

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В. В. Смирнов, А. А. Ганеев

Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,
г. Уфа, Россия

Одна из основных проблем нефтегазодобывающей отрасли России — качественное ухудшение сырьевой базы. Основные месторождения Урала, Западной Сибири и Поволжья вышли на поздние стадии разработки со снижающейся добычей нефти. Выработка их запасов достигла 54 %, а доля трудно извлекаемых увеличилась до 55–60 %. Обеспечить достаточную рентабельность их освоения можно только за счет сокращения сроков строительства скважин путем внедрения инноваций в технологию бурения, использования сервисного обслуживания и современного породоразрушающего инструмента с улучшенными эксплуатационными показателями.

Эффективность шарошечного породоразрушающего бурового инструмента определяется в основном работоспособностью трех его основных элементов: вооружения, опоры и промывочного узла.

Рассматривая основные типы вооружения бурового инструмента, применяемые в настоящее время, можно по конструктивным особенностям разделить их на зубчатое поверхностно-армированное и твердосплавное. В первом случае призматический зуб формируется в процессе фрезерования или литья и далее упрочняется при нанесении на поверхность зуба карбида вольфрама — «релита». Во втором — твердосплавный зубок, выполненный из ВК, запрессовывается в корпус шарошки с гарантированным натягом.

Разница физико-механических характеристик основного материала (стали) и армирующего (твердого сплава), как для зубчатого поверхностно-армированного, так и для твердосплавного вооружения предопределяет его изнашивание. В основном все виды изнашивания вооружения сводятся к усталостному в процессе удара и к абразивному. Износ зубчатого вооружения сопровождается отслаиванием с поверхности зуба армирующего слоя, обнажением незащищенной стальной сердцевины и ее интенсивным износом, что приводит к притуплению зуба. Твердосплавный зубок при эксплуатации скалывается,

сламывается или полностью выпадает из шарошки. Это приводит к скоплению на забое твердосплавного материала (скраба) и, как следствие, к снижению показателей бурения.

Приведенные выше рассуждения имеют отношение не только к буровым долотам, но и к подавляющему большинству породоразрушающих буровых инструментов. Это и различные буровые машины, и проходческие породоразрушающие комплексы и породоразрушающие резцы.

Перспективным способом получения породоразрушающего инструмента в настоящее время является способ получения последнего методами литья. Эти методы обладают рядом существенных преимуществ, главные из которых: возможность получения изделий сложной конфигурации с минимальной последующей обработкой или без нее; изделий, которые невозможно получить другими методами, ограниченное силовое воздействие на хрупкие компоненты; широкая номенклатура компонентов; упрощенное аппаратное обеспечение; высокая производительность и возможность механизации; реализация непрерывных технологических процессов.

А современные методы быстрого прототипирования позволяют изготавливать различные виды породоразрушающего инструмента для конкретного заказчика или конкретных условий бурения без длительной и дорогостоящей подготовки производства.

В этой связи представляет интерес исследование композиционных сплавов с целью повышения их эксплуатационных свойств, а также синтез новых сплавов с заданными свойствами для получения литых заготовок породоразрушающего инструмента.

В композиционных материалах, получаемых жидкофазным методом, то есть пропиткой расплавом армирующей фазы, последняя воспринимает основные напряжения, возникающие в композиции при действии внешних нагрузок, и обеспечивают жесткость и прочность композиции в направлении их ориентации. В неокислительной среде расплав металла за счет капиллярных сил пол-

ностью заполняет все поровое пространство, в результате чего образуется беспористое композиционное тело с уникальным комплексом положительных характеристик как армирующей фазы – твердость и износостойкость, так и металлической матрицы – прочность и пластичность. Податливый инфильтрант обеспечивает работу отдельных зерен за счет собственной жесткости и взаимодействия, существующего на границе раздела зерно-инфильтрант.

Поэтому одним из методов повышения свойств композиционных материалов является рациональный выбор армирующей фазы.

В качестве армирующей фазы могут применяться карбиды, бориды, нитриды и оксиды, т. к. они в большинстве являются тугоплавкими, твердыми и износостойкими.

Для выбора армирующей фазы, прежде всего, необходимо определить, какие свойства оказывают решающее значение.

Армирующая фаза должна обладать высокой твердостью. Это требование вытекает из назначения армирующей фазы – придание композиционному сплаву высокой твердости и износостойкости.

Высокая сила межатомного взаимодействия, которая определяет свойства армирующей фазы, связана с температурой плавления.

В связи с тем, что армирующая фаза должна быть пропитана сплавом, необходимо, чтобы она смачивалась инфильтрантом, т. е. при заполнении пор сплавом-инфильтрантом образовывался краевой угол смачивания менее 90° .

Так как пропитка ведется при температурах, превышающих температуру плавления инфильтранта, важным фактором является также коэффициент линейного теплового расширения. В случае большого значения данного коэффициента возможно образование усадочных пустот, резко снижающих свойства композиционного материала.

Также важным показателем, характеризующим термодинамическую устойчивость, является теплота образования армирующей фазы.

Экспериментальные и теоретические исследования выявили следующие признаки смачивания оксидов жидкими металлами.

Смачиваемость оксидов улучшается с повышением сродства жидкого металла к кислороду. Металлы, активные по отношению к кислороду (титан, цирконий, алюминий, кремний, марганец), хорошо смачивают оксиды типа Al_2O_3 , BeO , UO_2 , MgO и т. д. Напротив, расплавы малоактивных металлов (ртуть,

олово, свинец, серебро, медь, никель, кобальт, железо) плохо смачивают эти оксиды.

Смачиваемость оксидов уменьшается при увеличении энергии связи кислорода в оксиде.

Т. е., исходя из значений краевых углов смачивания, оксиды не могут применяться в качестве армирующей фазы в композите для большинства металлов и их сплавов.

Смачиваемость боридов, карбидов и нитридов для большинства металлов значительно лучше. Непереходные металлы (олово, индий, германий, галлий, медь, золото, серебро, свинец) имеют малое сродство к бору, азоту и кремнию, поэтому они практически не вступают во взаимодействие с указанными ковалентными кристаллами (кроме бора). Соответственно смачивание в подавляющем большинстве этих систем отсутствует. Напротив, в системах с интенсивным химическим взаимодействием (при контакте с переходными металлами, а также с алюминием, бором, кремнием) наблюдается интенсивное растекание расплава по поверхности ковалентных кристаллов.

Литературный обзор показал, что наибольшей микротвердостью (70 кг/мм^2) обладает BN. Он также обладает низким коэффициентом температурного расширения ($0,5...1,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Однако это соединение является термодинамически неустойчивым. Кроме того, большое количество элементов не смачивают данную фазу. Исходя из этого, данная фаза не применима для использования в качестве армирующей.

Также высокой микротвердостью обладают (более 30 кг/мм^2) бориды W, Zr, Ti, Nb, Ta, Ba. Они являются термодинамически устойчивыми, обладают высокой температурой разложения. Бориды хорошо смачиваются переходными металлами. Однако коэффициент линейного расширения боридов достаточно высок ($4,5...7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Поэтому их использование в качестве армирующей фазы нежелательно.

Микротвердостью $20...30 \text{ кг/мм}$ обладают карбиды и нитриды тугоплавких элементов, а также ряд силицидов. Наименьшим коэффициентом температурного расширения из них обладают Si_3N_4 , WC (до $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Среди них Si_3N_4 и WC обладают способностью хорошо смачиваться переходными металлами и термодинамически устойчивы. Причем по микротвердости и способности не расширяться при нагреве наилучшими свойствами обладает Si_3N_4 , в то время как по смачиваемости и модулю упругости – WC. Следует

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

также отметить, что WC обладает высоким сцеплением с Ni, Cr, Fe и другими переходными элементами при отсутствии химического взаимодействия. Si_3N_4 уступает WC по силе сцепления с названными элементами.

Из фаз с микротвердостью менее 20 кг/мм^2 . Наименьшим коэффициентом температурного расширения ($3,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) обладает TaN. Однако TaN является термодинамически неустойчивым, поэтому не может применяться в качестве армирующей фазы разрабатываемого композиционного материала. Остальные фазы обладают значительно большим коэффициентом температурного расширения (более $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), поэтому также не могут применяться в качестве армирующей фазы композиционного материала.

Таким образом, наиболее перспективными фазами для создания износостойкого композиционного материала являются Si_3N_4 и WC.

Вторым способом повышения износостойкости композиционного материала является создание прочного и пластичного сплава-инфильтранта. Первым этапом синтеза сплава является формулировка требований к нему.

При этом следует учитывать, что при пропитке армирующей фазы сплавом-инфильтрантом могут образовываться поры, наличие которых резко снижает механические свойства материала. Поэтому, чтобы избежать пор, свойственных сплавам, затвердевающим в интервале температур, в качестве сплава-инфильтранта необходимо применять материалы, обладающие точкой плавления. Чистые металлы, хоть и удовлетворяют этому требованию, не позволяют изменять их природные свойства. Тогда единственным вариантом повышения механических свойств сплава-инфильтранта является применение эвтектических сплавов.

Основные требования, предъявляемые к инфильтранту, следующие:

- Прочность сплава должна превосходить прочность применяемых чистых металлов (кобальт) при сохранении удовлетворительной пластичности;
- Температура плавления инфильтранта не должна быть ниже 600°C ;
- Удовлетворительная смачиваемость и жидкотекучесть расплава;
- Высокая прочность связи на границе раздела армирующей фазы-инфильтранта.

Следующий шаг в синтезе сплавов-инфильтрантов — выбор основы сплава. Выбор основы сплава должен производиться как исходя из технического задания, так и из эко-

номических соображений (стоимость, преобладание в земной коре), а также из особенностей кристаллической решетки (должны отсутствовать полиморфные превращения в области эксплуатационных температур).

В настоящее время для пропитки порошковых материалов используется кобальт, который обладает высоким уровнем прочности при удовлетворительной пластичности. Кобальт хорошо смачивает карбиды и нитриды, имеет малый коэффициент расширения. Большим преимуществом кобальта перед другими элементами является то, что он не теряет своих свойств в условиях пониженных температур. При этом в отличие от железа, кобальт лучше сопротивляется коррозии. Стоимость кобальта также является приемлемой. Чистый кобальт имеет полиморфное превращение при температуре 400°C , т. е. выше зоны рабочих температур. Поэтому именно кобальт выбран в качестве основы сплава.

Имеющиеся в литературе данные по эвтектическим системам с участием кобальта необходимо обобщить и систематизировать. Поэтому была разработана база данных по двух, трех и четырехкомпонентным системам, а также информационно-поисковая система к ней.

Следующим шагом синтеза сплава-инфильтранта является выбор легирующего комплекса. Основными факторами при выборе легирующих элементов являются:

- Сочетание высокой прочности и пластичности;
- Температура плавления не ниже 600°C ;
- Удовлетворительная смачиваемость армирующей фазы;
- Удовлетворительная технологичность и высокая коррозионная стойкость элементов;
- Относительно невысокая стоимость.

Отбор компонентов эвтектического сплава проводится в первую очередь по сочетанию высоких прочностных и пластичных свойств и по смачиваемости армирующей фазы.

К элементам, обладающим наибольшей прочностью и пластичностью, относятся Ni, Mo, Cr, Hf. Их предел прочности находится в интервале от 400 до 530 МПа, пластичность превышает 30 %.

Несколько уступают по прочностным свойствам Nb, Fe, Cu, Mn и Zr. Их прочность достигает 200–350 МПа, пластичность достигает до 60 % (Cu).

Наконец, Cd, Al, Sn, Pb, Ga, Ta, обладая очень высокой пластичностью (134 % Ga), имеют предел прочности менее 200 МПа.

Кроме того, перечисленные элементы обладают неудовлетворительной смачиваемостью армирующей фазы.

Остальные элементы не обладают достаточной пластичностью.

Из первой группы элементов (предел прочности 400...530 МПа, пластичность более 30 %) нежелательно применение хрома и гафния. Хром сильно чувствителен к примесям и резко охрупчивается даже при незначительном их содержании. Для избежания влияния вредных примесей хром необходимо легировать редкоземельными металлами или рением. Хром быстро покрывается оксидной пленкой и уже во время плавки может препятствовать заполнению пористого пространства между армирующей фазой. Гафний также чувствителен к примесям и его плавку проводят в глубоком вакууме. Следовательно, эти элементы недостаточно технологичны. Поэтому в качестве легирующих элементов из названной группы могут применяться Ni и Mo. Все перечисленные элементы хорошо смачивают армирующую фазу.

Во второй группе элементов имеют хорошую смачиваемость Nb, Fe, Mn и Zr, в то время как медь смачивает карбиды лишь при определенных условиях. Тем не менее, для пропитки медь может применяться, т.к. при взаимодействии с переходными и редкоземельными металлами краевой угол смачивания медного расплава значительно снижается. Nb и Cu обладают высокой коррозионной стойкостью. Пластичность Mn сильно зависит от степени чистоты металла, при микролегировании марганца редкоземельными металлами, способными связывать вредные примеси в тугоплавкие или

летучие соединения, пластичность его возрастает. Железо обладает высокими свойствами, однако недостаточно стойко к коррозии. Для увеличения его коррозионной стойкости его легируют хромом. Цирконий, как диспрозий и церий, применяется в основном для микролегирования в связи с его способностью связывать вредные примеси.

Таким образом, предпочтительными легирующими элементами являются Ni, Mo, Nb. Применение в качестве легирующих элементов Cu, Mn предусматривает также использование таких элементов, как Ce, Zr, Hf и т. д.

С учетом ценового фактора элементы можно расположить в следующий ряд (по возрастанию): Cu, Ni, Mo, Zr, Nb.

Преимущества выбранных элементов, кроме уже перечисленных, состоят также в следующем:

- Относительно большая распространенность;
- Удовлетворительные технологические свойства;
- Стабильность свойств во времени;
- Малый коэффициент термического расширения;
- Высокая теплопроводность.

Исходя из вышеизложенного следует сделать вывод, что основным направлением исследований по созданию новых видов композиционных материалов для буровой промышленности будет исследование материалов, имеющих армирующую фазу на основе карбидов и нитридов и имеющих в виде инфильтранта синтезируемые сплавы на основе кобальта, легируемые группой химических элементов.