

1544725

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государствен-
ный технический университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Воркина Тамара Евгеньевна

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БЕСПЕСТОВЫХ ПОРОШ-
КОВЫХ ОБЛИЦОВОК КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ ПЕРФО-
РАТОРОВ С ЦЕЛЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ОТДАЧИ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая
обработка металлов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва - 1994

Работа выполнена в Московском Ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и Ордена Трудового Красного Знамени государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук,

профессор Ю.А.Быков

Официальные оппоненты: доктор технических наук,

профессор Ю.К.Ковнери-
тый,

кандидат технических наук,

с.н.с. А.И.Колмаков

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1544725

Воркина Т.Е. Разработка ма

Ведущая организация – ВНИИГТ

Защита диссертации состоится "30" сентя 1994г.
на заседании Совета К 053.15.13 в Московском государственном те-
хническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Ваш отзыв на авторефе-
рат, просим выслать по
С диссертацией можн
имени Н.Э. Баумана

Телефон для справ
Автореферат разосл

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СОВЕТА, к.т.н.

Подписано к печати
заказ № 158

1544725

Актуальность темы. В комплексе геофизических работ по сооружению и эксплуатации нефтяных и газовых скважин используются кумулятивные перфораторы для пробития в обсадных трубах и породе каналов, позволяющих осуществлять надежную связь пласта со скважиной. Большое влияние на пропускную способность перфорационных каналов оказывает тип применяемых облицовок кумулятивных зарядов. Использование в настоящее время медных штампованных облицовок осложнено явлением пестообразования. Происходит запестовывание каналов в 20...60% случаев от общего числа выстрелов, что существенно сокращает приток флюидов в скважину.

15144225
В последнее время особый интерес вызывает использование в качестве беспестовых облицовок порошковых материалов. Однако суждения в этом отношении противоречивы. Тем не менее можно констатировать, что в ряде случаев использование облицовок, изготовленных из порошковых материалов, устраняет пестообразование, но при этом глубина пробития невысока и составляет 60...70% от глубины пробития наиболее результативных зарядов с медными штампованными облицовками. Причины такого поведения порошковых облицовок до конца не выяснены, а количество исследованных различных порошковых композиций крайне незначительно. Вместе с тем возможность полного устранения песта при использовании порошковых материалов, применение безотходной технологии изготовления облицовок, а также создание, в отличие от компактных материалов, самых разнообразных композиций выдвигает порошковые материалы в ряд наиболее перспективных для разработки кумулятивных облицовок зарядов перфораторов.

Цель работы состояла в разработке композиций порошкового материала на основе меди для облицовок кумулятивных зарядов, обеспечивающих гарантированное отсутствие пестообразования, глубину пробития и (свободный) объем перфорационного канала не ниже чем у компактных штампованных облицовок.

В этой связи в работе решались следующие задачи:

1. Изучение особенностей поведения порошкового материала в условиях детонационного обжигания в зависимости от размерных характеристик частиц порошка, пористости материала, а также массы и геометрии облицовок.
2. Выбор и исследование влияния легирующих компонентов на технологичность изготовления порошковых облицовок и их рабочие ха-

рактические.

3. Разработка представлений о механизме песторазрушения при введении дополнительных компонентов в порошковых материал, находящихся в условиях детонационного обжата в различных агрегатных состояниях.
4. Разработка рационального состава материала облицовок и технологии их изготовления, обеспечивающих наряду с высокой пробивной способностью отсутствие песта.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены особенности поведения медных порошковых облицовок в сравнении с компактными при детонационном обжате и выявлено влияние на рабочие характеристики облицовок характеристик порошков, а также массы, геометрии и плотности облицовок.
2. Выявлены закономерности влияния легирующих компонентов, образующих при детонационном обжате порошковых облицовок газовую (C , MnS_2), жидкую (Pb , B_2O_3) фазы и находящихся в твердом состоянии (WC , TiO_2 , CaF_2), на формирование кумулятивных струй, глубину пробития, уровень пестообразования и свободный объем перфорационного канала.
3. Предложены механизмы песторазрушения при легировании порошка меди указанными компонентами.
4. Сформулированы основные принципы подбора комплекса легирующих добавок, обеспечивающих высокую технологичность изготовления облицовок и их рабочие характеристики.

Практическая ценность работы состоит:

1. Для повышения технологичности изготовления порошковых облицовок, устранения пестообразования и увеличения свободного объема перфорационного канала рекомендуется комплексное легирование медных порошковых материалов добавками Pb в сочетании с добавками высокотемпературных омазок — C и MnS_2 .
2. Предложена технология изготовления порошковых облицовок, обеспечивающая минимальную разнородность и разностенность, высокую равномерность распределения компонентов в объеме облицовок.
3. Разработаны и предложены для промышленного использования материалы облицовок состава: Pb —12мас.%, C —0,5мас.%, Si —остальное и Pb —14мас.%, MnS_2 —1мас.%, Si —остальное. Они превосходят компактные медные облицовки по глубине пробития, объему свободного перфорационного канала и не образуют пестов. Более дешевые материалы с добавками графита имеют ограниченный до

1 года срок хранения. Использование порошковых облицовок позволяет повысить на 20...40% отдачу нефтяных и газовых скважин.

Основные положения, выносимые на защиту:

- особенности работы порошковых облицовок в условиях детонационного обжата;
- механизм воздействия легирующих добавок на песторазрушение, базирующийся на их переходе под действием детонационного обжата облицовки в газообразное, жидкое или сохраняющих твердое состояние;
- принципы разработки порошковых композиций для беспестовых облицовок, основывающийся на введении в порошковую матрицу легирующих добавок с различными физико-химическими свойствами.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на: У1 Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, Ташкент, 1986; на школе передового опыта "Повышение эффективности геофизических исследований глубоких скважин в нефтегазовых провинциях Украины", ВДНХ УССР, 21-23 апреля, 1987.

Публикации. По теме диссертации имеется 3 публикации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложения. Работа представлена на 149 машинописных листах, из них 107 - машинописного текста, 42 стр. содержат 42 рисунка, 17 стр.-13 таблиц. Список литературы на 10 стр. содержит 91 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность задачи разработки беспестовых порошковых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов, пути ее решения и достигнутые результаты.

В главе I рассмотрены условия работы кумулятивных зарядов с металлическими облицовками. Рассмотрены основные научные положения о формировании кумулятивной струи и образование песта. Отмечено, что детонационное обжатие облицовки происходит в условиях повышения температуры до 1000°C и развития давлений порядка 10^4 МПа. Рассмотрены особенности поведения материала облицовки при детонационном обжатии и сформулированы требования к материалу с целью обеспечения максимальной глубины пробития, которые сводятся в основном к обеспечению высокой пластичности и плотности. Наиболее полно отвечает перечисленным требованиям - медь. Общим недостатком используемых в настоящее время материалов облицовок является пестообразование.

Проведен анализ существующих методов снижения запестованности каналов, в частности, путем изменения конструкции облицовки, введения систем отклонения или улавливания пестов, применения биметаллических облицовок, замены компактных штампованных материалов на порошковые. Обоснована перспективность перехода от компактного материала облицовок к порошковому на основе меди, технология изготовления которого позволяет получать холодным прессованием самые разнообразные композиции. Однако крайне ограниченный объем опубликованного материала по порошковым композициям не позволяет выявить общие принципы легирования порошковых материалов путем введения в их состав добавок различных компонентов. Выдвинута гипотеза о возможности устранения пестообразования путем ослабления связи между частицами порошка меди введением легирующих добавок. Сформулированы задачи исследований.

В главе 2 рассмотрены объекты и методы исследований. Основными объектами исследований являлись облицовки кумулятивных зарядов перфораторов, имеющих конусную форму с углом при вершине 60° . Облицовки изготавливались холодным двухсторонним прессованием порошков меди, порошковых композиций на основе меди с легирующими добавками Pb , C , MoS_2 , CaF_2 , TiO_2 , B_2O_3 , WC , а также холодной штамповкой меди.

С целью изучения влияния дисперсности и морфологии порошков меди на рабочие характеристики облицовок были использованы различающиеся по этим параметрам порошки марок ПМР, ПМС-I, ПМС-II. Качество порошковых облицовок оценивалось в сравнении со свойствами широко применяемых компактных медных облицовок из меди марки М1.

Дисперсность частиц порошка и форм-фактор определялись микроскопическим методом на оптическом "Leitz" (ФРГ), а также на электронном растровом микроскопе "Camscan" (Англия) с использованием системы обработки изображений "Videocab" (Англия-СССР).

При выборе режимов смешивания компонентов шихты, обеспечивающих равномерное распределение добавок, проводился отбор проб и их химический анализ по ГОСТ 23148-79.

Плотность облицовок и ее изменение по объему изделия определялось гидростатическим способом по ГОСТ 18898-88. В последнем случае проводилась разрезка облицовок. Рассчитывалась аддитивная плотность композиций как обратная величина

суммы отношений долей компонентов к их плотностям.

Изучалась микроструктура облицовок и пестов, характер распределения легирующих элементов с использованием электронного микроскопа "Camscan" и микроанализатора "Microspectra" (США).

Микротвердость материалов оценивалась на приборе "HV2000" (Япония).

Исследование закономерностей формирования и движения кумулятивной струи проводилось методом мгновенной рентгенографии на 4-х канальной рентгеноимпульсной установке (РИУ).

Определение пробивной способности и уровня запестованности различных зарядов осуществлялось по стальной и комбинированным мишеням. Заряды ЗПК 103 и ЗПК 105-7 устанавливались на расстоянии 50 ± 3 мм от мишени, ЗПК 95Н1- 45 ± 3 мм.

Сравнительные испытания зарядов с порошковыми и медными компактными облицовками осуществлялись на окважинах Зап. Украины и Сибири.

Глава 3 посвящена изучению влияния характеристик порошковых и компактных медных облицовок на рабочие характеристики кумулятивных зарядов. Исследования позволили выявить некоторые особенности поведения порошковых материалов в условиях детонационного обжатия в сравнении с компактными. При формировании песта порошкового материала происходит изменение формы пор от округлой к более вытянутой. По мере перехода от центральной части песта к его периферии уменьшается размер и количество пор вплоть до их исчезновения вблизи поверхности песта. В отличие от сердцевин в периферийной области песта полностью завершена рекристаллизация и зерна имеют округлую форму, аналогично песту компактной облицовки. Следует отметить, что чем выше пористость облицовки, тем меньше толщина области высокоплотного материала песта. Возможность формирования таких областей высокоплотного и прочного материала можно считать причиной пестообразования при использовании порошковых облицовок.

Кумулятивная струя порошковой облицовки представляет собой поток частиц, который со временем "распыляется", что вызывает падение пробивной способности зарядов.

Установлено, что на пробивную способность и пестообразование оказывает влияние размер частиц порошка и их форма. Исследованы порошки марок ПМР, ПМС-1, ПМС-Н, отличающиеся по этим параметрам. Наилучший комплекс свойств обеспечивает порошок ПМС-Н, имеющий номинальный размер частиц 224 мкм и ден-

притную форму (форм-фактор 0,39). Холодное прессование облицовок из этого порошка создает благоприятную для песторазрушения микроструктуру. Материал облицовки имеет более 40% вытянутых крупных пор и слабо развитую площадь контакта частиц, являющихся факторами песторазрушения.

Повышение плотности кумулятивной струи и глубины пробития возможно, путем увеличения массы облицовки за счет снижения пористости материала или увеличения ее размеров. Однако, установлено, что снижение пористости ниже 12,6% приводит к пестообразованию. Порошковые облицовки с увеличенной толщиной стенок и обеспечивающие максимальную глубину пробития 90 ± 5 мм на 64% тяжелее облицовок из компактной меди (глубина пробития 100 ± 10 мм). Установлена зависимость глубины пробития заряда от величины радиуса округления вершины облицовки. При увеличении радиуса округления происходит снижение глубины пробития. Наиболее рациональный размер радиуса с учетом сложности его обеспечения составляет 2,5...3 мм.

Проведенные исследования позволяют заключить, что применение порошковых облицовок с пористостью ниже 12,6% позволит полностью исключить пестообразование, но при этом происходит интенсивное снижение глубины пробития. В этой связи использование пористости как фактора песторазрушения является неэффективным. Представляется целесообразным применение для изготовления облицовок порошка марки ПМС-Н, максимальное уплотнение материала, обеспечение радиуса скругления вершины облицовки не более 2,5...3 мм и введение в состав порошка добавок, выполняющих функцию песторазрушения и повышающих рабочие характеристики облицовок.

Глава 4 посвящена выбору и исследованию влияния легирующих добавок на рабочие характеристики порошковых облицовок с целью улучшения их свойств и разработке представлений о механизме песторазрушения. В работе сформулирована совокупность требований к легирующим добавкам. Они должны:

- обеспечивать технологичность материала при прессовании, способствуя его максимальному уплотнению, снижению разнородности частей облицовки и равномерному распределению легирующих компонентов по объему облицовки;
- повышать или существенно не снижать плотность материала;
- улучшать пластичность материала в условиях детонационного обжата;

- способствовать образованию высокоплотной кумулятивной струи большой протяженности;
- вызывать песторазрушение.

Для повышения технологичности композиций при холодном прессовании были выбраны легирующие добавки, обычно применяемые в качестве твердых смазок. Их назначение - снижение трения между частицами порошка меди при прессовании и обеспечение их более плотной укладки. В качестве таких добавок применялись графит, дисульфид молибдена, фтористый кальций, двуокись титана, а также свинец. Поскольку указанные добавки применяются в качестве высокотемпературных смазок, они должны способствовать взаимному перемещению частиц при детонационном обжати материала. Подобный эффект должен наблюдаться и при введении высокопластичных добавок Pb .

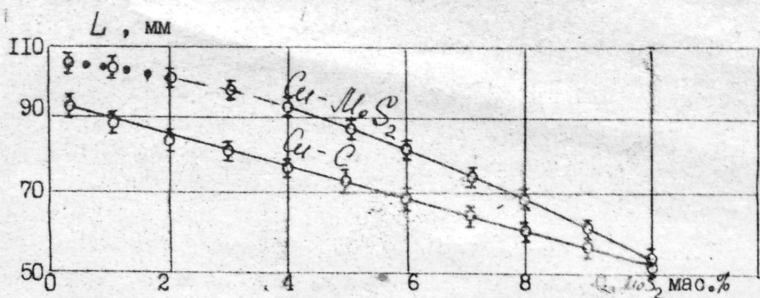
С точки зрения песторазрушения все эти добавки по предполагаемому механизму действия, связанному с переходом добавок при детонационном обжатии в различные агрегатные состояния можно разбить на три группы. Первую группу составляют C и MoS_2 . Они по данным термодинамических расчетов образуют газовую фазу, которая нарушает связь между частицами порошка меди. Во вторую группу входит Pb . Он изолирует частицы порошка меди и, находясь в условиях взрыва в жидком состоянии, облегчает перемещение частиц и разрушение материала. Третью группу составляют CaF_2 и TiO_2 . В условиях взрыва они сохраняют исходное твердое состояние и, изолируя частицы меди, препятствуют спеканию материала и образованию песта. Рассмотренные компоненты наиболее полно отвечают сформулированным требованиям к легирующим добавкам. Кроме того, в качестве легирующих добавок были использованы B_2O_3 и WC . Оксид бора имеет низкую температуру плавления ($T_{пл} = 450^\circ C$), инертен по отношению к меди и в условиях взрыва находится в жидком состоянии. По этому параметру он может быть отнесен ко второй группе добавок. Карбид вольфрама имеет высокую плотность ($15,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). По данным химического анализа пестов он полностью сохранился в материале и поэтому был отнесен к третьей группе легирующих добавок.

Экспериментальные исследования показывают, что добавки C и MoS_2 при холодном прессовании способствуют уплотнению порошкового материала облицовки. Максимальный эффект снижения пористости с 12,3% до 4,5...4,3% имеет место при увеличении содержания добавок до 0,5мас.%. Добавки C и MoS_2 создают благо-

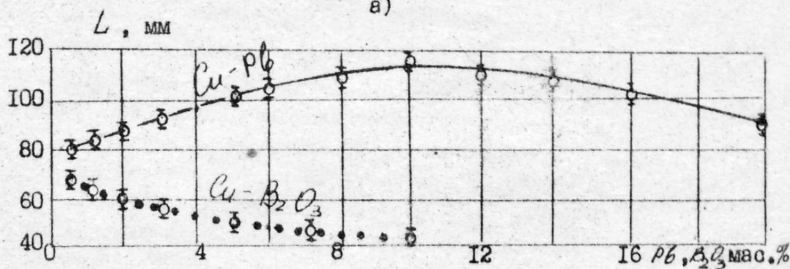
приятную для разрушения песта микроструктуру. Они равномерно распределены по границам зерен меди в виде изолирующих прослоек. Добавки способствуют снижению разнотекучности облицовок с $0,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (Cu) до $0,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ($0,5 \text{ мас.} \% \text{ MoS}_2$, остальное Cu). Рабочие характеристики облицовок представлены на рис. 1а, из которого следует, что пестообразование полностью отсутствует при содержании в композиции MoS_2 свыше $4 \text{ мас.} \%$ и C — свыше $0,5 \text{ мас.} \%$. Электронномикроскопическими и локальным химическим анализами материала пестов установлено наличие в них дисульфида молибдена. Очевидно, в условиях кратковременного взрывного процесса происходит лишь частичное его окисление.

Можно выделить факторы, препятствующие пестообразованию в условиях силового воздействия на облицовку. К ним в первую очередь относится наличие между частицами меди дисульфида молибдена, препятствующего их спеканию и выполняющего роль смазки, обеспечивающей легкое перемещение частиц и соответственно разрушение песта. В свою очередь к разрушению материала путем разъединения частиц меди должно приводить образование газовой фазы вследствие частичного окисления MoS_2 . При малом содержании в композиции MoS_2 разрушение характеризуется образованием в песте пор и микротрещин, при большом содержании (более $4 \text{ мас.} \%$) — полным разрушением песта.

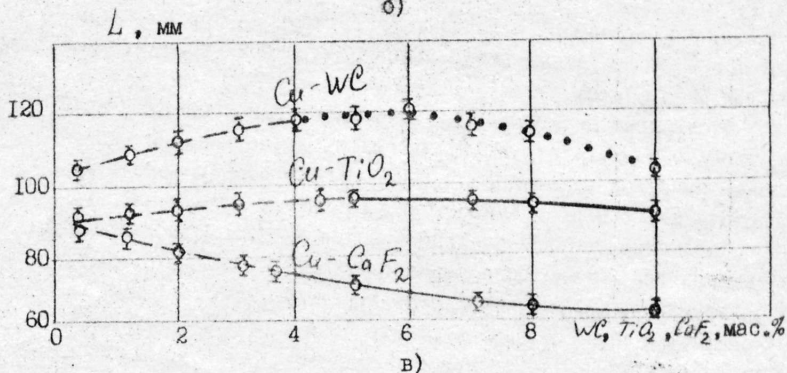
Отсутствие пестообразования у материала, содержащего C , не позволило изучать структуру материала после воздействия взрывных нагрузок на облицовку. Поскольку графит по своим характеристикам во многом аналогичен дисульфиду молибдена, а, именно, является твердой смазкой и начинает окисляться при низкой температуре, можно было бы ожидать одинаковых механизмов песторазрушения. Однако при малых добавках графита ($0,5 \text{ мас.} \%$) его количество явно должно быть недостаточным для изоляции значительного числа частиц меди, обеспечивающих разрушение песта путем относительного сдвига частиц. По крайней мере, при использовании дисульфида молибдена для этой цели требуется введение его в материал в количестве не менее $4 \text{ мас.} \%$. Поэтому основным фактором, препятствующим пестообразованию при использовании в композиции графита, в отличие от MoS_2 является образование газовой фазы. По данным термодинамических расчетов графит окисляется с образованием большого объема газообразных продуктов, что объясняет повышенный эффект песторазрушения при малых добавках его в композицию.



a)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость глубины пробития и уровня пестообразования от содержания в материале легирующей добавки а) C и MoS_2 , б) Pb и B_2O_3 , в) WC , TiO_2 и CaF_2 .

— — — — — отсутствие песта
 - - - - - неустойчивое пестообразование
 устойчивое (100%) пестообразование

Влияние C и MnS_2 на глубину пробития проявляется следующим образом (рис. 1а). При введении в порошок меди 0,5 мас. % C и S происходит возрастание глубины пробития с 90 ± 5 мм (для чистого медного материала) до 105 ± 6 мм и 95 ± 4 мм соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации добавок вызывает монотонное снижение пробивной способности зарядов. Установленная закономерность может быть объяснена аналогичным изменением плотности материала облицовок при легировании. Легирующие добавки с одной стороны устраняют пористость материала, повышают плотность, с другой – увеличение концентрации относительно легких добавок приводит к ее уменьшению. Последний фактор становится основным при содержании легирующих добавок более 0,5 мас. %.

Введение добавок второй группы (B_2O_3 , Pb) проявляется на свойствах материала следующим образом. Добавки B_2O_3 не приводят к снижению пористости при холодном прессовании. Она является открытой и сохраняется на уровне порошковых медных облицовок – 12,7%. Для системы $Cu-Pb$ отмечено резкое снижение пористости до 6,2 мас. % при повышении содержания свинца до 1,0 мас. %. Свинец создает благоприятную для разрушения песта микроструктуру, располагаясь в прессовке в виде изолирующих частицы меди прослоек. В отличие от свинца оксид бора сосредоточен в виде самостоятельных включений округлой формы. При большом содержании Pb отмечается неравномерное его расположение по объему облицовки с образованием крупных включений – сегрегаций.

Влияние этих добавок на пробивную способность и пестообразование представлено на рис. 1б. Из рисунка следует, что для материала $Cu-Pb$ существует область неустойчивого пестообразования и область отсутствия пестов. Для материала $Cu-B_2O_3$ характерна одна область устойчивого пестообразования. Установленные закономерности вызываются следующими причинами. При обжатии взрывом происходит перераспределение свинца, находящегося в жидком состоянии ($T_{пл.} = 327^\circ C$), и появляются области с крупными, ориентированными вдоль оси песта включениями. Вытянутая форма их свидетельствует об интенсивной деформации материала. Разрушение песта происходит по этим вытянутым включениям, обладающим минимальной прочностью. Полное отсутствие пестообразования имеет место при содержании свинца выше 5 мас. %, когда обеспечивается высокая степень изоляции частиц меди. В случае легирования материала B_2O_3 , последний, как показал микрорентгеноспектральный анализ, отсутствует в материале песта. Находясь

при детонационном обжиге в жидком состоянии ($T_{пл.} = 450^{\circ}\text{C}$), он вытесняется из высокопористой матрицы и не препятствует ее спеканию и образованию песта.

Введение добавок второй группы сказалось на пробивной способности облицовок следующим образом (рис. 1б). При увеличении в материале свинца снижается пористость материала и увеличивается аддитивная плотность, что определяет рост пробивной способности заряда. Однако появление крупных сегрегаций Pb и увеличение разнородности облицовок при его содержании свыше 10 мас.% вызывает, как показали исследования кумулятивной струи на РИУ, падение ее стабильности и, как следствие, снижение пробивной способности. Введение в материал B_2O_3 не приводит к снижению пористости и уменьшает аддитивную плотность, приводя к уменьшению пробития.

Добавки третьей группы (WC , TiO_2 , CaF_2) являются тугоплавкими. Их температуры плавления превышают рабочую температуру (1000°C). В условиях детонационного обжига они находятся в твердом состоянии и не вступают в химические реакции с Cu . При холодном прессовании они снижают пористость материала. При введении добавок в количестве 0,5 мас.% WC снизил пористость с 12,7% до 6,4%, TiO_2 - до 10,9% и CaF_2 - до 5,2%. Из легирующих компонентов CaF_2 способствует формированию наиболее благоприятной для разрушения песта микроструктуры.

Результаты испытаний облицовок представлены на рис. 1в. В начальный момент при увеличении концентрации легирующих добавок отмечается во всех случаях наличие областей неустойчивого пестообразования. При дальнейшем повышении концентрации пестообразование становится устойчивым. Увеличение концентрации TiO_2 и CaF_2 в композициях приводит к полному разрушению песта.

При детонационном обжиге облицовок материала $Cu - WC$ происходит дробление частиц WC . По данным морфологического анализа частицы довольно равномерно распределены по объему песта. Отмечено существенное увеличение твердости материала. Можно предположить, что частицы WC с высокой плотностью способствуют уплотнению материала при детонационном обжиге, о чем свидетельствует снижение пористости с 6,4% для облицовки до 0,47% для песта. Этот факт является причиной пестообразования.

Механизм песторазрушения для $Cu - CaF_2$ близок к механизму песторазрушения материалов системы $Cu - MoS_2$.

Частицы CaF_2 раздвигают частицы меди за счет образования твердых прослоек. Их вытянутая форма (фактор-формы 0,4) способствует разрушению песта. Материалы, содержащие TiO_2 имеют менее благоприятную форму пор (форм-фактор 0,7). Разрушение песта происходит при больших чем для CaF_2 концентрациях добавки.

Для систем $\text{Cu} - \text{CaF}_2$ и $\text{Cu} - \text{TiO}_2$ микроспектральным анализом пестов легирующих добавок в них не обнаружено, что, по-видимому, объясняется их малой плотностью и удалением за счет этого из песта.

Установлено, что при введении в материал добавок WC значительнее происходит рост пробивной способности зарядов (рис. 1в), а затем ее снижение. Рост пробивной способности при введении WC обусловлен снижением пористости материала при холодном прессовании и увеличением аддитивной плотности. Как показали исследования кумулятивных струй на РМУ снижение пробивной способности облицовок при значительных концентрациях WC обусловлено падением устойчивости струй. Это связано, как показали микроструктурные исследования, с увеличением неравномерности распределения добавок по объему облицовки. Данный эффект проявляется в порошковых материалах при значительных различиях по плотности компонентов. При введении в состав материала облицовок CaF_2 от 0,5 до 10 мас. % наблюдается монотонное снижение пробивной способности. Основная причина снижения пробития обусловлена низкой плотностью CaF_2 ($\gamma = 3,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Введение TiO_2 от 0,5 до 10 мас. % мало сказывается на величине пробития.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать в качестве интенсивных песторазрушающих добавок графит и дисульфид молибдена. Для повышения пробивной способности облицовок перспективной добавкой следует считать Pb . Аналогичный по своему действию WC менее технологичен, так как приводит к быстрому износу прессинструмента, кроме того карбид вольфрама повышает уровень пестообразования.

Глава 5 посвящена совершенствованию технологии получения беспестовых порошковых облицовок, исследованию материалов систем $\text{Cu} - \text{Pb} - \text{C}$, $\text{Cu} - \text{Pb} - \text{MoS}_2$, а также стендовым, промышленным испытаниям. Изготовление облицовок проводилось по технологии, разработанной в Белорусском республиканском НИИ порошковой металлургии, из которой были исключены операции спекания и последующего калибрования. Основная

цель совершенствования технологии состояла в обеспечении равномерности распределения компонентов в шихте, снижении пористости материала, разноплотности и разнотолщинности облицовок. Отработка технологии проводилась на материале $Cu - Pb$ (90:10 мас.%) и включала в себя подбор типа смесителя, совершенствование прессинструмента и определение рациональных режимов смешения и прессования.

Исследованиями установлено, что более эффективным для достижения равномерного распределения ключевого компонента Pb в шихте является использование лопастного смесителя взамен ранее используемого смесителя барабанного типа. В нем реализуется поступательное и вращательное перемешивание шихты. Экспериментально установлено, что максимальная степень однородности достигается при 30 мин. смешения. Использование лопастного смесителя позволило сократить время смешения с 1 час. до 30 мин. и уменьшить уровень отклонения концентрации Pb от номинала с 1 до 0,06 %.

Экспериментально установлена зависимость величины пористости и разноплотности от скорости прессования и чистоты поверхности прессинструмента. Снижение скорости прессования с 10 до 6 ходов в минуту позволило снизить пористость и разнотолщинность изделий. Качество поверхности прессинструмента повышено путем увеличения твердости рабочих поверхностей штампа до 61...63HRC, что позволило уменьшить шероховатость до $R_a=0,6...0,25$ и получить зеркальную поверхность при последующей полировке. В результате пористость была снижена с 6,4 до 6,0%, а разноплотность с 0,25 до $0,2 \cdot 10^{-5}$ кг/м³. Для обеспечения высокой геометрической точности (снижение разнотолщинности) изготовления облицовок были ужесточены требования к прессовой оснастке по допускаемым отклонениям от параллельности горизонтальных плоскостей матриц, обойм, плит. Они были установлены не более 0,02мм на длине 200мм. Отклонение от перпендикулярности пуансона относительно горизонтальной плоскости допускалось не более 0,02мм. Это позволило снизить разнотолщинность с 0,06 до 0,05...0,03мм.

По предложенной технологии изготавливались материалы тройных систем: $Cu - Pb - C$ и $Cu - Pb - MoS_2$. Выбор компонентов для них основывался на ранее выявленном положительном влиянии отдельных легирующих добавок на свойства материала облицовок. Свинец обеспечивает высокую пробивную

способность, но использование этих возможностей ограничивается его концентрацией Юмас.%. При большом содержании свинца сильно проявляется эффект сегрегации при смешении компонентов и прессовании. Cu и MoS_2 обладают адгезией к металлам, препятствуют агрегатированию металлического порошка и являются эффективными песторезрушителями. Эти добавки вводились в порошок меди так, чтобы аддитивная плотность была не ниже меди. В результате исследований были выбраны составы, обеспечивающие высокую структурную однородность, низкую пористость и разноточность и обладающие максимальной равномерностью распределения компонентов по объему изделия: $Cu - Pb - C$ (87,5:12,0:0,5 мас.%) и $Cu - Pb - MoS_2$ (85:14:1 мас.%). Комплексные исследования этих материалов показали, что они близки по свойствам и превосходят компактные медные облицовки по рабочим характеристикам. Испытания облицовок в различных зарядах по различным преградам показали увеличение пробития для зарядов с порошковыми облицовками, увеличение свободного объема перфорационного канала и отсутствие пестообразования. Полевые испытания выявили увеличение дебита нефти-, газовых скважин, перфорированных зарядами с порошковыми облицовками. Испытания на длительность хранения позволили установить, что срок хранения облицовок состава $Cu - Pb - C$ (87,5:12,0,5 мас.%) составляет 1 год, более дорогих (состав $Cu - Pb - MoS_2$ (85:14:1 мас.%) — 3 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследовано поведение медных порошковых облицовок в условиях детонационного воздействия. Установлено, что кумулятивная струя порошковых облицовок в отличие от компактных представляет собой поток частиц с областями различной плотности. Формирование песта происходит путем уплотнения частиц меди, спекания и динамической рекристаллизации с образованием на его поверхности практически беспористого слоя, толщина которого зависит от пористости материала облицовки. Для устранения беспористого слоя и, следовательно, песта необходимо обеспечить пористость свыше 12,6% и вытянутую форму пор. Последнее достигается использованием порошков меди с номинальным размером частиц 224мкм и дендритной формой. Повышение пористости для устранения пестообразования сопровождается снижением уровня пробития заряда.
2. Для обеспечения высоких характеристик зарядов обоснована перспективность использования холодного прессования медных порош-

ковых композиций с введением песторазрушающих добавок. Установлено, что в условиях детонационного воздействия легирующие добавки образуют газовую (C , MoS_2), жидкую (Pb , B_2O_3) фазы или находятся в твердом состоянии (Wc , TiO_2 , CaF_2).

3. Установлено, что гарантированное песторазрушение имеет место в том случае, когда легирующая добавка обеспечивает достаточную изоляцию частиц меди, предотвращая спекание и обеспечивая их взаимное перемещение и последующее разрушение песта при детонационном воздействии. Наиболее благоприятная микроструктура для разрушения песта формируется при холодном прессовании при введении в состав композиции добавок, являющихся твердыми смазками C , MoS_2 , CaF_2 , и Pb , которые располагаются в виде тонких изолирующих прослоек по границам частиц. Песторазрушение определяется: при легировании C — его окислением и образованием газовой фазы, MoS_2 — частичным окислением и существованием твердой смазки, CaF_2 — существованием твердой смазки, Pb — образованием жидкой прослойки. Наиболее эффективной добавкой, вызывающей песторазрушение при минимальных ее содержаниях (0,5 мас.%) является графит.

4. Установлено, что компоненты B_2O_3 и TiO_2 с плотностью существенно ниже Cu отсутствуют в материале песта. Удаление из материала B_2O_3 , находящегося в жидком состоянии, сопровождается разрыхлением, но не устранением песта. При содержании в композиции TiO_2 от 4,5 мас.% и выше — песторазрушение отсутствует.

5. Определено, что при введении в состав композиции Wc , превосходящего по твердости и плотности матричный материал, последний располагается в виде отдельных включений и способствует уплотнению материала при детонационном воздействии на облицовку с образованием песта.

6. Подтверждено общее теоретическое положение о росте пробивной способности зарядов с увеличением плотности материала облицовки. Для порошковых легированных материалов она определяется влиянием легирующей добавки на уплотняемость порошка при холодном прессовании и ее плотностью. Влияние последней на плотность материала становится преобладающей при введении добавок более 0,5 мас.% за исключением TiO_2 (4,5 мас.%). Соответственно, увеличение концентрации добавок, имеющих плотность ниже матрицы (C , MoS_2 , B_2O_3 , CaF_2 , TiO_2) приводит к снижению пробивной способности, а выше (Pb , Wc) — к увеличению уровня про-

бития.

7. Установлено, что снижение глубины пробития при увеличении концентрации тяжелых компонентов Pb и Wc свыше 10 мас.% обусловлено ростом разнородности облицовок по объему и наличием крупных сегрегаций Pb и Wc , что приводит к потере устойчивости кумулятивной струи.

8. Для реализации возможности использования повышенных концентраций Pb в композиции с целью достижения максимального пробития предложено дополнительное легирование C и MoS_2 , препятствующих сегрегации в процессе смешения порошков и их прессования, снижающих пористость материала и способствующих песторазрушению. Усовершенствована технология изготовления порошковых облицовок, обеспечивающая минимальную разнородность и разностенность облицовок, высокую равномерность распределения компонентов в матрице.

9. Разработаны и предложены для промышленного использования материалы $Cu-Pb-C$ (87,5:12:0,5 мас.%) и $Cu-Pb-MoS_2$ (85:14:1 мас.%). Они превосходят компактные медные облицовки по глубине пробития, объему перфорационного канала и не образует пестов. Их использование позволяет повысить нефте-, газоотдачу скважин на 20...40%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт применения кумулятивных зарядов с порошковыми облицовками на территории Зап.Украины и Башкирии/ Л.И.Державец, Т.Е.Воркина, Б.Б.Шприц, Т.И.Епифанцева// Повышение эффективности геофизических исследований глубоких скважин в нефтегазовых провинциях Украины: Тез. докл. на школе передового опыта.- Киев, 1987.- С. II.

2. Особенности образования кумулятивной струи при применении порошковых облицовок в зарядах для перфорации скважин/ К.И.Козорезов, Л.И. Державец, Т.Е.Воркина, Т.И. Епифанцева//Теоритическая и прикладная механика: Тез. докл. на Всесоюзном съезде-Ташкент.-1986.- С.246.

3. Биков Ю.А., Воркина Т.Е. Разработка материалов для безопасных облицовок кумулятивных зарядов перфораторов// Вестник МГТУ.- 1994.- №1.