алмаза с помощью порошковых сплавов: 1 – стальные стержни; 2 – направляющая; 3 – порошковая композиция; 4 – кристаллы алмаза; 5 – графит; 6 – обойма.

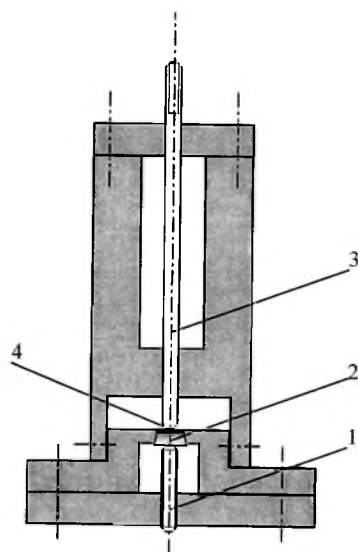


Рис. 2. Схема устройства для пайки металлического стержня к поверхности алмаза: 1 – поджимной штифт; 2 – кристалл алмаза; 3 – стержень; 4 – пластинка припоя.

Другая методика эксперимента представлена в работе [7]. Суть ее состоит в том, что на поверхность алмаза наплавляли исследуемый металл (сплав) в специальной графитовой форме (рис. 3). Затем графит удаляли, а алмаз с затвердевшим напаянным металлом помещали в захваты разрывной машины и проводили испытания.

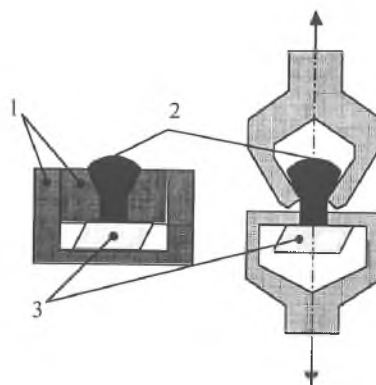


Рис. 3. Схема наплавки металла-припоя на кристалл алмаза и разрывных испытаний прочности контакта алмаз-металл: 1 – графит; 2 – металл; 3 – кристалл алмаза.

В [8] соединение трех кристаллов алмаза с кольцом исследуемого металла осуществлялось при нагреве и сдавливании контактирующих пар с усилием примерно 50 Н (рис. 4). Заметим, что контактирующий металл или сплав находились в твердом состоянии.

Согласно вышеперечисленным методам после формирования алмазо-металлического соединения осуществлялся его нормальный отрыв с фиксацией усилия отрыва. Прочность контакта определяется отношением усилия отрыва к площади пятна контакта, устанавливаемой под микроскопом:

$$\sigma_{\text{отр}} = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{отр}}$  – прочность алмазметаллического контакта, МПа;  $F$  – усилие отрыва, Н;  $S$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>.

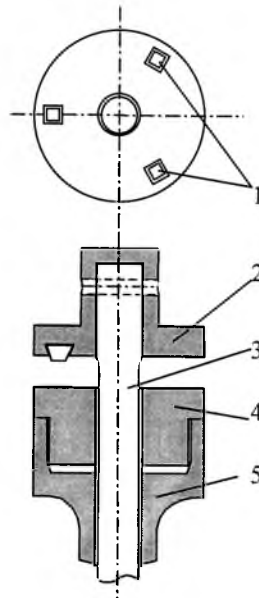


Рис. 4. Схема образцов для проведения адгезионных испытаний алмазов с металлом: 1 – алмазы; 2 – образец-державка; 3 – графитовый стержень; 4 – металлический образец; 5 – графитовая труба.

Прочность контакта, определенная путем нормального отрыва, представляет собой важную характеристику алмазметаллического взаимодействия. Высокие ее значения создают хорошие предпосылки для разработки качественного алмазного инструмента.

Отметим, что алмаз в процессе работы инструмента находится в сложно-напряженном состоянии с преобладающими тангенциальными усилиями. Поэтому важно изучить прочность контакта алмаза с металлом или сплавом при сдвиге.

Этому вопросу посвящено достаточно много исследований [9–16]. Условно их можно разделить на два направления. Первое заключается в расплавлении на плоской грани алмаза капли сплава с целью создания контакта. Прочность этого контакта определяется путем сдвига при комнатной температуре затвердевшей капли специальным ножом, закрепленным в захватах разрывной машины [9, 10] (рис. 5). Этот метод легко осуществим при достаточно большом краевом угле смачивания –  $\theta > 20$  град. Когда сплав растекается по поверхности алмаза, сдвинуть его невозможно.

Второе направление исследований является оптимальным с точки зрения моделирования условий закрепления и напряженного состояния алмазных зерен в процессе работы инструмента. В этом случае алмаз запрессовывался в связку так, чтобы часть его выступала (рис. 6). Затем для

закрепления полученной композиции проводилась термообработка или пропитка. Прочность алмазоудержания в связке определялась путем приложения усилия к выступающей части алмазного зерна в направлении, параллельном поверхности связки. Прочность при сдвиге вычислялась аналогично прочности при отрыве с той лишь разницей, что в ряде исследований определялась также зависимость усилия сдвига от глубины заделки зерна [12–16].

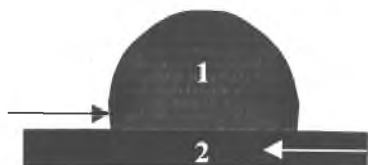


Рис. 5



Рис. 6

Рис. 5. Схема определения прочности контакта при сдвиге системы алмаз затвердевшая капля металла: 1 – затвердевшая капля металла; 2 – алмаз. (Стрелки указывают направление прилагаемых усилий.)

Рис. 6. Схема закрепления зерна алмаза (2) в связке (1).

При этом определяемая прочность контакта при срезе  $\sigma_{\text{ср}}$  включает в себя как адгезионную, так и механическую составляющие. Иначе говоря, прочность контакта при сдвиге алмазных зерен пропорционально зависит от суммы прочности контакта алмаза с металлом и механических характеристик (в частности, пластичности, твердости) самой связки. Можно подчеркнуть, что работоспособность алмазного инструмента также определяется прочностью алмазоудержания в совокупности с твердостью и износостойкостью связки. При этом, как свидетельствуют данные некоторых исследований, доля прочного алмазоудержания составляет примерно 60% [12].

Отметим, что сила вырыва алмазов зависит от глубины заделки зерна в связке и напряжений, возникающих на межфазной границе. Схема взаимодействия зерна со связкой и эпюра распределения напряжений представлены в работе [15]. В свою очередь, величина напряжений зависит от прочности алмазометаллического контакта [16]. При малой прочности границы раздела основную нагрузку несет связка, при большей ее прочности часть нагрузки расходуется на зерна, и связка нагружена меньше. Сравнение эпюр напряжений показывает, что увеличение прочности алмазоудержания может снизить напряжения в связке в три раза.

При определении таким методом величины  $\sigma_{\text{ср}}$  имеется недостаток: не выделяется адгезионная составляющая. Адгезионная составляющая алмазоудержания в значительной мере проявляется при выступании алмазного зерна над поверхностью связки вследствие ее износа в процессе работы инструмента.

Чтобы измерить адгезионную составляющую прочности контакта при сдвиге, алмазное зерно выносилось за пределы связки и осуществлялось соединение пары за счет галтели пропитывающего сплава (рис. 7). В этом случае на определяемую прочность контакта не будут влиять физико-механические характеристики связки. При разработке новой вакуумной технологии изготовления буровых коронок важно определить адгезионную состав-

ляющую прочности контактирующей системы алмазное зерно–связка на основе шихты для изготовления твердого сплава марки ВК6. Осуществить это позволил предложенный ниже метод.

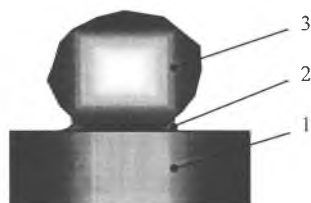


Рис. 7. Схема закрепления зерна на поверхности связки: 1 – связка; 2 – галтель соединяемого металла; 3 – алмаз.

Из порошка шихты ВК6 с добавками порошка хрома от 0,25 до 60 мас.% усилием 40 кН при прессовании изготавливали партию таблеток диаметром 15 мм и высотой 5 мм. К таблеткам методом пропитки медью в вакуумной печи подплавляли тщательно очищенные овализованные зерна природного алмаза диаметром 2-3 мм в количестве двух-трех штук. Схема пайки-пропитки представлена на рис. 8\*.

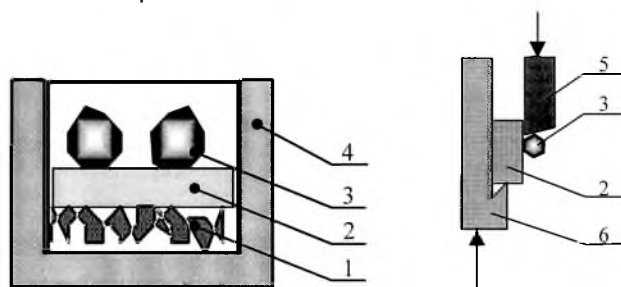


Рис. 8. Схемы пайки-пропитки медью алмазных зерен к таблеткам и определения их прочности при сдвиге: 1 – кусочки меди; 2 – таблетка из порошка шихты ВК6 с добавлением порошка хрома; 3 – зерна алмаза; 4 – керамический тигель; 5 – верхний нож; 6 – нижний нож.

Пайку-пропитку осуществляли при температуре 1130°С в течение 3 мин в вакууме  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. После охлаждения и извлечения образцов из печи их испытывали на прочность при сдвиге. С этой целью использовали специальное устройство, закрепленное в зажимах разрывной машины Р-05. Прочность контакта алмазов с таблеткой при сдвиге определяли по формуле (1). Зависимость этой величины от содержания хрома имеет вид кривой с ярко выраженным максимумом (рис. 9).

Как и следовало ожидать, без хрома прочность контакта приближается к нулю. При повышении содержания хрома в матрице до 3,5 мас.% благодаря его способности химически взаимодействовать с алмазом и формировать на межфазной границе карбидные слои [6, 7] прочность достигает весьма больших значений (~180 МПа). При этом отрыв происходит по межфазной границе алмаз–металл. Дальнейшее увеличение содержания хрома снижает прочность алмазометаллического контакта. Это связано, по-видимому, со

\* В образцах с содержанием хрома более 60 мас.% пропитка медью отсутствовала.



значительным ростом толщины карбидных слоев, а значит, и возникновением диффузионной пористости в приповерхностных участках алмаза (эффект Киркендалла–Френкеля) [6]. Разрушение в этих случаях, как правило, происходит по зерну алмаза.

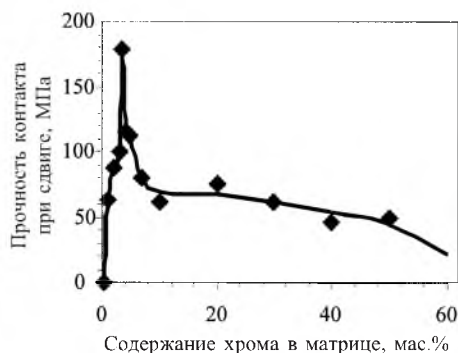


Рис. 9. Зависимость прочности контакта алмаза с матрицей при сдвиге от содержания в ней хрома.

Если рассматривать алмазы, закрепленные на таблетке из шихты ВК6 с добавками хрома, как модель буровой коронки, а методику пайки-пропитки как часть технологического процесса, то при изготовлении качественных алмазных коронок в вакууме необходимо ввести в шихту ВК6, содержащую алмазы, порошок хрома в количестве 2...20 мас.%. Высокая прочность контакта гарантирует удержание и работу зерен алмаза даже при значительном истирании связки в процессе эксплуатации коронок.

## Выводы

1. Разработан метод, позволяющий выделить адгезионную составляющую в общей прочности алмазоудержания.
2. Получена зависимость прочности контакта алмаза с матрицей при сдвиге от концентрации в ней хрома.
3. Рекомендовано оптимальное количество хрома в связке, позволяющее получить качественный буровой алмазный инструмент методом вакуумной технологии пропитки.

## Резюме

Розглянуто основні способи моделювання та визначення міцності закріплення алмазу в інструменті. Показано, що складові алмазоутримання включають: механічне охоплення й адгезію до матриці. Запропоновано метод визначення адгезійної складової алмазоутримання і наведено результати, отримані в залежності від вмісту адгезійно-активного елементу в матриці інструменту.

1. *Айнбиндер С. Б., Клокова Э. Ф.* Об определении величины сил адгезии между твердыми телами // Докл. АН СССР. – 1962. – **146**, № 5. – С. 1058 – 1060.

2. Шоршоров М. Х., Устинов Л. М., Жамнова В. И. Анализ влияния монофазных прослоек на прочность композиций металлическая матрица–хрупкое волокно // Физика хрупкого разрушения. – Киев: Ин-т пробл. материаловедения АН УССР. – 1976. – Ч. 2. – С. 183 – 186.
3. Шоршоров М. Х., Цирлин А. М., Устинов Л. М. и др. Влияние хрупких прослоек на прочность композиций с керамическими волокнами // Физика и химия обработки материалов. – 1976. – № 1. – С. 119 – 123.
4. Дерягин Б. В., Кротова Н. А. Адгезия. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – 244 с.
5. Кизиков Э. Д., Лавриненко И. А. Исследование адгезии и контактного взаимодействия медно-олово-титановых сплавов с алмазом // Синтет. алмазы. – 1973. – № 6. – С. 21 – 25.
6. Naidich Yu. V., Umanskii V. P., and Lavrinenko I. A. Metal and alloy bond strengths to diamond // Industrial Diamond Review. – 1984. – 44, No. 6. – P. 327 – 331.
7. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. – Киев: Наук. думка, 1972. – 196 с.
8. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. – М.: Наука, 1974. – 197 с.
9. Evens D., Nicholas M., and Scott P. The wetting and bonding of diamonds by copper–tin–titanium alloys // Industrial Diamond Review. – 1977. – No. 9. – P. 306 – 309.
10. Pat. 1388172, UK MKI B 24d 11/00. Metal Coating of Diamonds / M. Nicholas, P. Scott, B. Dewar. – Publ. 26. 03. 75.
11. Захидов С. Х. Исследование прочности удержания зерна в связке при температурно-силовых воздействиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1974. – 34 с.
12. Коновалов В. А. Исследование влияния прочности алмазоудержания и износостойкости металлических связок на работоспособность алмазно-абразивного инструмента: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1974. – 27 с.
13. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. Т. 2. Композиционные инструментальные сверхтвердые материалы / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
14. Сердюк В. М., Коновалов В. А., Чалый В. Т. Исследование прочности удержания алмазных зерен в органической связке // Синтет. алмазы. – 1971. – № 4. – С. 33 – 35.
15. Беззубенко Н. К., Евдокимов А. Е., Сальтевский И. С. Прочность удержания зерен в металлической связке алмазного круга // Резание и инструмент. – 1988. – № 39. – С. 37 – 43.
16. Нетребко В. П., Коротков А. Н. Влияние прочности границы раздела между зернами и связкой на напряжения в алмазном шлифовальном круге // Алмазы. – 1980. – № 3. – С. 2 – 4.

Поступила 23. 10. 2006