

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

А.А. Ганеев, Е.Н. Шлыгин, Г.Г. Ишбаев, А.Г. Балута

*Рассмотрены условия работы буровых долот, разработаны требования для материалов бурового инструмента. Предложены композиционные материалы с эвтектическим инфильтрантом и сформированы требования к межфазному взаимодействию компонентов композиционного материала.*

*Ключевые слова: композиционные материалы, буровые долота, база данных, межфазное взаимодействие.*

### Введение

В связи с истощением используемых в настоящее время нефтегазовых месторождений возникает необходимость в проведении добычи данного сырья на больших глубинах, что, в свою очередь, предопределяет бурение более твердых горных пород. Существующий буровой инструмент либо не справляется с абразивными породами, либо имеет высокую стоимость (алмазные долота).

При этом условия работы (импульсные механические удары) относятся к экстремальным. Скорость износа деталей возрастает на порядок. Поэтому возникает необходимость в создании новых, более износостойких и доступных материалов для буровых долот.

### Условия работы бурового инструмента

В настоящее время используется много видов бурового инструмента. Шарошечные долота представляют собой наиболее универсальный породоразрушающий буровой инструмент, поскольку область его применения охватывает практически все многообразие горных пород: от очень мягких до весьма твердых.

Буровое долото, изготовленное из данного материала работает в тяжелых условиях [1]:

- удельная нагрузка на режущий элемент составляет от 0,8...1,2 кН;
- окружная скорость 0,7...1,2 м/с;
- температура на поверхности режущей кромки достигает 600 °С.
- применение агрессивных промывочных жидкостей, вызывающих коррозию и

разрушение инструмента. Часто в состав таких жидкостей включают соли (хлористый калий др.) и электролиты (фосфаты, хлористый натрий), которые являются ускорителями коррозии. Особенностью композиционных материалов (КМ) является тот факт, что тугоплавкие компоненты, как правило, устойчивы к коррозионному разрушению. В связи с тем, что металлы, используемые в качестве связки, в большинстве случаев подвержены действию коррозии, стойкость таких материалов определяется преимущественно стойкостью связующей фазы [2].

При повышенных нагрузках и, особенно, при ударном ее приложении, износ и повреждения поверхностей трения будут определяться не только видом материала и его свойствами, но и специфическими условиями работы: теплонапряженностью, уровнем динамических воздействий, агрессивностью среды, наличием абразива и др. При ударном контактировании поверхностей различают [3] следующие виды изнашивания: ударно-абразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое.

При работе долот наблюдается, в основном, ударно-гидроабразивное изнашивание.

### Требования к материалам для буровых долот

На основе условий работы буровых долот разработаны требования к материалам для данного инструмента:

- повышенная твердость (не ниже 90 HRC)
- Высокая изгибная прочность  $\sigma_{изг}$  (не ниже 1200МПа);
- теплостойкость не ниже 700 °С;

- высокая коррозионная стойкость.

Среди износостойких выделяют следующие классы материалов:

- Металлы и сплавы цветных металлов (кроме вольфрамовых, молибденовых, хромистых);
- Стали и чугуны;
- Спеченные твердые сплавы;
- Керамические бескислородные материалы.

М.М. Хрущов показал, что износостойкость композиционного сплава в значительной мере определяется его твердостью [4]. Поэтому одним из основных критериев при выборе материала для бурового инструмента является его твердость. Для нахождения наиболее перспективных классов материалов была построена сравнительная диаграмма, отражающая максимальную достижимую твердость для каждого из классов. Графическое сравнение приведено на рисунке 1

Как видно из диаграммы, наибольшей твердостью обладают КМ.

Наибольшую износостойкость можно ожидать от КМ. Что в значительной мере подтверждается экспериментально [2, 4, 5]. Особенностью КМ является то, что они хорошо работают на сжатие, но плохо воспринимают изгибные напряжения. Графическое сравнение предела прочности при изгибе КМ различного состава представлена на рисунке 2.

Таким образом, наиболее перспективными для повышения износостойкости буровых долот являются КМ. Но существующие КМ не отвечают предъявляемым требованиям и не могут обеспечить длительную работу долот в условиях сверхглубокого бурения. При этом замена основы КМ с карбида вольфрама на другие тугоплавкие материалы на данный момент не удалось достичь такой же износостойкости, как у сплавов группы ВК [5], но такая замена положительно сказывается на их стоимости, а также других характеристиках, по которым эти материалы начинают превосходить сплавы ВК. Поэтому дальнейшие исследования в области замены основы и связки КМ является наиболее оптимальным направлением для повышения их износостойкости.

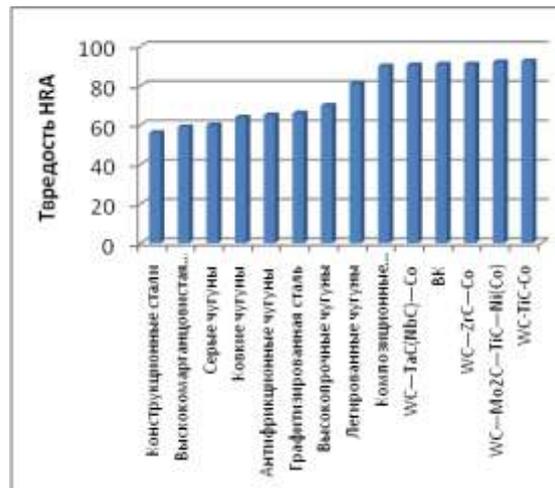


Рисунок 1 – Графическое сравнение твердости различных классов материалов для буровых долот [2,4, 5].

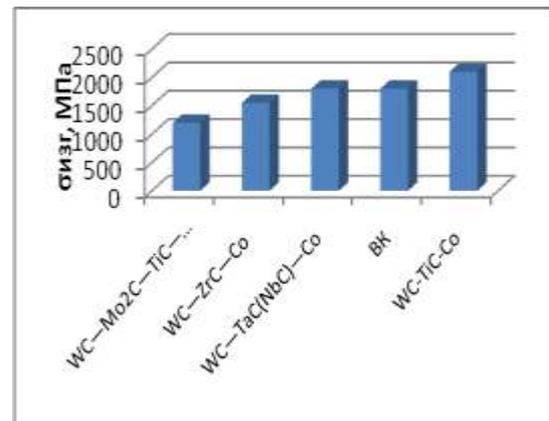


Рисунок 2 - Графическое сравнение предела прочности при изгибе композиционных материалов различного состава [2, 4, 5].

В то же время КМ, пропитанные эвтектическим сплавом инфильтрантом, обладают рядом преимуществ перед используемыми в настоящее время промышленными сплавами:

- Обладают более высокой плотностью.
- Обладают направлено ориентированной структурой.
- Имеют более высокие механические свойства.
- Лучше сопротивляются выкрашиванию твердых дисперсных частиц.
- Их применение дешевле, чем использование алмазных долот.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

### Композиционные материалы, получаемые методом инфильтрации

Сравнение структур КМ различного состава, получаемых методом пропитки, приведено на рисунке 3.

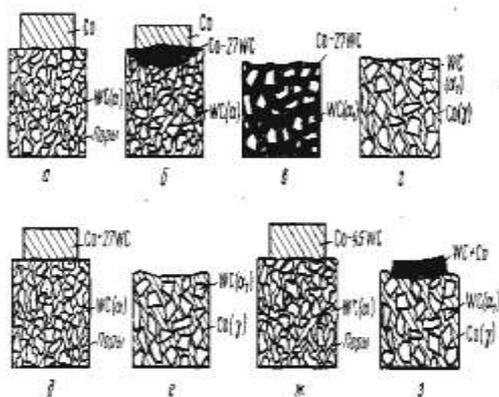


Рисунок 3 – Схема пропитки карбида вольфрама чистым кобальтом (а-г) и сплавами кобальта с карбидом вольфрама эвтектического (д,е) и заэвтектического состава (ж,з): а,д,ж – 293~1553 К; б – ~1553 К; в – 1673~1553 К; г,е,з – ~293 К

Из схемы видно, что структура КМ в значительной степени зависит от температуры пропитки и используемых материалов, т.е. в значительной степени определяется характером и интенсивностью межфазного взаимодействия.

КМ представляет собой гетерогенную систему, состоящую из двух или более фаз, имеющих различную физическую природу и структуру, для которой характерно наличие развитой сети внутренних границ раздела, градиентов концентраций и внутренних напряжений. Все это приводит в общем случае к термодинамической нестабильности композиции, ярким проявлением которой является межфазное взаимодействие компонентов как в ходе технологического цикла, так и в процессе эксплуатации. Это взаимодействие сопровождается образованием новых фаз на границе раздела, которые во многих случаях вызывают нежелательные явления — охрупчивание материала, снижение его прочности и т. д.

Проблема межфазного взаимодействия тесно связана с выбором технологии получения КМ, поскольку без знания закономерностей этого взаимодействия и его влияния на свойства композиции невозможно решить

вопрос о рациональной технологии изготовления КМ. Кроме того, изучение межфазного взаимодействия позволяет прогнозировать оптимальные режимы высокотемпературной эксплуатации КМ.

### Виды межфазного взаимодействия

Следует различать два вида взаимодействия в КМ, получаемых пропиткой: жидкофазное взаимодействие в процессе изготовления и твердофазное взаимодействие в сформированном материале при его эксплуатации.

Взаимодействие первого вида, как правило, обусловлено спецификой технологии получения КМ и может быть устранено или сведено к минимуму барьерными покрытиями или с помощью правильного построения технологии и выбора оптимальных режимов даже в случае использования взаимно растворимых или образующих интерметаллические соединения компонентов.

Взаимодействие второго вида связано с природой компонентов и может быть уменьшено только путем подбора составляющих, включающего либо рациональное легирование фаз, образующих КМ, либо применение барьерных покрытий на них, либо комплекс этих мероприятий.

В КМ возможны следующие типы взаимодействия на границе фаз матрицы и упрочнителя [5]:

- механическая смесь; связь путем растворения и смачивания;
- связь, возникающая в результате химической реакции с образованием продуктов взаимодействия, связь, обусловленная обменными химическими реакциями;
- связь в КМ, армированных волокнами оксидов;
- смешанная связь.

Для КМ, получаемых методом инфильтрации благоприятной является связь путем растворения и смачивания, т.к. при этом происходит не только механическое объединение, но и взаимное диффузионное проникновение компонентов, что повышает прочность на границе раздела. При этом, как правило, не образуются фазы, способствующие охрупчиванию материала.

Технологический процесс с точки зрения взаимодействия фаз состоит из трех этапов: смачивание и растекание инфильтранта, диффузионное или химическое взаимодействие компонентов, кристаллизация жидкой

фазы. При этом на реакции, происходящие на границе раздела, оказывают влияние следующие параметры процесса: время пропитки, смачиваемость каркаса инфильтрантом, время затвердевания инфильтранта. Инфильтрант должен хорошо смачивать каркас, так как при этом достигается хорошая пропитка каркаса и высокая структурная плотность материала.

### Математическое описание межфазного взаимодействия

Для математического описания процессов, протекающих при жидкофазном спекании, необходимо знание следующих уравнений:

Зависимость краевого угла смачивания от поверхностной энергии на границе фаз [5]:

$$\cos \theta \cdot \sigma_{ЖТ} = \sigma_{ТГ} \cdot \sigma_{ТЖ}$$

Зависимость двугранного угла от поверхностных энергий на границе соответствующих фаз:

$$\cos \psi / 2 = \sigma_{ТГ} / 2\sigma_{ТЖ}$$

Зависимость Лапласовского давления ( $\Delta P$ ) от размера твердых частиц (радиуса):

$$\Delta P = 2\sigma_{ТЖ} / r,$$

где  $r$  – радиус кривизны

Зависимость капиллярного поднятия жидкости и капиллярного потенциала от условий спекания:

$$H = (2\sigma_{ЖТ} \cos \theta) / rg(\zeta_{Ж} - \zeta_{Г}), \quad [1]$$

$$J_{К} = gH = (2\sigma_{ЖТ} \cos \theta) / r(\zeta_{Ж} - \zeta_{Г}), \quad [2]$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\zeta$  – плотность жидкости и газа,  $J_{К}$  – капиллярный потенциал.

Из формул (1) и (2) следует, что жидкость втягивается в капилляр при  $\theta < 90^\circ$  и выталкивается из него при  $\theta > 90^\circ$ . Двугранный угол  $\psi$  определяет возможность проникновения жидкости в контакты между частицами, что следует из уравнения  $\sigma_{ТГ} = 2\sigma_{ТЖ} \cos \psi / 2$ . Проникновение жидкости по контактными поверхностям неравновесных частиц (разное  $r$ ) облегчается.

Для буровых долот, работающих в условиях высоких температур (до 600 °С), важным параметром является коэффициент линейного расширения как отдельных компонентов композиционного сплава, так и материала в целом. При различных коэффициентах линейного расширения каркаса и инфильтранта с повышением температуры будут наблюдаться

внутренние напряжения в буровом инструменте, которые могут приводить к его поломке. Кроме того, высокий коэффициент линейного расширения КМ может приводить к искажению размеров деталей буровой головки. Что нежелательно. Для оценки коэффициента термического расширения КМ можно воспользоваться формулой:

$$\alpha_k = \bar{\alpha} - V_A V_B \frac{(\alpha_A - \alpha_B)(E_B - E_A)}{E_A V_A + E_B V_B + 1.6E_B},$$

где  $\bar{\alpha} = \alpha_A V_A + \alpha_B V_B$ ;  $\alpha_A, \alpha_B$  – коэффициенты линейного расширения каркаса и инфильтранта соответственно;  $V_A, V_B$  – объемные доли каркаса и инфильтранта,  $E_A, E_B$  – модули Юнга каркаса и инфильтранта. Таким образом оптимальным будет случай, когда коэффициенты линейного расширения каркаса и инфильтранта равны или близки друг к другу.

Теоретические оценки и накопленный экспериментальный опыт по межфазному взаимодействию позволяют установить правила выбора металлических матриц для КМ. В керметах на основе карбидов рекомендуется в качестве металлической фазы применять металлы, которые не образуют карбидов. Металлическая связь нитридных керметов не должна образовывать стойких нитридов, а силицидных – не должна взаимодействовать с кремнием, поскольку последний в силицидах имеет практически такую же активность, как в свободном состоянии.

Практически все КМ являются термодинамически неравновесными системами. Некоторая степень химического взаимодействия является необходимым условием образования связи между компонентами, тогда как слишком активное взаимодействие чаще всего снижает механические свойства упрочнителей и, как следствие, всей композиции в целом.

Эффективным методом предотвращения вредных реакций при пропитке армированных систем является нанесение на волокна покрытий, не взаимодействующих или слабо взаимодействующих с жидким металлом, что широко используется при получении металлов, армированных углеродными волокнами.

Оптимальным с точки зрения обеспечения прочности является термодинамически равновесная адгезия между фазами.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

### Выбор перспективных компонентов для композиционных сплавов

Для выбора твердой и износостойкой основы нового сплава, а также сплава-инфильтранта необходим анализ свойств исходных компонентов сплава и их межфазного взаимодействия. Для этого была разработана база данных указанных материалов (Свидетельство о государственной регистрации базы данных №201062038).

Использование базы данных позволяет выбирать материалы каркаса и инфильтранта, удовлетворяющие поставленным ранее условиям, с учетом необходимости бурения тех или иных горных пород.

### Заключение

Таким образом, для достижения необходимых физико-механических характеристик композиционного сплава, получаемого методом инфильтрации, необходимы дополнительные по сравнению с волокнистыми КМ требования к свойствам фаз. А именно:

- Краевой угол смачивания каркаса инфильтрантом должен быть меньше  $90^\circ$ .
- Инфильтрант должен иметь меньшее сродство к углероду, азоту, сере или кремнию в случае применения каркаса из карбидов, нитридов, сульфидов или силицидов соответственно.
- Материалы каркаса и инфильтранта должны быть подобраны таким образом, чтобы межфазное взаимодействие определялось термодинамически равновесной адгезией между фазами.
- Коэффициенты линейного расширения каркаса и инфильтранта должны быть равны или близки друг к другу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшаков А.С. Конкретизация параметров режима геологоразведочного бурения скважин при учебном проектировании // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Гірничо-геологічна”. - Донецк: ДонНТУ. 2005. – Вип. 85. – С. 3 – 6.
2. Киффер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы / Под ред. Третьякова В.И. М.: Metallurgia, 1971. 392 с.
3. Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше [и др.], - М.: Машиностроение, 1990. - 688с.
4. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов.- М.: Изд. АИ СССР, 1966.
5. Технология и свойства спеченный твердых сплавов и изделий из них. Учебное пособие для вузов / Панов В.С., Чувиллин А.М. – М.: «МИСИС», 2004, - 428 с.
6. Структура и свойства композиционных материалов/К. И. Портной, С. Е. Салнбеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубарев. — М.: Машиностроение, 1979. — 255 с.

*Ганеев А.А., д.т.н., проф. кафедры МиТЛП,*

*Шлыгин Е.Н., аспирант кафедры МиТЛП, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа,*

*Балута А.Г., заместитель директора – начальник центра разработки бурового инструмента ООО НПП «Буринтех», г. Уфа*

*Ишбаев Г.Г., д.т.н., проф., генеральный директор ООО НПП «Буринтех», г. Уфа*