

Применение вольфрама для повышения эффективности действия кумулятивных зарядов по разным преградам

© С.В. Ладов, Ю.М. Дильдин, А.И. Колмаков, В.Н. Охитин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы увеличения глубины и диаметра каверны в различных преградах при действии кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками, в качестве которых используют биметаллические (двухслойные) облицовки из меди и вольфрама. В качестве пробиваемых применяют преграды из мягкого железа и стали разной твердости (прочности), а также комбинированные преграды сталь — дюралюминий и вода — сталь, имитирующие различные условия пробивного действия кумулятивных зарядов. Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей, диаграмм и рентгенограмм процесса образования кумулятивной струи из комбинированных облицовок. Приведена сравнительная оценка действия кумулятивных зарядов с кумулятивными облицовками различной конструкции, включая исходную однослойную облицовку из меди, в зависимости от способа формирования слоя вольфрама на внутренней поверхности облицовки и его толщины. Даны рекомендации по использованию кумулятивных зарядов с комбинированными кумулятивными облицовками медь — вольфрам при действии по разным преградам.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная облицовка, кумулятивная струя, медь, вольфрам, преграда, пробивное действие

Введение. В настоящее время как в промышленности военного назначения, так и в некоторых гражданских отраслях все более актуальной становится задача повышения эффективности действия кумулятивных зарядов (КЗ) посредством увеличения глубины пробития и диаметра образующейся в преграде каверны (в случае сквозного пробития — отверстия или пробоины) [1–9]. Одним из методов ее решения является создание биметаллических (двухслойных) кумулятивных облицовок (КО) с большой плотностью металла на внутренней поверхности облицовки, причем глубина пробития и диаметр образующейся каверны (отверстия) при действии КЗ в значительной степени зависят от материалов, из которых изготовлена облицовка, толщины слоев металлов и способов их образования, а также от технологии изготовления подобных облицовок.

Как известно, условия формирования кумулятивной струи (КС) определяются микроструктурой металла облицовки и способностью его структурных составляющих к пластической деформации [6]. Тяжелые пластичные металлы, в частности, с кубической гранцентрированной решеткой группы меди и некоторые сплавы, образуют

сплошные струи, плотность которых не более чем на 10 % ниже плотности материала облицовки. Длина таких струй примерно в 10 раз превышает исходную длину образующей облицовки, притом струи не разрываются и сохраняют высокую плотность, что обеспечивает их значительную пробивную способность. Другие металлы, например железо и цинк, на начальных стадиях формируют сплошные струи, которые, в отличие от описанных выше, при растяжении разрываются значительно раньше, что снижает их пробивное действие. Хрупкие металлы, к примеру вольфрам и титан, а также металлы с высокой пористостью, получаемые спеканием, вообще не образуют сплошных струй, а формируют дискретные потоки, состоящие из отдельных твердых частиц. Пробивное действие таких КС значительно ниже, чем сплошных.

В известных работах Ф.А. Баума 1950-х годов приводились сведения о том, что для увеличения пробивного действия КЗ со стальными и медными КО на внутреннюю поверхность последних электролитическим методом наносили тонкий слой различных металлов: алюминия, кадмия, меди, молибдена, никеля, олова, свинца, серебра, хрома, цинка. Толщина наносимого слоя для различных КЗ составляла от 0,02 до 0,1 мм. Результаты этих работ показали, что нанесение тонкого слоя материала в целом не влияет на процесс схлопывания КО и ее деформирование, а практически зависит только от основного металла. При этом необходимо подбирать металлы, обладающие определенными физико-механическими свойствами, которые влияли бы на процесс формирования КС. По данным экспериментальных исследований Ф.А. Баума, лучшие результаты при подрывах КЗ на бронеплитах (материал преграды — сталь высокой твердости и прочности) были достигнуты при напылении кадмия, что давало прирост по глубине пробития на стальных КО до 25 %, на медных — до 15 %. При этом увеличения диаметра каверны (отверстия) замечено не было.

Другой метод повышения эффективности действия КЗ — переход на двухслойные облицовки, в том числе такие, в которых внутренний слой, меньший по массе и толщине, выполнен из металлов большей плотности, чем наружный слой [1, 3, 6]. Можно подбирать такие металлы и конструкцию КО, которые способствовали бы увеличению не только глубины, но и диаметра образуемой каверны в полубесконечной преграде или пробиваемого отверстия в преграде конечной толщины. Известны многочисленные патенты отечественных и зарубежных авторов, направленные на реализацию подобной идеи [10].

Одна из целей данной работы — показать целесообразность нанесения вольфрама на внутреннюю поверхность медной облицовки. Выбор вольфрама обусловлен прежде всего тем, что этот металл относится к группе тяжелых (его плотность 19,3 г/см³). Однако технически

чистый вольфрам — хрупкий материал, который не образует сплошной струи. Это существенно снижает его пробивное действие по прочным преградам, что стало основной причиной отказа от его использования в чистом виде. Вместе с тем есть данные, что дискретные струи при действии по некоторым преградам образуют отверстия большего объема, чем сплошные, при приемлемой глубине проникания [4, 7, 8].

В случае применения вольфрама в качестве материала КО, как правило, использовали спекаемый в различных пропорциях порошок меди с вольфрамом, причем толщину слоя вольфрама и меди подбирали в определенных соотношениях с учетом того, что слой вольфрама должен быть относительно тонким [10–12]. На рентгенограммах (для одной стадии развития процесса), приведенных для медной струи (рис. 1, *а*), а также для струй из спекаемого порошка меди с вольфрамом в пропорциях $\text{Cu}+10\%\text{W}$ (рис. 1, *б*) и $\text{Cu}+20\%\text{W}$ (рис. 1, *в*), видно, как влияет увеличение процентного содержания вольфрама на общее состояние струи. Согласно данным М.А. Дубовского для конкретного КЗ, глубина пробития L по прочной стальной преграде для этих случаев распределяется следующим образом: $L = 200$ мм (см. рис. 1, *а*); $L = 110\dots 120$ мм (см. рис. 1, *б*); $L = 90\dots 100$ мм (см. рис. 1, *в*). Следовательно, чрезмерное насыщение материала струи вольфрамом приводит к снижению глубины пробития, что объясняется потерей ее сплошности и устойчивости.

Некоторые теоретические аспекты, объясняющие формирование и поведение порошковых КС в свободном полете, можно почерпнуть при изучении многочисленных литературных источников, например [9, 13–15]. Некоторые технологические аспекты изготовления подобных облицовок, в том числе и комбинированных, также изложены во многих работах [16–18].

Основная цель настоящей работы — представить экспериментальные исследования, проведенные с целью оценки возможностей конструирования двухслойных КО с нанесением на основной слой из меди с его внутренней

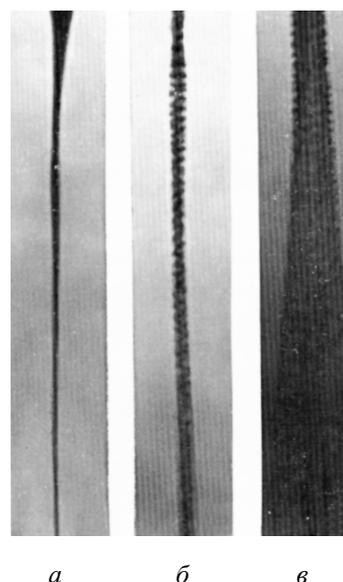


Рис. 1. Рентгенограммы процесса образования кумулятивной струи с облицовками из спекаемого порошка меди — вольфрам (данные М.А. Дубовского):

а — струя из меди; *б* — струя из спекаемого порошка меди с вольфрамом в пропорции $\text{Cu}+10\%\text{W}$; *в* — струя из спекаемого порошка меди с вольфрамом в пропорции $\text{Cu}+20\%\text{W}$

стороны дополнительного слоя из вольфрама определенной толщины, способствующего возможному увеличению пробивного действия КЗ по различным монолитным и комбинированным преградам, имитирующим конкретные условия пробития.

Экспериментальные исследования. В экспериментах использовали различные методы нанесения порошкообразного вольфрама на медные облицовки: осаждение из газовой фазы [19], плазменное напыление [20] и нанесение порошкообразного вольфрама, замешанного на лаке.

В результате химического осаждения получали покрытия любой толщины, даже очень тонкие, с удовлетворительной равномерностью слоя по всей поверхности, однако со слабой прочностью сцепления.

При использовании метода плазменного напыления выход вольфрама составлял 75...85 %, при этом обеспечивались его высокая сплошность (до 80...90 %) и достаточно надежная сцепляемость, позволяющая вести последующую механическую обработку напыленного слоя. Недостатки данного метода состоят в том, что при плазменном напылении нельзя получить достаточно тонкие покрытия из-за выгорания мелких частиц вольфрама в плазменной дуге. Это приводит к тому, что на КЗ небольших диаметров трудно получить тонкие слои вольфрама и, следовательно, КС диспергируется и глубина пробития падает.

Профилограмма изменения толщины нанесенного покрытия по длине образующей КО приведена на рис. 2. Плазменному напылению соответствует линия 1, при анализе которой видно, что основным недостатком данного метода является разностенность комбинированной облицовки по всей поверхности, вызванная неравномерностью слоя вольфрама, что приводит к нарушению стабильности и снижению пробивного действия КЗ. Кроме того, предварительная дробеструйная обработка и возможный нагрев облицовки до высоких температур нарушают ее исходное состояние, что может привести, например, к наклепу поверхности и, следовательно, снижению стабильности и эффективности действия КЗ.

С этих позиций определенным преимуществом обладает способ, разработанный в процессе представленного исследования, — нанесение на поверхность основной облицовки порошкообразного вольфрама, замешанного на лаке определенной концентрации (этому методу соответствуют линии 2 и 3 на рис. 2). Метод отработывался при различных концентрациях раствора и одной исходной температуре основного металла на пластинках. Применяли концентрации 5, 10 и 15 мл порошка вольфрама на 10 мл лака. Температура пластинок изменялась от 20 до 200 °С. Покрытие наносилось окунанием пластин в лак с последующей сушкой на воздухе, устанавливая пластины под углом 60° к горизонтальной поверхности.

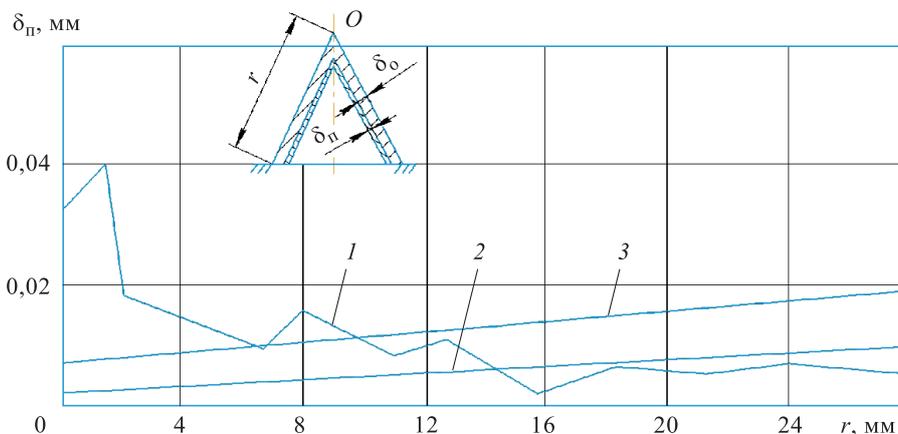


Рис. 2. Профилограммы изменения толщины покрытия вдоль образующей облицовки (наружный диаметр конической КО равен 34 мм, угол раствора конуса — 60°, толщина облицовки из меди — 0,8 мм):

1 — плазменное напыление; 2 — нанесение вольфрама, замешанного на лаке (один слой); 3 — нанесение вольфрама, замешанного на лаке (два слоя)

Эксперименты показали, что при нагреве до температуры выше 100 °С нанесенный слой вольфрама частично отстает от основного металла, а при нагреве до 20 °С слой получается неравномерным по длине облицовки. Лучшие результаты были достигнуты при нагреве образцов до 100 °С и окунании их в раствор лака с порошком вольфрама в соотношении 1:1 по объему (концентрация 10 мл порошка вольфрама и 10 мл лака). На рис. 2 приведены соответствующие профилограммы изменения толщины нанесенного покрытия вдоль образующей КО, полученные в результате использования данного метода с одним слоем (линия 2). В зависимости от соотношения толщин нанесенного покрытия и основного металла можно последовательно наносить несколько слоев порошка (линия 3 соответствует двум слоям).

На данном этапе исследований основным определяющим фактором была возможность получения определенных толщины наносимого слоя вольфрама на медную «подложку» и его качества (равномерности, сплошности). Явного влияния используемых методов нанесения покрытия на данный фактор замечено не было. Полученные результаты не позволяют сделать окончательных выводов о влиянии разных методов нанесения покрытия, а в дальнейшем необходимо проводить более глубокие исследования в этом направлении с учетом различных технологических факторов.

Основные эксперименты были посвящены исследованию пробивного действия КЗ, оснащенных комбинированными облицовками медь — вольфрам соответствующих толщин по различным преградам. В качестве стандартного КЗ для испытаний был выбран известный

заряд кумулятивного перфоратора ЗПКО-73, применяющийся в нефтегазовой промышленности [4, 7, 8]. Конструктивная схема используемого КЗ представлена на рис. 3 (диаметр заряда составлял 36,2 мм, наружный диаметр конической КО — 34 мм, угол раствора конуса КО — 60° ; толщина облицовки из меди — 0,8 мм; в качестве взрывчатого вещества использовался флегматизированный гексоген, масса заряда — 28 г).

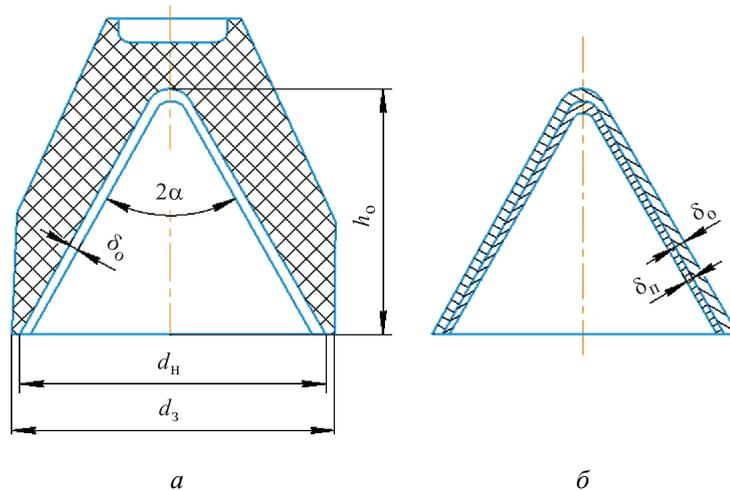


Рис. 3. Конструктивная схема кумулятивного заряда с комбинированной облицовкой:

a — КЗ; b — комбинированная КО медь — вольфрам; d_3 — диаметр КЗ; d_n — наружный диаметр КО; h_o — высота КО; 2α — угол раствора КО; δ_o — толщина основной медной облицовки, δ_n — толщина слоя покрытия из вольфрама

В качестве монолитных преград была использована броневая сталь средней твердости ($HВ = 3,2$ ГПа), сталь марки У8 твердостью $HВ = 2,6$ ГПа и достаточно мягкое АРМКО-железо ($HВ = 0,7$ ГПа, где $HВ$ — твердость по Бринеллю). В качестве комбинированных преград использовано сочетание стали марки Ст3 ($HВ = 1,3$ ГПа) и дюралюминия марки Д1 ($HВ = 0,95$ ГПа), имитирующее схему пробития обсадной колонны в нефтегазовых скважинах, а также воды и стали марки Ст3, имитирующее схему поражения различных подводных объектов. Схемы экспериментов, проводимых с указанными преградами, приведены на рис. 4. Расстояние F от торца используемого КЗ до первой преграды во всех опытах составляло 50 мм.

Результаты экспериментов в виде графических зависимостей приведены на рис. 5. На графиках видно, что максимальные значения относительной глубины пробития достигаются в случае преграды из стали марки У8 (кривая 2) при $\delta_n = 0,015\delta_o$, диапазон разброса значений составлял $(0,0025 \dots 0,025)\delta_o$; из АРМКО-железа (кривая 3) при

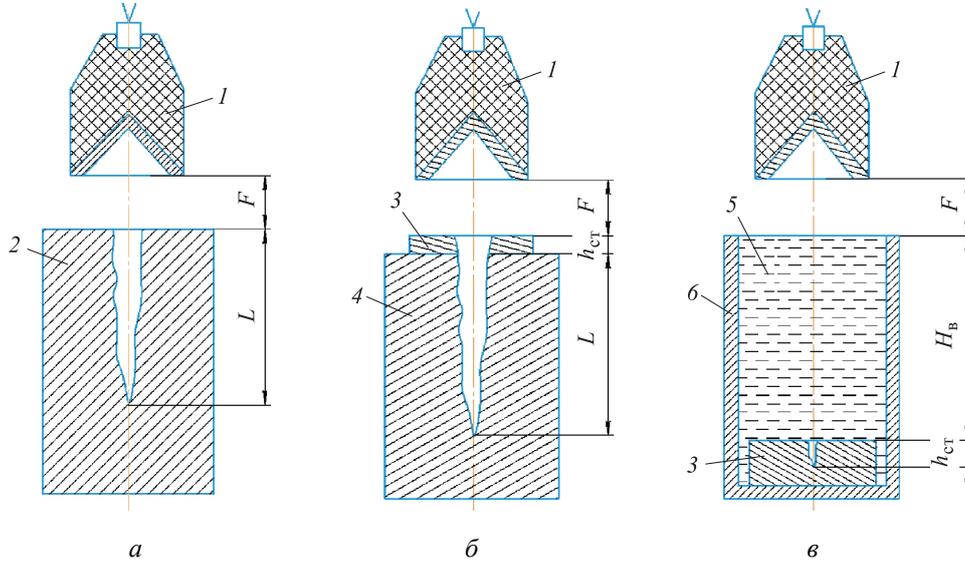


Рис. 4. Схемы экспериментов на различных преградах:

a — монолитная преграда из разных материалов; *б* — комбинированная преграда сталь — дюралюминий; *в* — комбинированная преграда вода — сталь; *1* —кумулятивный заряд; *2* — преграда из броневой стали, стали марки У8, АРМКО-железа; *3* — преграда из стали марки Ст3; *4* — преграда из дюралюминия марки Д1; *5* — вода; *6* — труба или бассейн

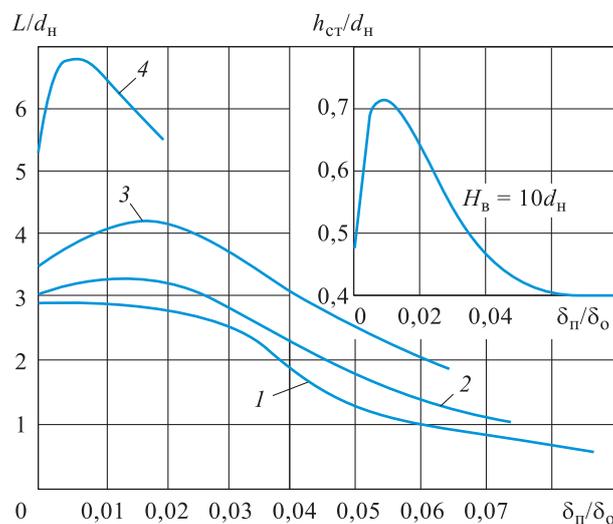


Рис. 5. Графические зависимости, полученные в результате экспериментов:

1 — броневая сталь; *2* — сталь марки У8; *3* — АРМКО-железо; *4* — сталь марки Ст3 и дюралюминий марки Д1

$\delta_n = 0,015\delta_0$ диапазон разброса значений составлял $(0,0025 \dots 0,025)\delta_0$; из стали марки Ст3 и дюралюминия марки Д1 (кривая 4) при $\delta_n = 0,005\delta_0$ диапазон разброса значений составлял $(0,0025 \dots 0,015)\delta_0$;

из воды и стали марки Ст3 (кривая 5) при $\delta_n = 0,01\delta_o$ диапазон разброса значений составлял $(0,005 \dots 0,025)\delta_o$ (δ_n — толщина слоя нанесенного покрытия (вольфрама), δ_o — толщина исходной медной КО, L — глубина пробития преграды, L_m — глубина пробития преград КЗ с медной облицовкой, $h_{ст}$ — толщина стальной преграды в схемах (б) и (в), d_n — наружный диаметр КО (см. рис. 3)). В случае преграды из броневой стали средней твердости нанесение слоя вольфрама любой толщины приводило к снижению глубины пробития (кривая 1 на рис. 5). При этом в первых трех случаях (пробитие монолитных преград) использовались облицовки, где слой вольфрама наносился по методу осаждения из газовой фазы [19], а в случае применения комбинированных преград — частично по методу плазменного напыления [20] и преимущественно по методу нанесения вольфрама, замешанного на лаке.

Диаграмма процента роста глубины пробития КЗ с комбинированными облицовками по сравнению с КЗ с медными облицовками (L — глубина пробития преград КЗ с комбинированными облицовками; L_m — глубина пробития преград КЗ с медной облицовкой) приведена на рис. 6. Максимальные увеличения глубины пробития для преград различных типов в среднем составляли: для монолитной преграды из стали марки У8 — 10 % (б), из АРМКО-железа — 15 % (в), для комбинированной преграды из стали и дюралюминия — 20 % (г), из воды и стали — 25 % (д). В случае использования монолитной преграды из броневой стали средней твердости увеличения глубины пробития не наблюдалось (а). Следует также отметить, что при использовании комбинированных преград из стали и дюралюминия, а также воды и стали наблюдалось увеличение входного диаметра каверны в дюралюминии марки Д1 и стали марки Ст3 в среднем на 25 % и 15 % соответственно. При действии КЗ по преградам остальных типов увеличения диаметра каверны практически не наблюдалось.

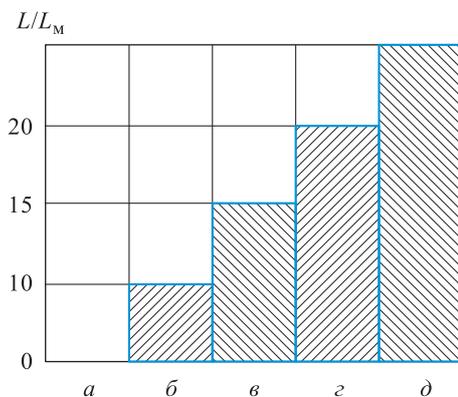


Рис. 6. Диаграммы процента роста глубины пробития:

а — броневая сталь; б — сталь марки У8; в — АРМКО-железо; г — сталь марки Ст3 и дюралюминий марки Д1; д — вода и сталь марки Ст3

Рентгенограммы процесса образования струи, полученной при схлопывании исходной медной облицовки (рис. 7, *а*), облицовки с напыленным слоем вольфрама толщиной $\delta_n = 0,008...0,01$ мм (рис. 7, *б*) и с напыленным слоем вольфрама толщиной $\delta_n = 0,07...0,08$ мм (рис. 7, *в*), приведены для КЗ перфоратора ЗПКО-73 с конкретной технологией изготовления (см. рис. 3). Время регистрации процесса для вариантов, показанных на рис. 7, равно 19,4; 18,8 и 19,2 мкс соответственно. На рис. 7, *б* видно, что струя с повышенной средней плотностью, вызванной небольшим добавлением вольфрама, имеет незначительную асимметрию и потерю сплошности по сравнению со струей из исходной облицовки (см. рис. 7, *а*), чем и объясняется некоторое увеличение глубины пробития, зарегистрированное при действии по относительно малоплотным и малопрочным комбинированным преградам. При этом было зафиксировано некоторое увеличение диаметра струи по сравнению с чисто медной, что и объясняет, по-видимому, определенное увеличение диаметра каверны в некоторых преградах. Вместе с тем на рис. 7, *в* видно, что отсутствие эффекта увеличения глубины каверны при чрезмерной толщине слоя вольфрама объясняется значительным нарушением сплошности струи и потерей устойчивости. Разная степень действия КЗ по различным преградам объясняется, очевидно, физико-механическими свойствами материала преград, прежде всего, прочностными.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать использование двухслойных облицовок медь — вольфрам для увеличения эффективности действия КЗ в случае применения их по малоплотным и малопрочным преградам, например, при использовании кумулятивных перфораторов для вскрытия продуктивных пластов в нефтяных и газовых скважинах или в случае пробития преград через слой воды при поражении подводных объектов. Однако при этом необходимо проводить тщательные исследования для отработки методов нанесения покрытия на основную (исходную) облицовку и поиск оптимальных соотношений толщин покрытия и основной облицовки применительно к каждому конкретному случаю.

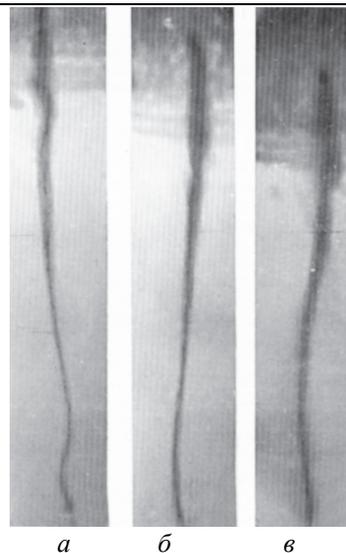


Рис. 7. Рентгенограммы процесса образования кумулятивной струи:

а — медная облицовка; *б* — облицовка с напылением вольфрама толщиной $\delta_o = 0,008...0,01$ мм; *в* — облицовка с напылением вольфрама толщиной $\delta_o = 0,07...0,08$ мм

Заключение. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что наибольший эффект от нанесения покрытия из вольфрама на внутреннюю поверхность медных облицовок КЗ был получен при их действии по комбинированной преграде вода — сталь В этом случае при толщине слоя вольфрама в диапазоне $\delta_n = (0,005 \dots 0,025)\delta_0$, где δ_0 — толщина исходной медной облицовки, наблюдалось увеличение глубины и входного диаметра каверны в стальной преграде на 25 % и 15 % соответственно (при толщине слоя воды $H_B = 10d_n$, где d_n — наружный диаметр КО).

В случае действия КЗ по комбинированной преграде сталь — дюралюминий при толщине слоя вольфрама в диапазоне $\delta_n = (0,0025 \dots 0,015)\delta_0$ наблюдалось увеличение глубины и входного диаметра каверны на 20 % и 25 % соответственно.

При действии КЗ с подобными облицовками по монолитным броневым преградам средней твердости эффекта увеличения глубины и входного диаметра каверны вообще не наблюдалось при любых соотношениях толщин слоев покрытия из вольфрама. Кроме того, во всех случаях проводилось сравнение с действием КЗ с основной (исходной) медной конической облицовкой толщиной 0,8 мм (см. рис. 3, а). При этом большое значение имеет качество образуемого покрытия в комбинированной КО (см. рис. 3, б) с точки зрения как равномерности его нанесения на внутреннюю поверхность основной облицовки (подложки), так и его сцепляемости с подложкой при контроле (регулировании) толщины получаемого слоя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ладов С.В. *Кумулятивное действие боеприпасов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 160 с.
- [2] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. [и др.]. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. В.В. Селиванов, ред. 3-е изд., испр. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 506 с.
- [3] Курепин А.Е., Кузнецов И.А. *Основы проектирование боевых частей управляемых ракет*. И.О. Артамонова, ред. Дзержинск, АО «ГосНИИмаш», 2018, 368 с.
- [4] Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. *Взрывные технологии*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 519 с.
- [5] Минин И.В., Минин О.В. *Кумулятивные заряды*: монография. Новосибирск, СГГА, 2013, 200 с.
- [6] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. [и др.]. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Л.П. Орленко, ред. 3-е изд., испр. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2004, 656 с.
- [7] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.
- [8] Григорян Н.Г., ред. *Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам в скважинах*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Недра, 1990, 183 с.

- [9] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of shaped charge*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 398 p.
- [10] Аттетков А.В., Гнускин А.М., Пырьев В.А., Сагидуллин Г.Г. *Резка металлов взрывом*. Москва, СИП РИА, 2000, 260 с.
- [11] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Порошковые композиционные материалы для беспестовых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1999, № 6, с. 27–29.
- [12] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Об одном возможном способе повышения пробития кумулятивного заряда. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2004, № 3 (40), с. 27–32.
- [13] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Некоторые особенности формирования кумулятивных струй из порошковых материалов. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2006, № 2 (47), с. 105–109.
- [14] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Особенности поведения в свободном полете кумулятивных струй из комбинированных порошковых облицовок. *Оборонная техника*, 2007, № 3–4, с. 38–53.
- [15] Тришин Ю.А. *Физика кумулятивных процессов*: монография. Новосибирск, Издательство ИГ им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2005, 324 с.
- [16] Колмаков А.И., Ладов С.В., Силаева В.И. Влияние технологии изготовления, структуры и механических свойств облицовок на эффективность работы перфораторов. *Труды МВТУ. № 340 «Вопросы физики взрыва и удара»*. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980, с. 27–35.
- [17] Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В. [и др.]. Влияние ширины диффузионной зоны в многослойных облицовках профилированных зарядов на кумулятивный эффект. *Физика горения и взрыва*, 1980, т. 16, № 6, с. 65–69.
- [18] Бабуриин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.М. [и др.]. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [19] Пауэлл К., Оксли Дж., Блочер Дж. *Осаждение из газовой фазы*. Пер. с англ. Москва, Атомиздат, 1970.
- [20] Пузряков А.Ф. *Теоретические основы технологии плазменного комплекса*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 360 с.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ладов С.В., Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Охитин В.Н. Применение вольфрама для повышения эффективности действия кумулятивных зарядов по разным преградам. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2175>

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, член-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Дильдин Юрий Михайлович — канд. техн. наук, член-корр. РАЕН, автор более 80 научных работ в области физики взрыва. e-mail: kafsm4@bmstu.ru

Колмаков Александр Иванович — канд. техн. наук, член-корр. РАЕН, автор более 100 научных работ в области физики взрыва. e-mail: kafsm4@bmstu.ru

Охитин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, академик РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: okhitin@bmstu.ru

Using tungsten to improve the efficiency of shaped charges against various obstacles

© S.V. Ladov, Yu.M. Dildin, A.I. Kolmakov, V.N. Okhitin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper deals with the issues of increasing the depth and diameter of the cavity in various obstacles under the action of shaped charges covered with copper and tungsten as bimetallic, two-layer combined linings. Barriers made of soft iron and steel of different hardness and strength, as well as combined steel - duralumin and water - steel barriers, simulating various conditions for the penetrating action of shaped charges, are used as breakable barriers. The work is experimental in nature. The results of experimental studies are presented in the form of graphical dependencies, diagrams and X-ray patterns of the formation of a cumulative jet from combined linings. The study comparatively evaluates the action of shaped charges with shaped-charge linings of various designs, including the original single-layer copper lining. The evaluation depends on the method of forming a tungsten layer on the inner surface of the lining and its thickness. The study gives recommendations on the use of shaped charges with combined copper-tungsten shaped linings when acting against various obstacles.

Keywords: shaped charge, shaped charge lining, shaped charge jet, copper, tungsten, barrier, penetrating action

REFERENCES

- [1] Ladov S.V. *Kumulyativnoe deystvie boepripasov* [Cumulative effect of ammunition]. Moscow, BMSTU Publ., 2021, 160 p.
- [2] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., et al. *Boepripasy* [Ammunition]. In 2 vols., vol. 1. V.V. Selivanov, ed. 3rd ed., rev. Moscow, BMSTU Publ., 2019, 506 p.
- [3] Kurepin A.E., Kuznetsov I.A. *Osnovy proektirovaniya boevykh chastey upravlyaemykh raket* [Fundamentals of designing warheads of guided missiles]. I.O. Artamonova, ed. Dzerzhinsk, JSC GosNII Mash Publ., 2018, 368 p.
- [4] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies]. 2nd ed. rev., enlarg. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 519 p.
- [5] Minin I.V., Minin O.V. *Kumulyativnye zaryady: monografiya* [Shaped charges: monograph]. Novosibirsk, SSGUT Publ., 2013, 200 p.
- [6] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. et al. *Fizika vzryva* [Explosion physics]. In 2 vols., vol. 2. L.P. Orlenko, ed. 3rd ed. rev. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [7] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 47 p.
- [8] Grigoryan N.G., ed. *Kratkiy spravochnik po prostrelochno-vzryvnykh rabotam v skvazhinakh* [A brief guide to perforating and blasting in wells]. 3rd ed., rev., enlarg. Moscow, Nedra Publ., 1990, 183 p.
- [9] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of shaped charge*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 398 p.
- [10] Attetkov A.V., Gnuskin A.M., Pyrev V.A., Sagidullin G.G. *Rezka metallov vzryvom* [Explosion cutting of metals]. Moscow, SIP RIA Publ., 2000, 260 p.
- [11] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* — *Metal Science and Heat Treatment*, 1999, no. 6, pp. 27–29.

- [12] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2004, no. 3 (40), pp. 27–32.
- [13] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2006, no. 2 (47), pp. 105–109.
- [14] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 2007, no. 3–4, pp. 38–53.
- [15] Trishin Yu.A. *Fizika kumulyativnykh protsessov: monografiya* [Physics of cumulative processes: monograph]. Novosibirsk, M.A. Lavrentev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the RAS Publ., 2005, 324 p.
- [16] Kolmakov A.I., Ladov S.V., Silaeva V.I. Vliyanie tekhnologii izgotovleniya, struktury i mekhanicheskikh svoystv oblitsovok na effektivnost raboty perforatorov [Influence of manufacturing technology, structure and mechanical properties of linings on the efficiency of perforators]. *Trudy MVTU. No. 340 «Voprosy fiziki vzryva i udara»* [BMHTS Proceedings, no. 340 “Problems of physics of explosion and impact”]. Moscow, BMHTS Publ., 1980, pp. 27–35.
- [17] Dildin Yu.M., Kolmakov A.I., Ladov S.V., et al. *Fizika goreniya i vzryva - Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1980, vol. 16, no. 6, pp. 65–69.
- [18] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.M., et al. *Tekhnologiya metallov - Russian metallurgy (Metally)*, 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [19] Powell C., Oxley J., Blocher J. *Vapor Deposition*. John Wiley & Sons Inc., 1st ed., 1966, 725 p. [In Russ.: Powell C., Oxley J., Blocher J. *Osazhdenie iz gazovoy fazy*. Moscow, Atomizdat Publ., 1970.].
- [20] Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo kompleksa: uchebnoe posobie* [Theoretical foundations of plasma complex technology: a study guide]. Moscow, BMSTU Publ., 2003, 360 p.

Ladov S.V., Cand.Sc. (Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University, author of more than 350 research papers in the field of explosion physics. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Dildin Yu.M., Cand.Sc. (Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, retired, author of more than 80 research papers in the field of explosion physics. e-mail: kafsm4@bmstu.ru

Kolmakov A.I., Cand.Sc. (Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, retired, author of more than 100 research papers in the field of explosion physics. e-mail: kafsm4@bmstu.ru

Okhitin V.N., Dr. Sc. (Eng.), academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University, author of more than 350 research papers in the field of explosion physics. e-mail: okhitin@bmstu.ru