

На правах рукописи

Петров Евгений Владимирович

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТАЛИ ПОТОКА ТУГОПЛАВКИХ ЧАСТИЦ,
РАЗОГНАННЫХ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА**

Специальность 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Черноголовка – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук «Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН» и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарском государственном техническом университете».

Научный руководитель	Доктор технических наук, доцент Кривченко Александр Львович
Официальные оппоненты	Доктор физико-математических наук, профессор Разорёнов Сергей Владимирович Кандидат технических наук, доцент Маёров Георгий Романович
Ведущая организация	Учреждение Российской академии наук Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится « 2 » февраля 2011 г. в 10.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 002.092.01 при Учреждении Российской академии наук Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН по адресу: 142432, г. Черноголовка, Московской области, ул. Институтская, д.8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН.

Автореферат разослан « » декабря 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.092.01
к.ф.-м.н.

И.С. Гордополова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Среди различных способов упрочнения материалов особое место занимают динамические методы, связанные с использованием энергии взрыва. Упрочнение стальных изделий с использованием энергии взрыва получило большое распространение. В настоящее время в литературе накоплена обширная теоретическая и экспериментальная информация по структуре и свойствам металлов и сплавов после ударно-волнового воздействия. Такое воздействие генерируется взрывом газовых смесей или конденсированных взрывчатых веществ. В последнем случае для получения эффекта упрочнения необходимо воздействие на металлы достаточно сильных ударных волн. Ударные волны в упрочняемом материале создаются контактным взрывом заряда взрывчатого вещества или ударом пластины, разогнанной энергией взрывчатого вещества.

В последнее время находит распространение метод объемного упрочнения металлов при реализации эффекта сверхглубокого проникания дискретных частиц. Этот эффект был открыт в 70-х годах 20 века при исследовании взаимодействия с металлической преградой потока дискретных частиц (8 – 100 мкм), разогнанных энергией взрыва до скорости 1000 – 3000 м/с. Оказалось, что материал данных частиц может проникать в преграду на глубину до 1000 своих исходных размеров и воздействовать на структуру материала преграды. Это явление трудно объяснимо с позиции гидродинамической теории, согласно которой, глубина проникания в преграду каждой такой частицы не может превышать 2-х – 4-х ее диаметров. Существует несколько гипотез о физической природе явления сверхглубокого проникания. Однако до настоящего времени не сложилось единой точки зрения на механизм данного процесса. Литературные данные по этому вопросу носят противоречивый характер. Несмотря на то, что природа сверхглубокого проникания не установлена, это явление уже сейчас можно использовать в технологических процессах, в частности, для объемного упрочнения металлов.

Экспериментально установлено, что при воздействии высокоскоростного потока частиц с поверхностью преграды под прямым углом соударения количество частиц, проникших в преграду, монотонно зависит от их концентрации и скорости данного потока. Аналогичные исследования при других углах соударения потока высокоскоростных частиц с поверхностью преграды до настоящего времени не проводились. Использование других углов соударения потока частиц с поверхностью преграды приводит к увеличению площади воздействия частиц на обрабатываемую поверхность, что очень важно для технологического использования воздействия потока частиц, разогнанных энергией взрыва, для упрочняющей обработки стальных изделий, в частности, метания частиц порошка с боковой поверхности, что и обуславливает актуальность настоящей диссертационной работы.

Цель работы.

Целью работы является установление закономерностей воздействия потока тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва, в режиме сверхглубокого

проникания на стальные преграды при различных углах соударения потока частиц с поверхностью обработки.

Задачи исследования.

1. Разработка методики обработки стальных преград потоком высокоскоростных частиц с различными углами соударения потока тугоплавких частиц.
2. Экспериментальное исследование влияния угла соударения потока тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва, на распределение микротвердости по глубине и диаметру образцов.
3. Экспериментальное исследование влияния материала частиц, на распределение микротвердости по глубине и диаметру образцов, обработанных потоками частиц с различными углами соударения с поверхностью образца.
4. Исследование особенностей микроструктуры стали, обработанной потоком высокоскоростных тугоплавких частиц, при различных углах соударения тугоплавких частиц с поверхностью обработки.
5. Определение давления и температуры взаимодействия потока частиц при соударении с поверхностью преграды.

Объекты исследования.

Конструкционная углеродистая сталь – Ст. 3, инструментальная углеродистая сталь – сталь У8. Образцы представляли собой: цилиндры $h = 60$ мм и $\varnothing = 24$ мм для Ст.3; $h = 40$ мм и $\varnothing = 24$ мм для стали У8; пластины 150×200 мм и толщиной 10 мм. Микророшки нитрида титана и вольфрама.

Научная новизна работы.

- Разработана методика взрывной обработки стальных преград потоком тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва, при различных углах соударения потока частиц с поверхностью обработки.
- Впервые экспериментально изучено распределение микротвердости по глубине и диаметру образцов, после обработки потоком тугоплавких частиц порошков при различных углах соударения потока частиц с поверхностью образцов.
- Установлено, что с изменением угла соударения потока частиц, разогнанных энергией взрыва, с поверхностью обработки меняется характер распределения микротвердости по глубине и диаметру преграды, причем распределение значений твердости зависит и от материала частиц порошков.
- При исследовании микроструктуры стальной преграды, показано измельчение структуры перлита с переходом от пластинчатого перлита в приповерхностном слое преграды к крупнопластинчатому перлиту в объеме преграды при различных углах соударения.
- Определены давления взаимодействия потока частиц с материалом преграды и температуры разогрева частиц продуктами детонации и при соударении частиц с поверхностью преграды, которые показали, что не достигается температура плавления и частицы соударяются с преградой в нерасплавленном состоянии.

Практическая значимость работы.

Разработана методика обработки материалов воздействием потока тугоплавких частиц на стальные преграды с направляющим каналом и без него с различными углами соударения потока частиц с поверхностью преграды, которые позволяют обрабатывать поверхность преград потоком частиц, разогнанных

энергией взрыва. Показано, что наиболее качественное упрочнение достигается при угле соударения 45° .

Методика использована в учебном процессе по дисциплинам: «Техника и безопасность взрывных работ» на кафедре «Общая физика и физика нефтегазового производства» нефтетехнологического факультета; «Средства взрывания и взрывные технологии» на кафедре «Защита в чрезвычайных ситуациях» и «Техника и технология взрывных работ» на кафедре «Технология твердых химических веществ» инженерно-технологического факультета СамГТУ.

Результаты, полученные в работе, направлены на использование воздействия потока тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва, для обработки стали, которые позволяют разработать высокоэффективные технологии упрочнения стальных изделий.

Научные положения и результаты исследования, выносимые на защиту:

- Результаты распределения значений микротвердости по глубине и диаметру образцов, после обработки потоком тугоплавких частиц порошков, разогнанных энергией взрыва, с различными углами соударения потока частиц с поверхностью образца.
- Результаты изменения микроструктуры образцов, после обработки потоком тугоплавких частиц порошков, разогнанных энергией взрыва, при различных углах соударения потока частиц с поверхностью обработки.
- Методика обработки стальных преград с использованием направляющего канала и без него, при различных углах соударения потока частиц с поверхностью обработки, которые позволяют воздействовать на поверхность образцов потоком тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва.
- Результаты расчетов давления и температур нагрева частиц при соударении с поверхностью преграды.

Достоверность научных результатов работы.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием следующих современных аттестованных методов и методик: растровой электронной микроскопии, рентгеновского спектрального микроанализа, рентгенофазового анализа, методики измерения твердости и др. Исследования проводились с использованием следующего оборудования: растровый электронный микроскоп LEO-1450 в комбинации с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy, металлографический микроскоп Axiovert 200 MAT, микротвердомер ПМТ-3, рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М и др.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях: 4-й – 7-й Всероссийских школах-семинарах по структурной макрокинетике для молодых ученых (2006-2009), г. Черноголовка; 8 Международном симпозиуме «Использование энергии взрыва для получения материалов с новыми свойствами» (2006), г. Москва; Международной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения НПМ-2007» (2007), г. Волгоград; 9 Международном симпозиуме «Использование энергии взрыва для получения материалов с новыми свойствами: наука, технология, бизнес, инновации» (2008), г. Лисс, Нидерланды; 47 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (2008), г. Н.Новгород; 14

Симпозиуме по горению и взрыву (2008), г. Черноголовка; Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (2008), г. Санкт-Петербург; IX Харитоновских тематических научных чтений – Международная конференция «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (2009), г. Саров; 17 Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (2009), г. Самара; 3 Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (2009), г. Москва; 19 Петербургские чтения по проблемам прочности (2010), г. Санкт-Петербург; Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010» (2010), г. Одесса, Украина; 10 Международном симпозиуме «Использование энергии взрыва для получения материалов с новыми свойствами: наука, технология, бизнес, инновации» (2010), г. Бечичи, Черногория.

Публикации.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 24 работах, из них 6 статей, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Личный вклад автора.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в данной работе, получены автором самостоятельно. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении идей, экспериментов, обработке полученных результатов, написании статей, докладов, формулировке выводов.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографического списка и приложения. Общий объем работы составляет 144 страницы, включая 44 рисунка, 17 таблиц, библиографического списка, включающего 113 наименований и приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации и достоверности научных результатов работы.

В первой главе анализируется современное состояние проблемы. Представлен анализ высокодинамичных процессов, происходящих при воздействии на материалы ударных волн и потоков высокоскоростных частиц. Рассмотрено образование дефектов в материале преграды при деформации ударной волной и взрывное упрочнение, сопровождающее воздействие ударных волн на материал преграды. Рассмотрены представления об эффекте сверхглубокого проникания потока частиц, разогнанных энергией взрыва, в том числе гипотетические модели, которые с той или иной позиции объясняют физическую картину явления.

Во второй главе описывается оборудование, объекты, методы и методики исследований, проводится обоснование выбора способа высокоскоростного нагружения металлов и определение параметров взрывчатых веществ, применяемых при проведении экспериментов.

В экспериментах применялся взрывной ускоритель с воздушной полостью (рис. 1), который состоял из кольца 4, которое выполняло функцию фиксирующего устройства, с частицами порошка 5. Сверху кольца устанавливался заряд взрывчатого вещества 2 с электродетонатором 1. Заряды взрывчатого вещества

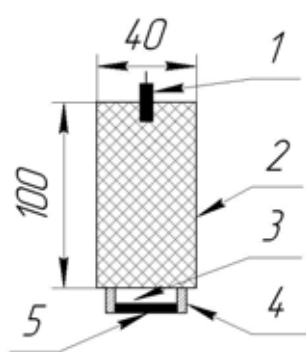


Рис. 1. Схема взрывного ускорителя с воздушной полостью

имели цилиндрическую форму диаметром 40 мм и высотой 100 мм, что отвечает условию реализации стационарной детонационной волны. Как известно при отношении $l/d \geq 2.5$ параметры детонационной волны, время и ширина зоны химической реакции на фронте, не зависят от длины заряда. Между зарядом взрывчатого вещества и частицами порошка имелась воздушная полость 3. Наличие воздушной полости в кольце позволяло снизить пиковое давление, действующее на частицы порошка, и помимо плоского фронта обеспечивало увеличение времени нагружения частиц порошка, в течение которого ему сообщался необходимый ударный импульс прямоугольного профиля. Следовательно, в отличие от широко используемой схемы кумулятивного взрывного ускорителя, ускоритель с

воздушной полостью генерирует только ту часть течения, которую в случае кумулятивного ускорителя выделяют как высокоскоростную струю. Это позволяет уменьшить навески порошка в ускорителе с воздушной полостью в 15 раз и больше в зависимости от используемого порошка.

Разработана методика обработки стальных преград потоком частиц, разогнанных энергией взрыва. Используются установки с направляющим каналом – для обработки локальных участков и без направляющего канала – для обработки значительных поверхностей с применением различных углов соударениями потока частиц с поверхностью образцов (60° и 45°), что имеет место при боковом метании частиц порошка, представляющем интерес для технологического использования.

Объектами исследований являлись: конструкционная углеродистая сталь – Ст. 3 и инструментальная углеродистая сталь – У8, которые обрабатывались частицами тугоплавких порошков нитрида титана и вольфрама. На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки с направляющим каналом для обработки преград потоком частиц: исследуемый образец 7 помещался в направляющий канал 4. Сверху канала устанавливалось кольцо 5 с частицами

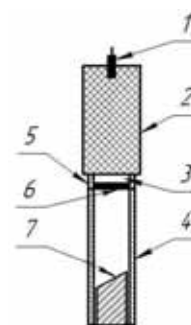


Рис.2. Схема экспериментальной установки с направляющим каналом

порошка 6. Далее располагался заряд взрывчатого вещества 2 с электродетонатором 1. Ударная волна, генерируемая зарядом взрывчатого вещества, и поток продуктов детонации проходили через порошок, разгоняли его, и воздействовали на исследуемый образец. Применение данной установки позволило значительно повысить эффективность использования рабочего порошка за счет наличия канала и дало возможность обработки локальных зон, размер которых определялся диаметром канала, по которому разгонялся порошок. Это имеет важное значение для практического применения явления сверхглубокого проникания частиц при обработке материалов. Данная установка с направляющим каналом отличается от установки с направляющим каналом, применяемой в других работах тем, что имеет низкую металлоемкость, простоту в изготовлении и сборке.

Была разработана схема без направляющего канала (рис. 3), которая позволила исследовать воздействие тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва на преграды для упрочнения сварного шва 5. Схема установки без канала отличается от схемы установки с направляющим каналом тем, что на образец – пластину 6 с помощью опалубки 4 устанавливалось кольцо 3 с частицами порошка 7, сверху

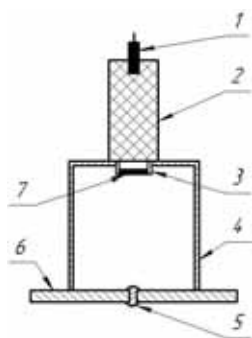


Рис.3. Схема экспериментальной установки без направляющего канала

которого располагался заряд взрывчатого вещества 2 с электродетонатором 1.

Для разделения эффектов, связанных с взаимодействием ударной волны с образцом и взаимодействием потока частиц с образцом, были проведены следующие опыты: обработка образцов только ударной волной; обработка образцов потоком частиц порошков нитрида титана и вольфрама. Порошок нитрида титана размером частиц 45 – 57 мкм (74%) использовался как основной технологический материал, применяемый в практических целях. Порошок вольфрама с размером частиц 13 – 16 мкм (55%) использовался как модельный материал, который раньше применяли преимущественно в опытах по сверхглубокому прониканию. В качестве

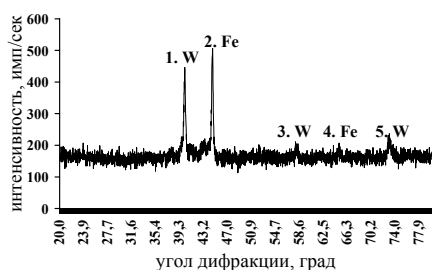
зарядов взрывчатых веществ использовались: насыпной гексоген ($D \sim 5920$ м/с, $\rho = 1000$ кг/м³, $P = 9,5$ ГПа), прессованный тротил ($D \sim 6910$ м/с, $\rho = 1590$ кг/м³, $P = 18$ ГПа) и патронированный аммонит 6ЖВ ($D \sim 4400$ м/с, $\rho = 1100$ кг/м³, $P = 5,5$ ГПа). Применение тротила приводило к появлению на поверхности образцов глубоких кратеров от метаемых частиц, что не позволяло исследовать приповерхностный слой таких образцов. При обработке образцов аммонитом 6ЖВ даже одной серии не получали повторяемости результата. При использовании гексогена, который обладает стабильными параметрами детонации, не повреждалась поверхность образцов, и во всех образцах наблюдался материал частиц в преграде. Таким образом, при проведении экспериментов в качестве взрывчатого вещества использовался гексоген.

После взрывной обработки, образцы разрезались по оси направления удара вдоль и поперек, и изготовлялись шлифы. Изучение физико-механических свойств полученных шлифов проводилось при помощи стандартных,

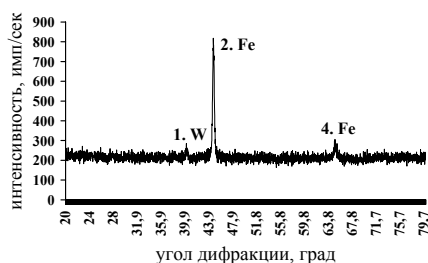
аттестованных методов и методик: металлографического и рентгенофазового анализов, рентгеноспектрального микроанализа, растровой электронной микроскопии, методики гидростатического взвешивания, методики измерения твердости и др.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по исследованию шлифов, изготовленных из образцов, которые подвергались обработке потоком тугоплавких частиц порошков нитрида титана и вольфрама, разогнанных энергией взрыва и обработанных только ударной волной при прочих равных условиях.

С помощью рентгенофазового анализа, показано, что на поверхности образца (рис. 4, а) присутствует железо *Fe* – пик 2 и пик 4, и материал порошка *W* – пик 1, пик 3 и пик 5. С удалением от контактной поверхности, на глубине 200 мкм интенсивность пиков, отвечающих за материал частиц, уменьшается пик 1, а пик 3 и пик 5 не наблюдаются (рис. 4, б). Данные, полученные на дифрактометре ДРОН-3М, для образцов стали У8, обработанных частицами *W*, представлены в таблице 1.



а) 0 мкм (поверхность образца)



б) 200 мкм

Рис. 4. Рентгенограммы образцов из стали У8 с углом соударения 90^0 , обработанных частицами вольфрама

Таблица 1.

Результаты рентгенофазового анализа образцов стали У8, обработанных частицами вольфрама

№ Пика	1 (0)	2 (0)	3 (0)	1 (200)	2 (200)
Угол	40,128	44,586	58,040	40,120	44,598
Площадь	57,74	57,65	8,21	6,95	111,33
Интенс.	308	390	71	92	704
% Макс.	76,49	100,00	14,43	10,07	100,00

На глубине 400 мкм пики, отвечающие за материал частиц, полностью исчезают. Это связано с малой концентрацией вводимого с помощью данного метода материала порошка на данной глубине.

Поэтому на данной глубине и больше шлифы образцов исследовались на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450, с помощью которого было обнаружено присутствие материала частиц в стали У8, на глубинах до тысячи исходных диаметров частиц, причем частицы в материале преграды наблюдались при использовании схем обработки, с различными углами соударения потока

частиц с поверхностью образца. Остановившиеся частицы, как правило, располагались в несхлопнувшей полости, однако наблюдались и конгломераты частиц.

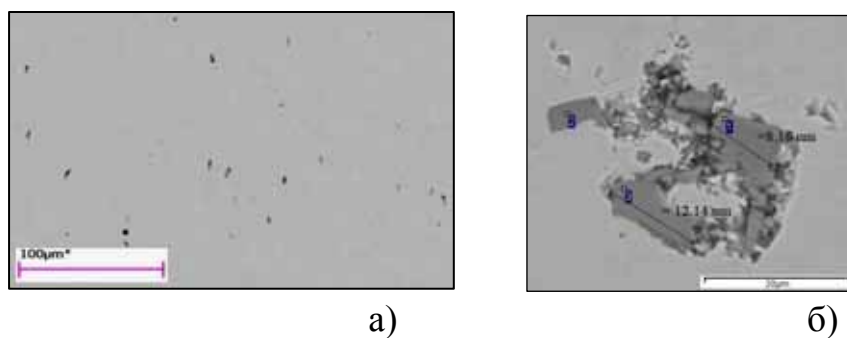


Рис. 5. Микрофотографии а) следы от проникших частиц TiN на поперечном шлифе, б) частиц TiN в материале преграды

Таблица 2.

Рентгеноспектральный микроанализ области с частицами нитрида титана в точках 1,2,3 (atomic%)

Spectrum	1	2	3
C	9,56	12,30	11,48
Ti	51,81	40,23	37,67
N	45,69	45,18	43,60
Fe	2,50	2,29	7,26

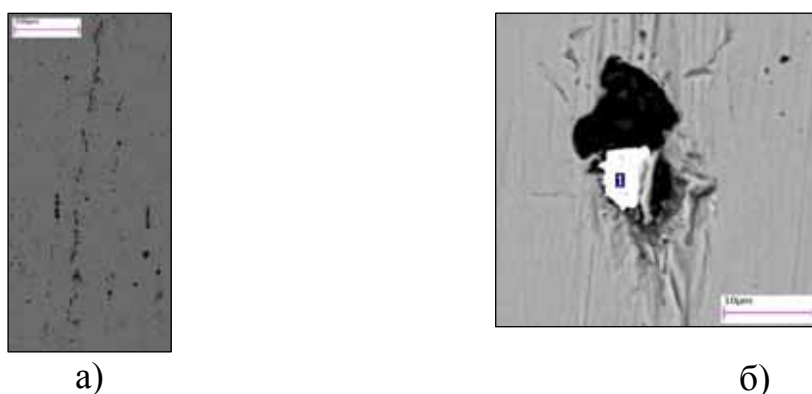


Рис. 6. Микрофотографии а) следы от проникших частиц W на продольном шлифе, б) частицы W в материале преграды

Таблица 3.

Рентгеноспектральный микроанализ области с частицей вольфрама

Element	App. Conc.	Weight %	Atomic %
C	3,99	8,54	45,77
Fe	27,19	25,92	29,90
W	52,55	65,82	20,57

На рисунке 5 представлены микрофотографии следов от проникших частиц нитрида титана на поперечном шлифе и конгломерат частиц нитрида титана, обнаруженного на глубине ~ 2 мм, идентификация проводилась с помощью рентгеноспектрального микроанализа, данные которого представлены в таблице 2.

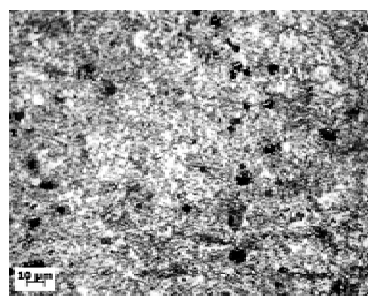
На рисунке 6 представлены микрофотографии следов от проникших частиц вольфрама на продольном шлифе и остановившаяся частица вольфрама в несхлопнувшей полости, обнаруженной на глубине ~ 3 мм, данные рентгеноспектрального микроанализа по идентификации материала частицы, представлены в таблице 3.

Диаметры зарегистрированных проникших частиц составляли $\sim 5 - 12$ мкм, а в исходном порошке диаметр частиц был от 10 до 57 мкм. Таким образом, средний диаметр проникших частиц меньше исходного диаметра частиц порошка в несколько раз, изменение диаметра частиц связано с их дроблением при соударении с поверхностью преграды.

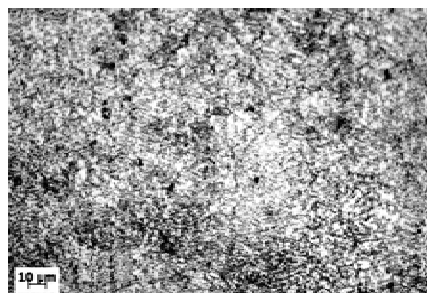
Данные частицы находились на глубине $\sim 2 - 4$ мм от поверхности обработки, но частицы находятся и на большей глубине. Для образца из стали У8 с углом соударения 60° , обработанного потоком частиц нитрида титана наблюдались частицы на расстоянии 18 мм от поверхности обработки. При среднем диаметре частиц нитрида титана ~ 50 мкм, глубина проникания превышает исходный размер частиц в 360 раз. В образце из стали У8, обработанном потоком частиц вольфрама с углом соударения 90° , наблюдались частицы на расстоянии 13 мм от поверхности обработки. При среднем диаметре частиц вольфрама ~ 13 мкм глубина проникания превышает исходный размер частиц в 930 раз.

Металлографический анализ показал, что проникание частиц примеси в материал преграды сопровождается измельчением структуры перлита в объеме преграды до глубины около 15 мм от поверхности обработки. Микроструктура образцов, обработанных только ударной волной и потоком частиц, на данной глубине очень похожа на микроструктуру исходного образца Сталь У8.

Микроструктура стали оценивалась с использованием шкалы оценки микроструктуры (перлита) инструментальной нелегированной стали ГОСТ 1435-99. Микроструктура стали на глубине 2 мм (рис. 7, а) по шкале оценки микроструктуры (перлита) состоит из крупнопластинчатого перлита до 10 % по площади.



а) Глубина
2 мм



б) Глубина
15 мм

Рис. 7. Микроструктура образцов из стали У8 с углом соударения 45°

Такое малое количество крупнопластинчатого перлита в поверхностном слое объясняется деформированием цементитных пластин под действием ударной волны с давлением свыше 13 ГПа, материала проникающих частиц и возникновения дефектов решетки. По шкале оценки микроструктуры (перлита) микроструктура стали этих же образцов, но на глубине 15 мм (рис. 7, б) состоит из крупнопластинчатого перлита от 10 % до 50 %. Анализируя рисунок 10, б следует отметить, что на глубине 15 мм от поверхности обработки имеются следы, которые свидетельствуют о присутствии на этой глубине частиц порошков.

Рассматривалось влияние расстояния между зарядом взрывчатого вещества и обрабатываемой поверхностью на значения микротвердости преграды, измеренной по Виккерсу на микротвердомере ПМТ-3. Расстояния от заряда взрывчатого вещества до поверхности образцов равны 40, 80 и 100 мм, образцы из стали Ст.3 обрабатывались частицами TiN (рис. 8).

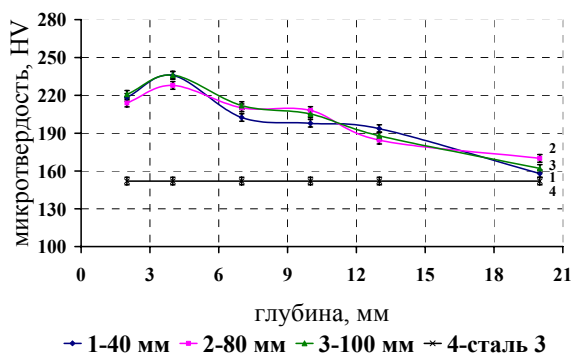
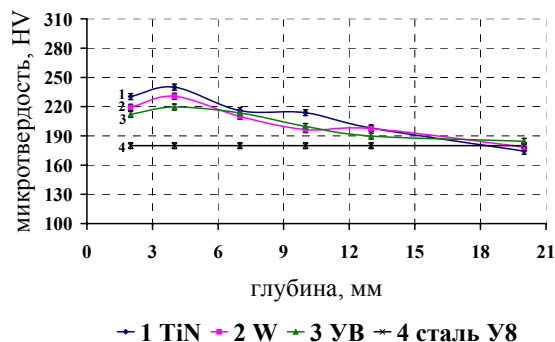
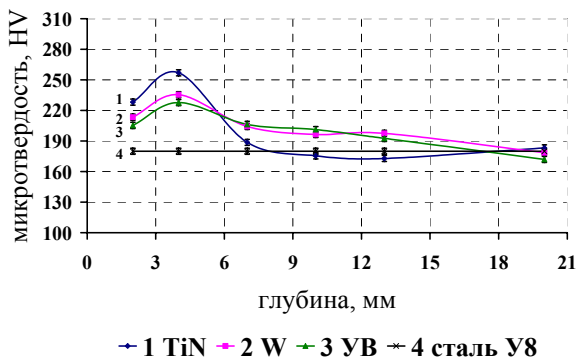


Рис. 8. Распределение микротвердости по глубине образцов Ст.3, обработанных порошком нитрида титана (с углом соударения 90^0).

На глубине 2 мм значения микротвердости меньше значений микротвердости на глубине 4 мм, и средняя разница составляет 16 единиц твердости. На глубине 4 мм среднее значение микротвердости для всех образцов равно 233 единицы твердости и с увеличением глубины наблюдается единое волнообразное уменьшение микротвердости до 152 единиц твердости, которое имеет исходный образец Ст.3. Таким образом, расстояние между зарядом взрывчатого вещества и обрабатываемой поверхностью в исследуемом диапазоне не влияет на распределение микротвердости в образцах.

Экспериментально показано, что с изменением угла соударения потока частиц, разогнанных энергией взрыва, с поверхностью преграды меняется характер распределения микротвердости по диаметру преграды. На рисунке 9 представлено распределение значений микротвердости по глубине при углах соударения 60^0 и 45^0 . На глубине 4 мм наблюдаются максимальные значения микротвердости у всех обработанных образцов. У образцов, обработанных частицами TiN (рис. 9, кривая 1) при угле соударения 60^0 значения микротвердости больше по сравнению с исходной в 1,43 раза, при угле соударения 45^0 значения микротвердости больше по сравнению с исходной в 1,33 раза. У образцов, обработанных частицами W (рис. 9, кривая 2) при угле соударения 60^0 значения микротвердости больше по сравнению с исходной в 1,31

раза, при угле соударения 45° значения микротвердости больше по сравнению с исходной в 1,28 раза. В то время как у образцов, обработанных только УВ, значения микротвердости максимально увеличиваются только в 1,22 раза. Это свидетельствует о более высокой интенсивности воздействия потока частиц на преграду по сравнению с ударной волной.

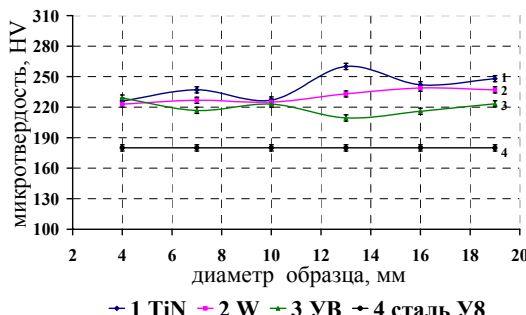
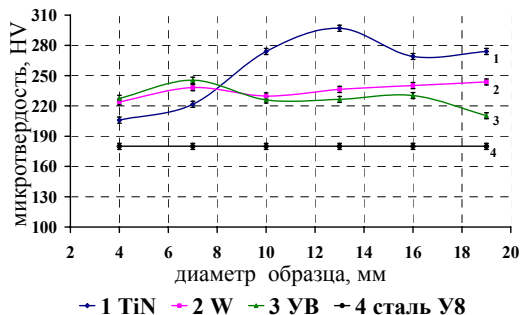


угол соударения потока частиц 60° угол соударения потока частиц 45°

Рис. 9. Распределение микротвердости по глубине образцов из стали У8

Значения микротвердости с глубиной уменьшаются и на глубине 20 мм у всех образцов почти одинаковы и равны около 180 единиц твердости, как у исходной стали У8. На глубине 20 мм частицы порошков нитрида титана и вольфрама не оказывают воздействия на твердость материала образца вследствие уменьшения концентрации этих частиц, хотя на этой глубине частицы порошка присутствуют.

Так как на глубине 4 мм значения микротвердости выше по сравнению с другими глубинами, рассмотрим распределение значений микротвердости на этой глубине по диаметру образцов при различных углах соударения. Расположение образцов осуществляется таким образом, что высота левого края меньше правого. У образцов, обработанных частицами TiN , при угле соударения 60° (рис. 10, кривая 1) изменяется характер распределения микротвердости и наблюдается увеличение значений микротвердости слева направо. У образцов, обработанных частицами W и ударной волной распределение микротвердости по ширине образца равномерное.



угол соударения 60°

угол соударения 45°

Рис. 10. Распределение микротвердости по диаметру образцов из стали У8

Также в образцах наблюдается уменьшение твердости с удалением от поверхности обработки, наиболее ярко выраженное при обработке только ударной волной (рис. 10). Результаты упрочнения у образцов с углом соударения потока частиц с поверхностью обработки 45° являются наиболее качественными, по сравнению с образцами с углами соударения потока частиц с поверхностью обработки 90° и 60° . Так как при угле соударения 45° распределение твердости более равномерное по всей ширине образца, разница между максимальным и минимальным значениями твердости составляет всего от 15 до 25 единиц твердости.

При исследовании распределения плотности по глубине в образцах, обработанных частицами TiN и W , наблюдается изменение плотности. У образца, обработанного частицами W , имеющего большую плотность, чем у преграды, плотность равномерно увеличивается по глубине образца. У образца, обработанного частицами TiN , с меньшей плотностью, чем у преграды, плотность волнообразно уменьшается с глубиной образца. Равномерное увеличивающее изменение плотности у образцов, обработанных порошком вольфрама, объясняется большей плотностью частиц вольфрама, чем у стали У8. Волнообразное изменение плотности после прохождения ударной волны было обнаружено также другими исследователями.

В четвертой главе рассматриваются ударно-волновые взаимодействия, сопровождающие воздействие потока частиц с преградой, которые разделяются на две группы.

К первой относится процесс взаимодействия ударной волны и продуктов детонации с частицами порошка, сопровождающие их разгон и теплообмен между ними в процессе разгона.

Ко второй группе относится взаимодействие продуктов детонации с материалом преграды, взаимодействие потока частиц с преградой и взаимодействие отдельной частицы с исследуемым образцом.

Взаимодействие ударной волны и продуктов детонации взрывчатого вещества с частицами порошка сопровождается:

- 1) Разгоном частиц до скоростей 2000 – 2200 м/с, причем частицы порошка разгонялись зарядами взрывчатых веществ цилиндрической формы с отношением $l/d > 2,5$, что отвечает условию реализации стационарной детонационной волны.
- 2) Прорывом продуктов детонации через частицы порошка.
- 3) Разогревом частиц порошка при прохождении фронта ударной волны и при движении в потоке разогретого газа.

При определении давления при соударении потока частиц со стальной преградой используется линейное уравнение ударной адиабаты:

$$D = a + bu \quad (1)$$

где D – скорость ударной волны, u – массовая скорость, a и b – значения коэффициентов ударной адиабаты веществ (для W $a = 4010$ м/с; $b = 1,24$; для TiN $a = 6280$ м/с; $b = 1,154$).

и уравнение сохранения импульса:

$$P = \rho_0 Du \quad (2)$$

Подставляя уравнение ударной адиабаты в уравнение сохранения импульса, получаем:

$$P = \rho_0(a + bu) * u \quad (3)$$

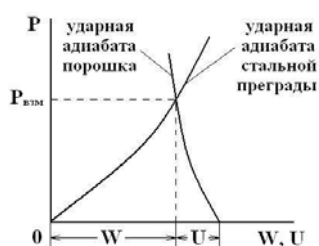
Распишем уравнение сохранения импульса для стальной преграды и порошка:

$$P_{Fe} = \rho_{Fe}(a + bu) * u$$

$$P_{Пор} = \rho_{Пор}(a + b(u - w)) * (u - w) \quad (4)$$

где u – массовая скорость частиц порошка (рис. 11); w – массовая скорость в стальной преграде (рис. 11).

Рис. 11. Ударные адиабаты порошка и стальной преграды в $P-U$ координатах.



Численное значение давления соударения частиц вольфрама со стальной преградой получилось 62 ГПа. Данные по ударной адиабате стальной преграды приведены в таблице 4, а по ударной адиабате вольфрама в таблице 5.

Таблица 4.

Ударная адиабата углеродистой стали ($\rho_0=7,85$ г/см³) в ($p - u$) координатах

u, м/с	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
p, ГПа	26,96	31,8	36,89	42,23	47,82	53,66	59,74	66,07	72,65

Таблица 5.

Ударная адиабата вольфрама ($\rho_0=19,3$ г/см³) в ($p - u$) координатах

u, м/с	500	600	700	800	900	1000
p, ГПа	44,68	55,05	65,9	77,23	89,04	101,33

Численное значение давления соударения частиц нитрида титана со стальной преградой получилось 41 ГПа. Данные по ударной адиабате нитрида титана приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Ударная адиабата нитрида титана ($\rho_0=5,43$ г/см³) в ($p - u$) координатах

u, м/с	700	800	900	1000	1100	1200	1300
p, ГПа	26,94	31,29	35,77	40,37	45,09	49,94	54,92

Воздействие потока частиц, разогнанных энергией взрыва, на стальные преграды сопровождается взаимодействием трех видов:

1. Относительно слабое взаимодействие потока продуктов детонации с материалом преграды, при котором давление в преграде не превышает давление упругого предвестника – 1 ГПа (измеренное электретными датчиками).
2. На порядок более сильное взаимодействие потока частиц с материалом преграды с давлением 10 – 13 ГПа по всей поверхности образца (рассчитано методом отражения по ударным адиабатам).
3. Локально сильное взаимодействие непосредственно самой частицы с поверхностью преграды. Давление в этом случае для частиц вольфрама достигает – 62 ГПа, для частиц нитрида титана – 41 ГПа.

Проведена оценка времени нагрева частиц до температуры плавления при взаимодействии с продуктами детонации. Характерное время изменения температуры частицы вследствие теплообмена с нагретым газом оказывается намного больше времени выравнивания температуры внутри частицы, которое оценивается с помощью соотношения $\sim R_0^2/a$, где R_0 – радиус частицы, a – коэффициент температуропроводности частицы. Поэтому частица считается равномерно нагретой по всему объему.

Время нагрева частицы до температуры плавления определяется уравнением (Гнедовец А.Г. и др.):

$$\tau_1 = \frac{R_0 c_v \gamma}{3 \sigma \mu T_g^4} \ln \left(\frac{c_1 + \sigma \mu T_g^4 T_m}{c_1 + \sigma \mu T_g^4 T_{po}} \right) \quad (5)$$

где c_v – теплоемкость; γ – плотность материала частицы; σ – постоянная Стефана-Больцмана; μ – температурный коэффициент линейного расширения; T_g – температура газа; T_m – температура плавления материала частицы; T_{po} – начальная температура частицы; значение величины c_1 рассчитывается из соотношения:

$$c_1 = \varepsilon \sigma T_g^4 + \frac{3}{2} p \sqrt{\frac{k T_g}{2 \pi m}} \quad (6)$$

где ε – поглощательная способность; p – давление газа; k – постоянная Больцмана; m – масса молекулы газа.

Численные оценки, для частицы вольфрама ($c_v \sim 134$ Дж/(кг*К), $R_0 \sim 15$ мкм, $\gamma \sim 19340$ г/м³, $T_m \sim 3695$ К) дают значение $\tau_1 \sim 1,36 \times 10^{-4}$ с.

Численные оценки для частицы нитрида титана ($c_v \sim 599$ Дж/(кг*К), $R_0 \sim 50$ мкм, $\gamma \sim 5440$ г/м³, $T_m \sim 3220$ К) дают значение $\tau_1 \sim 4,96 \times 10^{-4}$ с.

Время полного расплавления частицы τ_m , определяется:

$$\tau_m = \frac{R_0 Q_m \gamma}{3 q_\Sigma} \quad (7)$$

Для вольфрама $Q_m \sim 3,52 \times 10^4$ Дж/моль время расплавления частицы оказывается порядка $\sim 45,1 \times 10^{-4}$ с. Для нитрида титана $Q_m \sim 8,4 \times 10^4$ Дж/моль время расплавления частицы составляет $\sim 96,4 \times 10^{-4}$ с.

Таким образом, учитывая полученные значения, частицы порошков в процессе метания не успевают расплавиться. Однако это не исключает возможности их подплавления при соударении с обрабатываемой поверхностью.

Поэтому была произведена оценка температуры нагрева частиц при соударении с поверхностью преграды, используя линейное уравнение ударной адиабаты и уравнения сохранения массы и импульса на фронте ударной волны:

Нижний предел температуры ударного сжатия частиц порошка со стальной преградой рассчитывается по формуле:

$$T_{\min} = T_0 + \frac{E_M - E_y}{C_p} \quad (8)$$

где E_M – удельная внутренняя энергия ударного сжатия, а E_y – удельная внутренняя энергия изэнтропического сжатия в приближении, при котором изэнтропа в $P - V$ координатах совпадает с ударной адиабатой. Согласно (2),(3), имеем

$$E_M = \frac{a^2}{2} \left(\frac{V_0 - V}{V_0 - b(V_0 - V)} \right)^2 \quad (9)$$

$$E_y = \frac{a^2}{b^2} \left(\ln \left(\frac{V_0 - b(V_0 - V)}{V_0} \right) + \frac{b(V_0 - V)}{V_0 - b(V_0 - V)} \right) \quad (10)$$

C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Для частиц вольфрама ($a = 4010$ м/с; $b = 1,24$; $V_0 = 5,18 \times 10^{-5}$ м³; $V = 4,47 \times 10^{-5}$ м³) получается $T_{\min} = 573$ К, для частиц нитрида титана ($a = 6280$ м/с; $b = 1,154$; $V_0 = 1,84 \times 10^{-4}$ м³; $V = 1,59 \times 10^{-4}$ м³) $T_{\min} = 385$ К.

Верхний предел температуры ударного сжатия рассчитывается с помощью выражений:

$$T_{\max} = T_S + \frac{E_M - E_S}{C_p} \quad (11)$$

где E_S – удельная внутренняя энергия изэнтропического сжатия в приближении, при котором изэнтропа в $P - V$ координатах совпадает с касательной к ударной адиабате в начальной точке. Согласно (1),(2), имеем

$$E_S = \frac{a^2}{2} \left(\frac{V_0 - V}{V_0} \right)^2 \quad (12)$$

T_S – температура на изэнтропе, определяется из формулы

$$T_S = T_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\Gamma \quad (13)$$

где Γ – коэффициент Грюнайзена, который определяется по данным начального состояния.

Для частиц вольфрама ($T_S = 510$ К; $\Gamma = 1,476$) – $T_{\max} = 1245$ К, для частиц нитрида титана ($T_S = 419$ К; $\Gamma = 0,927$) – $T_{\max} = 667$ К.

Таким образом, при соударении частиц порошков со стальной преградой не достигается температура плавления частиц порошков и частицы соударяются в не расплавленном состоянии.

ВЫВОДЫ:

1. При обработке образцов потоком тугоплавких частиц, разогнанных энергией взрыва, с помощью рентгеноспектрального микроанализа подтверждено проникание материала частиц порошка в материал преграды на глубину до тысячи исходных диаметров. При использовании схемы обработки с углом соударения 60° , обработанной частицами нитрида титана глубина проникания превышает исходный диаметр частиц в 360 раз; при использовании схемы обработки с углом соударения 90° , обработанной частицами вольфрама глубина проникания превышает 930 раз.
2. Экспериментально показано, что с изменением угла соударения потока частиц, разогнанных энергией взрыва, с поверхностью преграды меняется характер распределения микротвердости по объему преграды, который зависит от используемой схемы обработки, параметров взрывчатого вещества, материала частиц порошка и их размеров.
3. Показано, что при воздействии на стальные преграды потока тугоплавких частиц оптимальным является угол соударения 45° , при котором происходит увеличение микротвердости на глубине 4 мм, в образцах, обработанных частицами порошков на 32 %, а в образцах, обработанных ударной волной на 22 % по сравнению с исходной микротвердостью преграды, которая равна 180 HV.
4. Проведенные исследования микроструктуры образцов стали У8, обработанных потоком частиц, разогнанных энергией взрыва, показали, что проникание частиц во всех используемых схемах обработки сопровождается измельчением структуры перлита с переходом от пластинчатого перлита в приповерхностном слое преграды к крупнопластинчатому перлиту в объеме преграды, при различных углах соударения вплоть до глубины 15 мм от поверхности обработки. На данной глубине микроструктура обработанных образцов не отличается от микроструктуры исходного образца стали У8.
5. Теоретически показано, что соударение тугоплавких частиц порошков со стальной преградой сопровождается высоким давлением. Давление соударения частицы вольфрама с преградой достигает 62 ГПа, частицы нитрида титана с преградой 41 ГПа.
6. Произведена оценка температур нагрева частиц продуктами детонации и при соударении с поверхностью преграды, которая показала, что в процессе взаимодействия частиц порошка с продуктами детонации не достигается температура плавления и частицы соударяются с преградой в нерасплавленном состоянии. При соударении с поверхностью максимальная температура до которой нагреваются частицы вольфрама составляет 1245 К, частицы нитрида титана 667 К.
7. Разработана методика обработки материалов воздействием высокоскоростным потоком тугоплавких частиц на стальные преграды с направляющим каналом и без него, которые позволяют обрабатывать, как локальные участки поверхности, так и всю поверхность, с углами соударения потока частиц с поверхностью преграды 45° и 60° .

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Научные рецензируемые журналы, рекомендованные ВАК

1. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., Петров Е.В., Исаев Д.В. **Изменение структуры инструментальных сталей при обработке потоком частиц вольфрама** // Физика и химия обработки материалов, 2008. - №6. - С.46–50.
2. Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., Петров Е.В., Полетаев А.В., Рихтер Д.В. **Особенности разрушения металлов при импульсном нагружении** // Деформация и разрушение материалов, 2009. - №7. - С. 7–12.
3. Кирсанов Р.Г., Петров Е.В., Кривченко А.Л. **Особенности распределения твердости инструментальных сталей по объему в зависимости от угла падения потока частиц** // Деформация и разрушение материалов, 2010. - №6. – С. 43-46.
4. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., Петров Е.В. **Взаимодействие высокоскоростного потока микрочастиц с металлической мишенью**// Деформация и разрушение материалов, 2010. - №8. – С. 44-47.

Статьи в других изданиях и в сборниках трудов конференций

5. Кривченко А.Л., Петров Е.В., Кирсанов Р.Г. **Механизмы взаимодействия потока частиц с преградой** // Известия СГСХА, 2006. - №3. – С. 49–51.
6. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., Петров Е.В. **Влияние потока высокоскоростных частиц на свойства малоуглеродистых сталей** // Известия СГСХА, 2007. - №3. – С. 159–162.
7. Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., Петров Е.В. **Особенности образования адгезионного шва покрытий под действием потока расплавленных частиц** // Сборник научных трудов. Международная конференция «Новые перспективные материалы и технологии их получения», Волгоград, НППМ, 9-12 октября, 2007. – С. 125–127.
8. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., Петров Е.В., Бондаренко А.А. **Исследование особенностей мишеней после обработки потоком частиц с различными углами падения** // Сборник научных трудов. Конференция Ударные волны в конденсированных средах, Санкт-Петербург, 23-26 ноября, 2008. - С. 238–244.
9. Кирсанов Р.Г., Петров Е.В., Кривченко А.Л. **Результаты соударения потока микрочастиц вольфрама, разогнанных кривой ударной волной, с металлической преградой** // Сборник научных трудов. Международная научно-практическая конференция «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010», Украина, Одесса, 15-26 марта 2010. – С. 61-63.
10. Кирсанов Р.Г., Петров Е.В., Кривченко А.Л. **Сравнительный анализ структурных изменений в металлических преградах после взаимодействия с потоками из частиц вольфрама и нитрида титана, разогнанных энергией взрыва** // Сборник научных трудов. Международная научно-практическая конференция «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2010», Украина, Одесса, 21-30 июня 2010. – С. 61-63.

Тезисы докладов на конференциях

11. Krivchenko A.L., Petrov E.V., Kirsanov R.G. **Ultradeep penetration of particles upon their collision with an obstacle** // XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials, Moscow, Russia, September 11-14, 2006. – P. 69–70.
12. **Петров Е.В., Кривченко А.Л., Кирсанов Р.Г. Взаимодействие потока частиц при соударении с преградой** // Тезисы докладов 4 Всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике, Черноголовка, ИСМАН, 22-25 ноября, 2006. – С. 38–39.
13. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., **Петров Е.В. Исследование взаимодействия потока высокоскоростных частиц с малоуглеродистыми сталями** // Тезисы докладов 5 Всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике, Черноголовка, ИСМАН, 26-28 октября, 2007. – С. 53–54.
14. Krivchenko A.L., Petrov E.V., Kirsanov R.G. **Impact of high-speed particles with a metallic obstacle** // IX International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations, Lisse, Netherlands, May 6-9, 2008. – P. 90.
15. Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., **Петров Е.В., Полетаев А.В. Особенности разрушения металлов при импульсном нагружении** // Тезисы докладов 47 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Нижний Новгород, 1-5 июля, 2008. – С. 231–233.
16. Кривченко А.Л., Кирсанов Р.Г., **Петров Е.В. Особенности взаимодействия потока частиц с преградой при различных углах падения** // Тезисы докладов 14 симпозиума по горению и взрыву, Черноголовка, 13-17 октября, 2008. – С. 268.
17. Трофимов В.С., **Петров Е.В. О возможном механизме сверхглубокого проникания потока частиц в преграду** // Тезисы докладов 14 симпозиума по горению и взрыву, Черноголовка, 13-17 октября, 2008. – С. 303.
18. Кривченко А.Л., **Петров Е.В., Кирсанов Р.Г. Исследование влияния потока частиц на свойства преграды при различных углах взаимодействия** // Тезисы докладов 6 Всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике, Черноголовка, ИСМАН, 26-28 ноября, 2008. – С. 65–66.
19. **Петров Е.В., Кривченко А.Л., Кирсанов Р.Г. Особенности взаимодействие потока частиц с металлической преградой при различных углах падения** // Тезисы докладов Международной конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» XI Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 16-20 марта, 2009. – С. 272–275.
20. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., **Петров Е.В. Воздействие потока микрочастиц на металлы** // Тезисы докладов XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» Самара, 23-25 июня, 2009. – С. 254.
21. Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л., **Петров Е.В. Исследование особенностей металлической преграды после взаимодействия ее с потоком высокоскоростных частиц** // Тезисы докладов III Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» Москва, 23-25 июня, 2009. – С. 158-159.

22. **Петров Е.В., Кривченко А.Л., Кирсанов Р.Г. Исследование процессов в стальных материалах после обработки потоком частиц, разогнанных энергией взрыва** // Тезисы докладов 7 Всероссийской школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых, Черноголовка, 25-27 ноября, 2009. – С. 49-50.
23. **Петров Е.В., Кирсанов Р.Г., Кривченко А.Л. Структурные эффекты в стали У8, обработанной высокоскоростным потоком частиц нитрида титана** // В сборнике материалов XIX Петербургские чтения по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 13-15 апреля 2010. –С.286-288.
24. **Petrov E.V., Krivchenko A.L., Kirsanov R.G. Metals processing with accelerated particles** // X International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2010), Bechichi, Montenegro, 7-11 June, 2010. – P. 57.