

6. Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. О выходе упругопластических импульсов, генерируемых импульсными пучками заряженных частиц, на тыльную поверхность металлической мишени // *Металлы*. № 3. 2001, С. 86–92.

7. Данейкин Ю.В. Выход импульсов механической нагрузки, генерируемых импульсными пучками заряженных частиц, на свободную тыльную поверхность металлической мишени // 7-ая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск, 2001., С. 56–58.

8. V.I. Boiko, Yu.V. Daneykin, K.V. Yushitsin Mathematical modeling of the processes accompanying powerful pulse influence on a metal target // IV International Conference on Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams (MPSL'2001). Feodosiya, Ukraine 27–30 August 2001. P. 18.

9. Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Численное описание процессов генерации волнового возмущения, обусловленного воздействием на металлическую мишень импульсного энергетического потока // Труды 15 международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, Алушта, Крым. 10-15 июня 2002., С.262.

10. Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Описание упругопластической среды в задачах моделирования системы «Концентрированный поток энергии - конденсированное вещество» // Материалы VII Международной конференции Физика твердого тела, Усть-Каменогорск, 5–7 июня, 2002 г.

11. Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Численное описание процессов генерации волнового возмущения, обусловленного воздействием на металлическую мишень импульсного энергетического потока // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (83) №3 2003, с. 133–137.

12. Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В. Описание параметров состояния вещества в задачах моделирования динамики системы «МИП-металл» // Изв. ТПУ, - Томск: ТПУ, 2004 - т. 307, - № 7. С. 16–22 (61090163).

На правах рукописи

Данейкин Юрий Викторович

**ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ЕЕ
ВЫРОЖДЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛ
ИМПУЛЬСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПЛОТНОСТЬЮ
МОЩНОСТИ 10^7 - 10^{10} ВТ/СМ²**

(Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Томск –2007

Подписано в печать _____.
Тираж ___ экз. заказ № _____. Бумага офсетная.
Печать RISO. Отпечатано в типографии _____

Работа выполнена на кафедре «Физико-энергетические установки»
физико-технического факультета
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бойко Владимир Ильич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Бутов Владимир Григорьевич

доктор технических наук, профессор
Ремнев Геннадий Ефимович

Ведущая организация: Омский государственный университет

Защита состоится « 25 » _____ мая 2007 г. В 14⁰⁰ часов на заседании специализированного диссертационного Совета ДС 212.025.01 в Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Орлов А.А.

6. Получены эмпирические зависимости глубины вырождения УВ генерируемой однокомпонентным пучком в зависимости от параметра α . В данных выражениях, величиной определяющей свойства материала мишени является константа λ – параметр вырождения, которая составляет $\lambda_{Cu} \approx 5.56 \text{ см}^{-1}$ и $\lambda_{Al} = 3.4 \text{ см}^{-1}$;

7. Показано что, при фиксированной начальной амплитуде импульсов механических возмущений присутствие в пучке углеродной компоненты приводит к возрастанию на $\square 20\%$ глубины вырождения УВ. Этот факт объясняется наличием в пластическом импульсе двух фронтов, соответствующих последовательной генерации импульсов отдачи от различных компонент пучка.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой направленной на решение актуальной задачи – исследования процессов диссипации ударно-волнового возмущения генерируемого при воздействии мощных импульсных ионных пучков на металлический поглотитель. Результаты диссертации вносят вклад в развитие представлений о физике процессов сопровождающих воздействие концентрированных потоков энергии на вещество.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. *Данейкин Ю.В., Юшицин К.В.* Модель упругопластической среды, описывающая воздействие импульсных потоков энергии плотностью мощности $10^8\text{-}10^{10} \text{ Вт/см}^2$ на конденсированное вещество // Всероссийская научно-техническая конференция "Механика летательных аппаратов и современные материалы". Сборник докладов. Томск, 1998. С. 106-107.

2. *Данейкин Ю.В., Степанов Н.В.* Описание совокупности физических процессов протекающих в системе «Импульсный поток энергии - конденсированное вещество» при плотности мощности $10^8\text{-}10^{10} \text{ Вт/см}^2$ // 5-ая Областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сборник трудов. Томск, 1999. С. 208-211.

3. *V.I. Boiko, Yu.V. Daneykin, K.V. Yushitsin* Generalized Description of Elastic-Plastic Processes at Surface Area of a Target Under the Influence of Pulse Energy Beam // International Conference Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semi-conducting Materials Using Particle Beams (MPSL'99). Abstracts. Summy, 1999. P. 43.

4. *Данейкин Ю.В., Степанов Н.В.* Закономерности динамики упругопластической среды при воздействии импульсного потока энергии плотностью мощности $10^8\text{-}10^{10} \text{ Вт/см}^2$ на конденсированное вещество // VI-ая Всероссийская научная конференция студентов физиков. Томск, 2000, С. 51–52.

5. *Бойко В.И., Данейкин Ю.В., Юшицин К.В.* Выход упругопластических импульсов, генерируемых импульсными пучками заряженных частиц, на тыльную поверхность металлической мишени // Труды X-го Межнародного совещания "Радиационная физика твердого тела". Севастополь, 2000, С. 134.

1. Предложена физико-математическая модель, описывающая поведение металлического поглотителя, испытывающего мощное внешнее энергетическое воздействие. Предложен новый подход к постановке начальных и граничных условий, позволяющий производить расчет начального состояния среды и процессов на границе «вещество-вакуум» с единых позиций. Разработан алгоритм сквозного счета параметров металлического поглотителя, реализующий разностный метод Уилкинса с квадратичной искусственной вязкостью, учитывающий амплитудно-временные параметры источника внешнего возмущения. Алгоритм реализован в виде пакета прикладных программ. Обоснована адекватность модели, работоспособность численных алгоритмов в широком диапазоне параметров нагружения;

2. Учет упругопластических эффектов позволил получить новые закономерности в задаче о разгрузке ударно-волнового возмущения на свободную поверхность среды, обладающей упруго-пластическими свойствами. При выходе упруго-пластического возмущения с амплитудой меньше $2\sigma_g$ (σ_g – предел упругости Гюгонию) на свободную поверхность металла пограничная область не испытывает пластической деформации. Глубина данной области определяется пространственно-временными параметрами импульса и разницей продольной и объемной скоростей звука в металле;

3. Показано, что амплитудные параметры импульсов механических возмущений, генерируемые при реализации термоупругого механизма генерации не превышают пределов упругости рассмотренных металлов. Следовательно, термоупруго сформированные механические напряжения не могут приводить к существенным изменениям реологических свойств поверхностных слоев. В данном случае модификация свойств металлов определяется процессами высокоскоростной закалки при релаксации сформированного МИП температурного поля;

4. Установлено, что термоупруго сформированное импульсное возмущение имеет биполярную структуру и длительность равную длительности пучка. В первом полупериоде импульса реализуется сжатие, во втором полупериоде – разрежение. При включении абляционного механизма, происходит резкий рост амплитуды, профиль импульса механических напряжений становится однополярным, происходит увеличение его длительности;

5. При анализе зависимостей амплитуды ударно-волнового возмущения от глубины установлено, что они имеют особенность, связанную с величиной начальной амплитуды возмущения σ_0 . Для упрощения количественного описания полученных закономерностей предложен безразмерный параметр $\alpha = \sigma_g / \sigma_0$. В диапазоне $1 \geq \alpha \geq 1/3$ данная зависимость линейна. В случае, если $\alpha \leq 1/3$, характер диссипации УВ усложняется: на участке $\sigma_0 > \sigma(z) > \sigma_0 - 2\sigma_g$ амплитуда уменьшается линейно; при достижении величины $\sigma(z) = \sigma_0 - 2\sigma_g$, скорость диссипации УВ изменяется амплитуда уменьшается экспоненциально;

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Успехи физики и техники генерации мощных потоков энергии (высокоскоростные струи газа и плазмы; лазеры; электронные, ионные и нейтронные потоки; ударные и электромагнитные волны и т.п.) сделали объектом лабораторных исследований, энергетических и технологических приложений, состояния вещества с недоступными ранее экстремально высокими давлением и температурой. Интенсивное поглощение энергии внешнего источника приводит к возникновению и развитию в среде разнообразных, сложных и взаимосвязанных физико-химических процессов, изучение которых представляет актуальную научную проблему.

Современные достижения в области физики высоких плотностей энергии позволяют разрабатывать новые способы модификации конструкционных материалов, основанные на направленном формировании структуры приповерхностных слоев с измененными физико-химическими и механическими свойствами. Высокие скорости термической обработки материалов в совокупности с большими амплитудными значениями давления и механических напряжений позволяют получать метастабильные состояния, свойства которых могут существенно отличаться от свойств вещества в равновесном состоянии.

Анализ существующих экспериментальных исследований и их теоретической интерпретации показывает, что значимую роль в динамике энергетического поля в системе «мощный импульсный ионный пучок – металлический поглотитель» принадлежит процессам выноса энергии из зоны взаимодействия во фронте волнового возмущения, в том числе ударных, акустических и упругопластических волн. Процессы диссипации энергии при прохождении по объему поглотителя пластических волн в целом определяют результаты воздействия на глубинах, превосходящих зону поглощения частиц пучка. В этой связи по-прежнему актуальна задача эффективного преобразования энергии ионных пучков в энергию, запасенную во фронте ударно-волнового возмущения, распространяющегося в объеме твердого тела.

Взаимодействие мощного ионного пучка (МИП) с конденсированным веществом (металлом) сопровождается возбуждением множества процессов: высокоскоростной нагрев, фазовые переходы, интенсивное плазмообразование, возбуждение акустических и ударных волн и другие. Физическая сущность многих процессов, оказывающих модифицирующее и деструктивное влияние на вещество, исследовано недостаточно полно. Это связано с отсутствием систематических экспериментальных исследований фазового состава и микроструктуры облученных образцов в широком диапазоне параметров нагружения. Исследование системы «МИП–металл» требует детализации многообразия взаимообусловленных и одновременно протекающих процессов. В приборном эксперименте удастся прямо или косвенно регистрировать лишь часть из них. Кроме того, экспериментальные исследования ориентированы, прежде всего, на конечные результаты воздействия. Для более подробного описания необходимо использовать методы математического моделирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Исследовать закономерности эволюции амплитудно-временных параметров ударно-волновых возмущений, генерируемых МИП (10^7 – 10^{10} Вт/см²) в металлической мишени. Определить возможность возбуждения пластических течений как одного из основных факторов, влияющих на изменение свойств металла за пределами области термализации частиц пучка. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести комплексный анализ и дать характеристику исследуемой системы «мощный импульсный ионный пучок – металлический поглотитель»;
2. Построить обобщенную физическую модель, описывающую широкий спектр тепловых и гидродинамических явлений, реализующихся в системе «МИП–металл»;
3. Разработать математическую модель, численно реализовать и адаптировать её к реальным особенностям физической системы «МИП–металл»;
4. Исследовать основные закономерности процессов формирования, эволюции и диссипации импульсов механической нагрузки, генерируемых при воздействии МИП на металлический поглотитель;
5. Определить связь амплитудно-временных параметров импульсов механической нагрузки с размерами области, подверженной пластическим деформациям.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА:

1. Предложена обобщенная модель упругопластической среды, испытывающей мощное импульсное энергетическое воздействие в диапазоне плотностей мощности 10^7 – 10^{10} Вт/см²;
2. Обоснована значимость влияния температурной зависимости модуля сдвига и предела текучести металла на процессы генерации ударно-волновых возмущений при воздействии МИП на металл;
3. Предложена постановка начальных условий и условий на границе «вещество–вакуум» на основе единых физических принципов;
4. Выявлены закономерности генерации и эволюции упруго–пластических импульсов механической нагрузки в металле, испытывающем воздействие МИП (10^7 – 10^{10} Вт/см²) различного компонентного состава;
5. Получены результаты, подтверждающие «скачкообразное» включение абляционного механизма генерации ударно-волнового возмущения при отсутствии переходных режимов;
6. Получены эмпирические соотношения, позволяющие оценить глубину вырождения ударной пластической волны в упругую в зависимости от начальной амплитуды возмущений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ. В диссертационной работе обобщены результаты исследований, выполненных в рамках научно–технических программ по физике плазмы, разработке ускорителей заряженных частиц, исследованию модификации металлов и сплавов с применением мощных импульсных ионных пучков.

На базе предложенной физико–математической модели, динамики прочной упругопластической среды, испытывающей мощное импульсное энергетиче-

предложен безразмерный параметр $\alpha = \sigma_g / \sigma_0$. В диапазоне $1 \geq \alpha \geq 1/3$ зависимость амплитуды УВ от глубины носит линейный характер. В случае, если начальная амплитуда ударно-волнового возмущения $\alpha \leq 1/3$, характер диссипации УВ усложняется: на участке $\sigma_0 > \sigma(z) > \sigma_0 - 2\sigma_g$ диссипация амплитуды носит также линейный характер; когда амплитуда УВ достигает величины $\sigma(z) = \sigma_0 - 2\sigma_g$, скорость диссипации УВ изменяется, а зависимость $\sigma(z)$ хорошо описывается экспоненциальной функцией.

Получены эмпирические зависимости глубины вырождения УВ генерируемой однокомпонентным пучком в зависимости от параметра α

$$z_g = \frac{1-\alpha}{\lambda}, \text{ при } \alpha \geq 1/3, \quad (5)$$

$$z_g = \frac{2\alpha}{\lambda} \frac{\ln \left[\frac{1-\alpha}{\alpha} \right]}{\ln \left[\frac{1-\alpha}{1-2\alpha} \right]}, \text{ при } \alpha < 1/3. \quad (6)$$

Величина параметра λ определена численным путем: $\lambda_{Cu} \approx 5.56 \text{ см}^{-1}$, $\lambda_{Al} = 3.4 \text{ см}^{-1}$. Данная зависимость, в совокупности с установленными ранее функциями амплитуды генерируемой у облучаемой поверхности УВ от плотности ионного тока, позволяет прогнозировать глубину области мишени, подверженной необратимым пластическим деформациям.

Исследовано влияние компонентного состава МИП на глубину вырождения генерируемой УВ. Установлено, что присутствие тяжелой фракции в пучке приводит к увеличению глубины вырождения на 10–20 % (рис. 12). Данный факт связан с наличием в пластическом импульсе двух фронтов соответствующих последовательной генерации импульсов отдачи от различных компонент пучка.

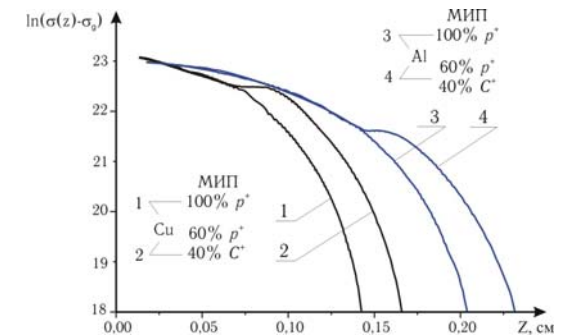


Рис. 12. Зависимости $f(z) = \ln[\sigma(z) - \sigma_g]$ при тождественных начальных амплитудных параметрах УВ, генерируемой при воздействии МИП различного компонентного состава на медный (1, 2) и алюминиевый (3, 4) поглотители

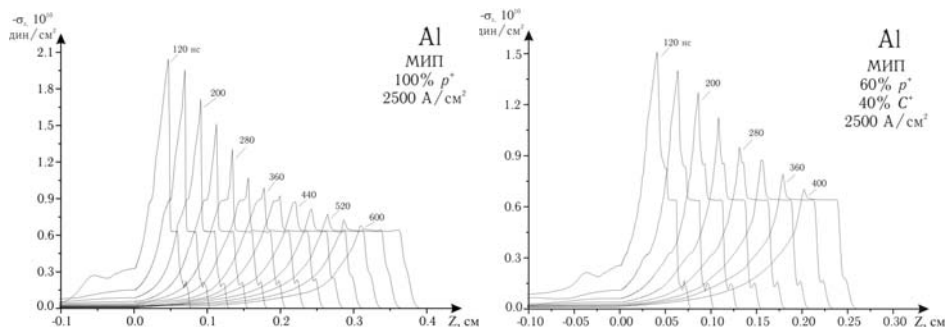


Рис. 11. Эволюция упругопластических импульсов, сформированных при воздействии протонного и протонно-углеродного пучков с плотностью тока 2500 A/cm^2 на алюминиевый поглотитель

фронте факела на границе «плазма-вакуум» давление стремится к нулю, поэтому формирующийся импульс сжатия имеет однополярную структуру.

На рис.11. представлены результаты расчетов эволюции упругопластических импульсов, сформированных при воздействии протонного и протонно-углеродного ионных пучков с плотностью тока 2500 A/cm^2 .

Однокомпонентный МИП. Начальная амплитуда импульса механических возмущений $2 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2 > 3\sigma_g$. Скорость УВ меньше продольной скорости звука. Следовательно, при разгрузке из ударно-сжатого состояния волна разгрузки догоняет фронт УВ. Взаимодействие упругой волны разгрузки с фронтом УВ приводит интенсивной диссипации последней и формированию характерного профиля в импульсе механических напряжений за фронтом УВ. Таким образом, в данном случае основным механизмом диссипации УВ являются процессы, связанные с упругопластическим поведением металлов.

Двухкомпонентный МИП. Начальная амплитуда УВ не превосходит величины $3\sigma_g$. Профиль ударно сформированного импульса сжатия в данном случае характеризуется двухступенчатой структурой в пластической фазе. Такая особенность обусловлена формированием двух последовательных импульсов отдачи в процессе абляции материала мишени от различных компонент пучка. Процесс эволюции импульса, сформированного воздействием двухкомпонентного пучка, на первом этапе определяется диссипацией импульса отдачи от протонной компоненты, в данном случае имеющего большую амплитуду. На глубине, при которой амплитуды фаз импульсов от легкой и тяжелой компоненты станут равны между собой, наблюдается формирование области, в которой диссипация суперпозиции данных импульсов мала.

При анализе зависимостей амплитуды ударно-волнового возмущения от глубины установлено, что функциональная зависимость амплитуды УВ от глубины имеет особенности, связанные с величиной начальной амплитуды возмущения. Для упрощения количественного описания полученных закономерностей

ское воздействие, разработан пакет программ, позволяющий проводить комплексное исследование системы «МИП–металл», с учетом широкого круга физических явлений, параллельно протекающих в металлическом поглотителе.

Обнаруженные при проведении исследований закономерности, разработанные пакеты программ, расчетные методики и алгоритмы, могут быть использованы при оптимизации и обосновании основных параметров МИП в современных и перспективных технологических системах модификации металлов и сплавов.

Работа выполнена в рамках реализации научно-технических программ: Минобрнауки РФ и Министерства РФ по атомной энергии «Интеграция в сфере образовательной деятельности Томского политехнического университета и сибирских предприятий Минатома РФ»; Рособразования РФ «Целевая финансовая поддержка для развития приборной базы научных исследований»; Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка естественно-научных основ комплекса технологии ядерных топливных элементов с дополнительным барьером безопасности»; Минобрнауки РФ и Министерства обороны РФ «Обоснование возможности ускорения макрообъектов потоком пучковой плазмы»; Рособразования РФ «Исследование ударно-волновых и плазменных процессов сопровождающих воздействие мощных ионных пучков (МИП) на металлическую мишень».

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ подтверждается: использованием общепризнанных теоретических представлений и законов; достаточной обоснованности сделанных допущений; согласием результатов численного моделирования широкого круга задач с экспериментально установленными. При этом результаты численных экспериментов, как на качественном, так и на количественном уровне не противоречат установленным ранее физическим принципам.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Физико-математическая модель системы «мощный импульсный ионный пучок – металлический поглотитель». Предложенное интерполяционное уравнение состояния, описывающее термодинамические параметры среды в широком диапазоне фазовой диаграммы, включающее описание процессов плавления и плазмообразования. Новый оригинальный подход к постановке начальных и граничных условий, позволяющий производить расчет начального состояния среды и процессов на границе «вещество-вакуум» с единых позиций. Алгоритмы и программы сквозного счета различных задач физики взрыва, удара и взаимодействия МИП с веществом.
2. При выходе упругопластического возмущения с амплитудой меньше $2\sigma_g$ (σ_g – предел упругости Гюгонию) на свободную поверхность металла пограничная область не испытывает пластической деформации. Глубина данной области определяется пространственно-временными параметрами импульса и разницей продольной и объемной скоростей звука в металле;
3. Амплитудные параметры импульсов механических возмущений, генерируе-

мых при реализации термоупругого механизма, не превышают пределов упругости металлов. Термоупруго сформированные механические напряжения не могут приводить к существенным изменениям реологических свойств поверхностных слоев. В данном случае модификация свойств металлов определяется процессами высокоскоростной закалки при релаксации сформированного МИП температурного поля;

4. Термоупруго сформированное импульсное возмущение имеет биполярную структуру и длительность равную длительности пучка. При включении абляционного механизма генерируемый импульс становится однополярным и его длительность начинает возрастать;
5. Установленные закономерности диссипации амплитуды ударной волны (УВ) генерируемой при воздействии МИП (10^7 – 10^{10} Вт/см²);
6. Определенные эмпирические соотношения, связывающие безразмерный параметр $\alpha = \sigma_g / \sigma_0$ (σ_0 – начальная амплитуда УВ) с глубиной вырождения для алюминия и меди. В данных выражениях, величиной определяющей свойства материала мишени является константа λ – параметр вырождения, которая составляет $\lambda_{Cu} \approx 5.56$ см⁻¹ и $\lambda_{Al} = 3.4$ см⁻¹;
7. Наличие в пучке углеродной компоненты приводит к увеличению глубины вырождения при фиксированной начальной амплитуде импульсов механических возмущений. Данное увеличение достигает $\square 20$ % от величины глубины вырождения УВ, сформированной при воздействии однокомпонентного протонного пучка.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА заключается в: обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач; анализе полученных данных и их интерпретации; разработке численной модели и её реализации в виде пакета программ; проведении исследований и обработке данных численных экспериментов; составлении отчетной документации; подготовке материалов для апробации результатов; подготовке выводов и заключений по работе; выдаче рекомендаций для практического использования. Представленная диссертационная работа выполнена автором лично.

АПРОБАЦИЯ: Основные результаты диссертационной работы докладывались на 9 следующих конференциях: V Всероссийской научно-технической конференции «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (г. Томск, 25–27 ноября 1998 г.); II International Conference Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semi-conducting Materials Using Particle Beams MPSL'99 (Summy, Ukraine 25 – 29 May 1999); V и VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (г. Томск, 28 февраля – 3 марта 1999 г.; г. Томск, 28 февраля – 3 марта 2001 г.); VI-ой Всероссийской научной конференции студентов физиков. (г.Екатеринбург–г.Томск, 2–8 апреля 2000 г.); X–ом международном совещании «Радиационная физика твердого тела» (г. Севастополь, Украина, 3–8 июля 2000 г.); IV International Conference on Modification of Properties

В-третьих, присутствие в пучке тяжелой компоненты (ионов углерода), обуславливает с одной стороны более раннее (по плотности ионного тока) «включение» абляционного механизма генерации, а с другой уменьшение амплитудных параметров импульса механических возмущений. Это обусловлено изменением профиля энерговыделения и развитием эффектов экранировки.

На рис. 9. представлена зависимость амплитудных параметров импульса механических напряжений от компонентного состава пучков с различной плотностью тока. Учитывая то, что в современных системах генерации ионных пучков всегда присутствует углеродная компонента, не следует ожидать проявления модифицирующих эффектов во фронте механического возмущения, обусловленного воздействием МИП с плотностью тока менее 750 А/см² при энергии ионов 660 кэВ. Несмотря на образование плазмы на поверхности мишени, амплитуды импульса отдачи недостаточно для формирования пластической волны. Для создания эффективной глубинной модификации во фронте пластической волны необходимы пучки с плотностью тока не менее 1 кА/см², с долей углеродной компоненты не более 40%. Кроме того, можно отметить что применение тяжелых ионов для объемной модификации во фронте упруго-пластического импульса вряд ли может быть эффективным без значимого увеличения энергии ионов (>1 МэВ).

На рис. 10. представлена зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности ионного тока. «Включение» абляционного механизма нагружения определяет рост длительности импульса. Область наработки плазмы испытывает расширение по всему объему. На границе «плазма-расплав» выполняется условие равенства давлений. Медленная релаксация давления за фронтом формирующегося импульса сжатия на границе «плазма-расплав» приводит к увеличению его длительности до единиц микросекунд. При этом зависимость длительности импульса механических возмущений от плотности мощностного воздействия имеет асимптотический характер и стремится к насыщению. Во

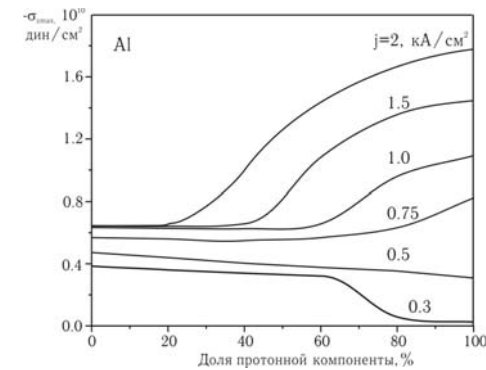


Рис. 9. Зависимость максимальной амплитуды импульса механических напряжений от компонентного состава при варьировании плотности ионного тока

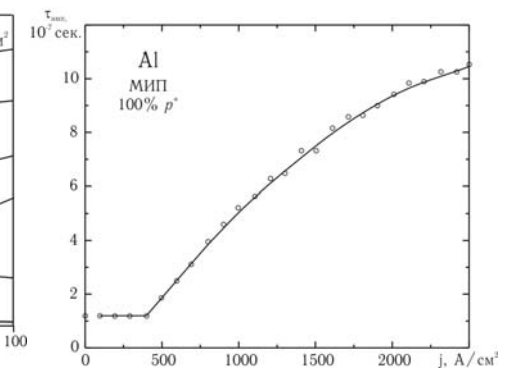


Рис. 10. Зависимость длительности импульса механических напряжений от плотности ионного тока

женное термоупругое возмущение предшествующее упругопластической волне.

На рис. 8. представлены зависимости максимальной амплитуды в импульсе механического возмущения от плотности ионного тока для различного компонентного состава пучка. При значениях плотностей тока 400 A/cm^2 для протонного и 200 A/cm^2 для протонно-углеродного пучка ускорителя ВЕРА наблюдается «включение» абляционного механизма генерации импульса. Соответственно до указанных плотностей мощности реализуется только термоупругий механизм, при котором зависимость амплитуды возмущения от плотности ионного тока линейна. В численных экспериментах установлено, что реализация термоупругого механизма всегда предшествует абляционному. Причем механизмы генерации разделены во времени. Абляционный механизм «включается» скачком при возникновении на поверхности мишени плазменного факела, что характеризуется резким ростом амплитудных значений импульса давления.

Выделив превышение динамического предела текучести в импульсе полного механического напряжения в качестве достаточного условия формирования модифицированной структуры материала, установлены закономерности, определяющие амплитудные параметры волнового возмущения.

Во-первых, при термоупругом механизме формирования линейный рост амплитуды импульса ограничен «включением» абляционного механизма генерации. Импульсы, формирующиеся термоупруго, по амплитуде не превышают пределов упругости металлов. Следовательно, в диапазоне плотностей мощности, где реализуется только этот механизм генерации, основными процессами, определяющими модификацию свойств металлов на глубинах превышающих область энерговыделения, являются процессы релаксации температурного поля.

Во-вторых, при воздействии протонно-углеродного пучка в мишени формируются две области наработки плазмы. Это приводит к пространственной неоднородности факела и к формированию двух последовательных во времени импульсов отдачи, обуславливающих характерный профиль в пластическом импульсе.

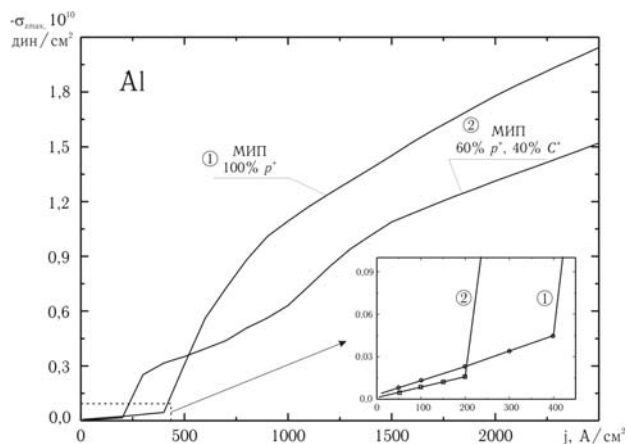


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды в импульсе механических возмущений от плотности ионного тока, при воздействии МИП различного компонентного состава на алюминиевую мишень

of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams (MPSL'2001) (Feodosiya, Ukraine, 27–30 August 2001); 15 Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, Украина 10–15 июня, 2002 г.); VII-ой Международной конференции «Физика твердого тела» (Усть-Каменогорск, Казахстан 5-7 июня, 2002 г).

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных трудах, в том числе 3 статьи, 9 докладов.

ОБЪЁМ И СТРУКТУРА. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка литературы, изложенных на 146 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и список цитированной литературы (103 источника, из них 84 на русском и 18 на иностранных языках).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цели и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, приведены практическая значимость, защищаемые положения, структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований по облучению металлов МИП в широком диапазоне плотностей мощности, дана общая характеристика наблюдаемых эффектов и процессов. Многообразие процессов, протекающих в рассматриваемой системе, обуславливает широкий спектр результатов воздействия, как модифицирующих (повышение твердости, износостойкости, глубинное упрочнение и др.), так и деструктивных (разрушение, ухудшение прочностных, механических и физических свойств). Отличительной особенностью процессов сопровождающих взаимодействие мощных импульсных пучков с конденсированным поглотителем, является их быстротечность и сильная зависимость от условий облучения.

В области относительно низких энергетических воздействий до 10^7 Вт/см^2 реализуются такие технологические процессы, как имплантация, отжиг, полировка, очистка поверхности. Они позволяют модифицировать свойства материалов в тонком приповерхностном слое без изменения объемных свойств и геометрических размеров, что существенно повышает их ресурс.

В промежуточном диапазоне плотностей мощности 10^7 – 10^{10} Вт/см^2 система «МИП–металл» становится наиболее многопараметрической. Модифицированный материал при этом приобретает уникальные характеристики не только в поверхностных слоях, но и на глубинах, на порядки превышающих пробеги частиц пучка. Так, например, исследования микротвердости металлических образцов (α –Fe, Pb, сталь P6M5, алюминий и его сплавы, Cu, W), подверженных воздействию МИП, показывают, что наряду с известным повышением микротвердости в поверхностных слоях формируется также второй ее максимум на глубинах существенно превышающих пробеги ионов. Проявление этого эффекта «дальнего действия» связывают с выносом энергии из зоны локального нагрева во фронте ударной волны (УВ). Генерация УВ в данном случае приписывается термоударному механизму. Вместе с тем, в более поздних исследованиях на ускорителях МУК (60% C^+ , 40% H^+ , 0.12 МэВ, $\tau_p = 100 \text{ нс}$) и ТЕМП-М (70% C^+ ,

30% H^+ , 0.3 МэВ; $\tau_p = 50$ нс), сделан вывод о том, что глубинное упрочнение объясняется не эффектом «дальнодействия», а особенностями изготовления и разрушения каждого конкретного объекта исследований, прошедшего ионно-лучевую обработку. Таким образом, при наличии экспериментально установленного факта формирования слоев модифицированного материала на глубинах значительно превышающих область термализации МИП, не существует однозначной интерпретации полученных результатов.

Кроме того, остаются невыясненными ряд вопросов касающихся процессов диссипации ударно-волнового возмущения при его выходе из области теплового влияния пучка. Особенности модификации металлов и сплавов при воздействии МИП, рассмотренные в данном разделе, позволяют дать некоторую общую характеристику наблюдаемых эффектов и процессов:

- 1) их особенности определяются взаимообусловленной динамикой радиационных, тепловых и механических полей;
- 2) они протекают как в облученной, так и необлученной областях, что связано со специфическим воздействием на структуру материалов ударных и упругопластических волн;
- 3) структурно-фазовая модификация слоев удаленных от зоны термализации частиц пучка обусловлена процессами формирования и диссипации ударно-волнового возмущения в металле;
- 4) они носят импульсный высокоскоростной характер.

Экспериментальные исследования быстропротекающих процессов в системе «МИП–металл» затруднены и сложны в техническом отношении. Исследование закономерностей формирования, эволюции и диссипации импульсов механических возмущений в данном случае возможно только с использованием методов математического моделирования. Сформулирован набор требований к модели определяющий полноту и целостность описания рассматриваемой системы. Для формирования законченной модели динамики металлической мишени, испытывающей воздействие мощного импульсного ионного пучка, необходимо:

1. рассмотреть формирование параметров энергетического воздействия с учетом детализации амплитудно-временных, спектральных и компонентных особенностей МИП в процессе их генерации и транспортировки;
2. описать параметры состояния вещества мишени в широком диапазоне фазовой диаграммы с учетом упруго-пластического поведения металла и протекания фазовых переходов «металл-жидкость», «жидкость-газ-плазма», «металл-газ-плазма»;
3. детализировать процессы генерации и эволюции ударных волн и акустических волн разгрузки с учетом их специфического поведения в металлах (расщепление упругой и пластической волн, отражение от границ раздела сред и фаз, аномального поведения адиабаты);
4. учесть влияние на гидродинамику поглотителя процессов релаксации температурного поля с учетом выноса энергий из области термализации пучка посредством теплопроводности.

дается отсутствие релаксации напряжений в области переходных состояний «жидкость–пар–плазма». Следствием этого является нефизичное поведение вещества в области разгрузки, а именно формирование отрицательного давления в области газоплазменного состояния.

При воздействиях на конденсированную среду МИП экстремально больших плотностей мощности важную роль приобретают процессы интенсивного испарения, ионизации паров и образования газоплазменного факела. Образование плазменной короны, с одной стороны, приводит к генерации в мишени импульса отдачи от разлетающегося вещества, с другой – к эффективному экранированию мишени от внешнего воздействия. Рассмотрена динамика конденсированного поглотителя при воздействии МИП с плотностью мощности $\geq 10^{10}$ Вт/см². В сериях численных экспериментов проведена имитация взаимодействия МИП с конденсированными мишенями, выполненная на установке KALIF с использованием пинч-рефлексных диодов B_{appl} и B_θ с внешней магнитной изоляцией. Наблюдается хорошее как качественное, так и количественное согласие результатов численных расчетов, полученных с использованием предложенной модели с независимыми экспериментальными результатами.

В четвертой главе рассмотрены механизмы генерации импульса механических возмущений, определяющие структуру переднего фронта упруго-пластического импульса. В сериях численных экспериментов исследованы процессы формирования импульсов механического возмущения, генерируемых в металлической пластине при воздействии МИП различных плотностей мощности. Последняя варьировалась изменением плотности ионного тока при фиксированных амплитудных значениях ускоряющего напряжения $U = 660$ кэВ и длительности пучка $\tau = 120$ нс. Формы импульсов ускоряющего напряжения и плотности тока соответствуют параметрами, полученным на ускорителе ВЕРА. Рассматривались пучки различного компонентного состава (парциальных долей ионов углерода и протонов).

На рис. 7. приведен характерный импульс механического возмущения, возбуждаемый в объеме алюминиевой мишени протонно-углеродным пучком (60% – протоны, 40% – ионы углерода) плотностью мощности $1.1 \cdot 10^9$ Вт/см². Передний фронт упругопластического импульса является ударным. Во фронте пластического импульса можно выделить самостоятельный фронт, обусловленный импульсом отдачи от тяжелой (углеродной) компоненты пучка. Кроме того, во фронте упругого предвестника наблюдается четко выра-



Рис. 7. Импульс механических возмущений, возбуждаемый МИП плотностью мощности $1.1 \cdot 10^9$ Вт/см² в алюминии к моменту окончания импульса тока

Данный факт согласуется с оценкой длительности импульса механических напряжений при термоупругом механизме его генерации с учетом процессов теплопроводности. После окончания импульса тока, сформировавшийся импульс механических напряжений двигается вглубь мишени с продольной скоростью звука. Дальнейшие процессы характеризуются релаксацией температурного поля, при этом скорость остывания составляет $\sim 7.5 \cdot 10^8$ К/с, тогда как скорость нагрева составляет $\sim 10^{11}$ К/с, что согласуется с результатами других авторов.

При увеличении плотности мощности воздействия генерируемое у облучаемой поверхности механическое возмущение по амплитуде превосходит предел текучести материала. Уруго-пластическое поведение металлов обуславливает расщепление пластической волны сжатия и формирование последовательной комбинации уругого предвестника и пластического возмущения (рис. 6). Интенсивное протекание фазового перехода «твердое тело–расплав» в области локального энерговыделения требует учета температурной зависимости уругих модулей при рассмотрении динамики металлического поглотителя, испытывающего воздействие МИП.

На рис. 6 представлены профили полного давления $-\sigma_z$ (на оси пучка) в алюминиевой мишени при воздействии МИП с параметрами: компонентный состав – протоны 100%; максимальная плотность тока – 1000 А/см^2 ; максимальное значение ускоряющего напряжения – 660 кВ; полная длительность пучка – 120 нс. Проведены расчеты динамики формирования импульса механических возмущений при учете температурных зависимостей динамического предела текучести σ_T и модуля сдвига G металла (кривые 1 на рис. 6) и без учета таковых (кривые 2). Полученные профили полей механических напряжений отличаются как по амплитудным параметрам, так и по характеру формирования области разгрузки. При учете температурной зависимости уругих модулей алюминия наблюдается увеличение амплитуды формирующегося импульса сжатия. Увеличение температуры в области поглощения МИП приводит к плавлению вещества. Уругие модули обращаются в ноль, что обуславливает релаксацию сдвиговых напряжений. Уменьшение энергетических затрат на осуществление деформации сдвига в области энерговыделения приводит к росту амплитудных параметров (на 5-10%) формирующегося импульса сжатия и увеличению кинетической энергии поверхностных слоев мишени. Тогда, когда уругие модули считаются постоянными, наблю-

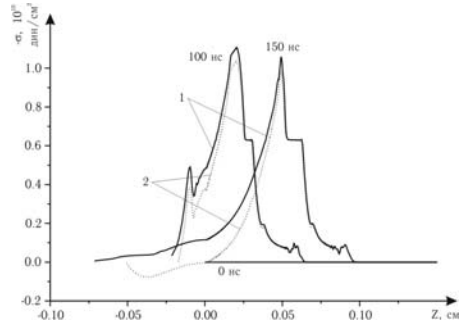


Рис. 6. Профили полного давления $-\sigma_z$ в алюминиевой мишени на оси МИП с параметрами: компонентный состав – протоны 100%; максимальная плотность тока – 1 кА/см^2 ; максимальное значение ускоряющего напряжения – 660 кВ; полная длительность пучка – 120 нс

дуются постоянными, наблю-

Во второй главе представлены и обоснованы основные положения и приближения модельного описания системы «МИП–металл». Предлагается последовательное рассмотрение комплекса взаимообусловленных физических явлений в сплошной среде, вызванных мощным локальным подводом энергии. Последовательное описание системы «МИП–металл» подразумевает введение функции эффективного источника энергии, которая описывает параметры локальной области энерговыделения с учетом процессов переноса энергии и гидродинамической эволюции плотности и температуры поглотителя.

Напряженно-деформированное состояние металла. Напряженное состояние характеризуется симметричным тензором напряжений T_H . Тензор напряжений разделяют на шаровую часть и девиатор тензора напряжений $T_H = T_H^0 + D_H$. Шаровая часть тензора эквивалентна гидростатическому давлению $-p = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ (здесь σ_i – главные напряжения) с противоположным знаком, которое изотропно и определяет изменение объема или объемную деформацию в данной точке среды. Девиатор тензора напряжений определяет формоизменение вокруг заданной точки и характеризует анизотропию напряженно-деформированного состояния. Уругое поведение среды описывается линейной теорией уругости, в рамках которой приращения напряжений и деформаций связаны между собой законом Гука:

$$\frac{dS_i}{dt} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_i + \frac{1}{3} \dot{V} \right), \quad (1)$$

где S_i – главные компоненты девиатора тензора напряжения, G – модуль сдвига, $\dot{\varepsilon}_i$ – скорости деформации в направлении главных осей, V – объем. Уравнение, связывающее напряжения в области пластических деформаций с некоторой константой материала, характеризующей предел уругости, называется поверхностью текучести. Согласно гипотезе Губера и Мизеса пластическое течение начинается тогда, когда энергия уругого сдвига достигает некоторой предельной величины, определяемой свойствами материала. Условие текучести в данном случае имеет вид

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 2/3 \sigma_T^2, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести материала.

В задачах взаимодействия МИП с веществом необходим учет зависимости модуля сдвига и предела текучести материала от термодинамических параметров состояния вещества:

$$\sigma_T(p, T, \varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p) = Y_R(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p) G(p, T) / G_0, \quad (3)$$

здесь Y_R – некоторая функция, определяющая скоростное и деформационное упрочнение материала, $\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p$ – пластическая деформация и ее скорость соответственно, G_0 – значение модуля сдвига при нормальных условиях $p = 0$, $T = T_0 = 300 \text{ К}$.

При построении широкодиапазонного уравнения состояния, гидростатическое давление представлено суммой компонент: упругой составляющей p_s , связанной исключительно с межатомным взаимодействием и зависящей от расстояния между атомами; тепловой составляющей p_T . В свою очередь p_T разделяем на слагаемые, соответствующие тепловому движению ионов p_i и тепловому возбуждению электронов p_e . Предлагаемые соотношения для определения составляющих давления и внутренней энергии представляют собой синтез работ различных авторов, и составляют основу интерполяционного широкодиапазонного уравнения состояния использованного нами для построения модели. Результаты расчетов термодинамических параметров по предложенной модели сравнивались с расчетными и экспериментальными данными, представленными в различных диапазонах плотности и температуры для различных металлов.

При нормальных условиях среда находится в стационарном состоянии. При этом выполняются энергетический критерий устойчивого равновесного состояния – потенциальная энергия должна быть минимальна. Используя этот принцип, в качестве начального невозмущенного состояния, будем принимать такое состояние среды, когда удельная внутренняя энергия минимальна при заданной температуре. Например, для алюминия при нормальных условиях ($T = 293$ К) в точке минимума внутренней энергии $\varepsilon = 2.78 \cdot 10^9$ эрг/г, $p = 0$, а значение плотности $\rho = 2.68$ г/см³ хорошо согласуется со справочными значениями ($2.67 \div 2.69$ г/см³).

Роль граничных условий состоит в описании сил на поверхности раздела, стимулирующих либо сдерживающих гидродинамическое течение и определяющих направление и скорость движения границы. При внесении энергетического возмущения вещество стремится к новому стационарному состоянию, характеризующемуся локальным термодинамическим равновесием. Поверхность вещества мгновенно разгружается в новое стационарное состояние, соответствующее минимуму полной внутренней энергии, нулю давления и новому значению плотности ρ_{sp} . Процесс расширения носит адиабатический характер, что определяет скорость движения границы u_{sp} . Сформировавшаяся волна разгрузки двигается вглубь вещества. Таким образом, задача определения скорости свободной поверхности сводится к вычислению параметров во фронте волны разрежения. Прочностные свойства среды, характеризующие сопротивление материала деформированию, оказывают существенное влияние на процесс разгрузки вещества. Стационарное состояние упругопластической среды, в отличие от жидкости, характеризуется равновесием между гидростатическим давлением и девиаторными напряжениями. Поэтому предложенный подход уточнен с учетом присутствия энергии сдвига.

Взаимодействие пучка с поглотителем рассматривается в одночастичном приближении. Процесс потери энергии отдельным ионом описывается в приближении «непрерывного замедления». Торможение иона в среде рассматрива-

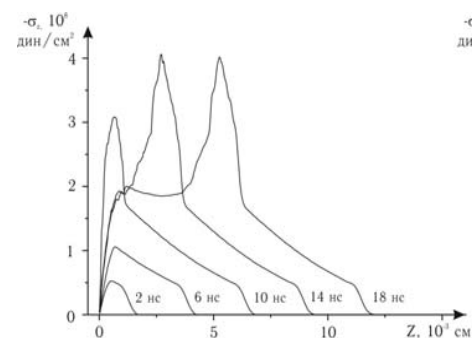


Рис. 4. Динамика осевой составляющей напряжения (с обратным знаком) на оси МИП на начальном этапе взаимодействия

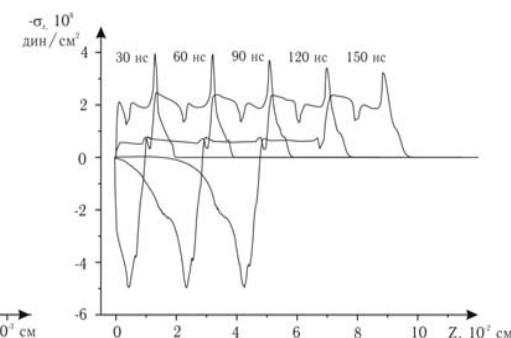


Рис. 5. Динамика осевой составляющей напряжения на оси МИП до момента окончания импульса тока

На рис. 4-5 представлена динамика поля механических напряжений, формирующегося у облучаемой поверхности за время действия МИП. В данном случае механизм формирования импульса является термоупругим. Энергия пучка трансформируется в тепловую составляющую внутренней энергии вещества ε_T . Скорость подвода энергии такова, что изменение объема поглотителя, а следовательно и уменьшение упругой составляющей давления p_s , не компенсирует рост тепловой компоненты p_T . Следовательно, наблюдается рост гидростатического давления $p = p_s + p_T$ в области энерговыделения. Пространственное распределение осевой компоненты девиатора тензора напряжений S_z таково, что осевой компонент полного давления $-\sigma_z = p - S_z$, взятый с обратным знаком, положителен. На границе области энерговыделения формируется импульс сжатия имеющего двухволновой профиль. Возможность возникновения такой структуры импульса сжатия в данном диапазоне параметров МИП обнаружена ранее другими авторами, т.е. полученные нами численные результаты подтверждаются независимыми данными.

Формирование жидкой фазы начинается в глубинных слоях мишени, что определяется пиковым характером поглощения энергии ионов. Энергетические затраты на протекание фазового перехода «твердое тело - расплав» приводят к стабилизации амплитудного значения напряжения за фронтом импульса, сформированного на начальном этапе взаимодействия. Релаксация сдвиговых напряжений в жидкой фазе, а также увеличение абсолютного значения упругой составляющей давления p_s вследствие объемного расширения обуславливает формирование отрицательной фазы в импульсе механических напряжений. К моменту окончания импульса тока сформированный импульс механической нагрузки имеет биполярную структуру, существование которой подтверждается рядом экспериментальных исследований. Длительность сгенерированного биполярного импульса соответствует длительности воздействия МИП на мишень.

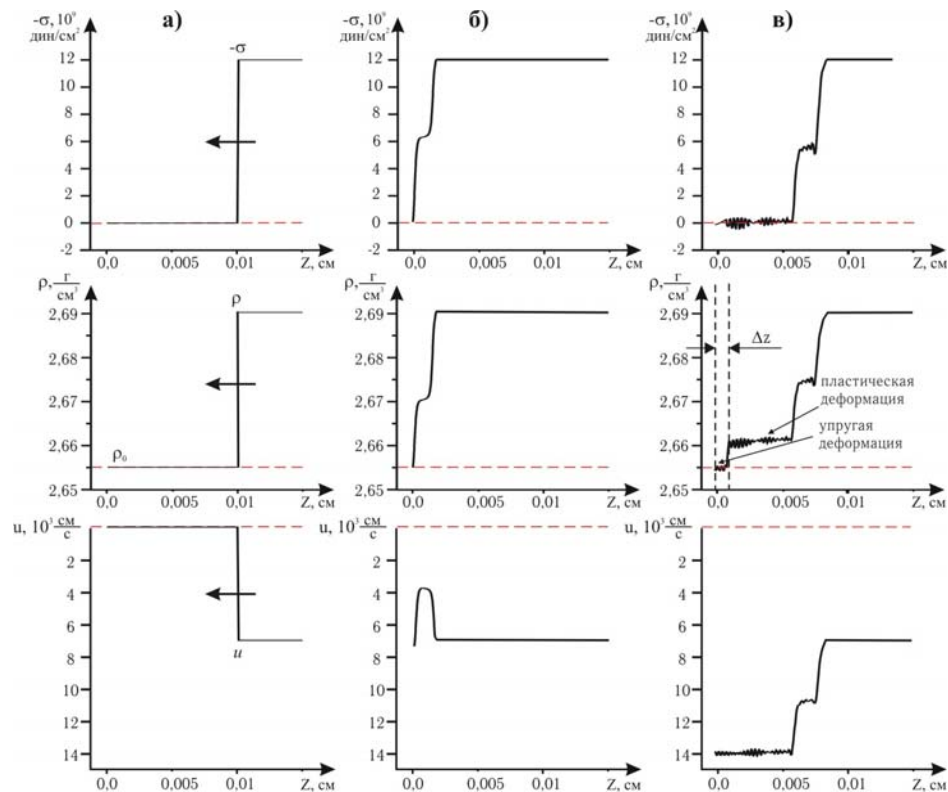


Рис. 3. Результаты моделирования выхода ударной волны на свободную границу

После завершения процесса отражения от свободной поверхности вглубь вещества распространяется волна разгрузки, имеющая два фронта – упругий и пластический. То есть вещество разгружается сначала упруго, а затем пластически. Значение скорости за фронтом отраженной волны соответствует правилу удвоения. В распределении плотности вещества за фронтом отраженных волн наблюдается однозначное разделение областей упругой и пластической деформации. Гистерезис цикла сжатие-растяжение упругопластической среды определяет формирование остаточной деформации в области пластического течения.

В диапазоне плотностей мощности воздействия $10^7 - 10^{10}$ Вт/см² термоупругие и гидродинамические процессы протекают параллельно. Прочностные и реологические свойства материалов начинают играть заметную роль в наблюдаемой физической картине. Упругопластические эффекты проявляются как на начальной стадии взаимодействия МИП с веществом так и на поздних стадиях гидродинамического течения при диссипации ударно-волнового возмущения, генерируемого у облучаемой поверхности.

ется в приближении «прямо вперед». Определение составляющих тормозной способности основано на подходе, который позволяет рассматривать торможение иона в среде, находящейся в произвольном термодинамическом состоянии. Учет явлений переноса сводится к решению краевой задачи теплопроводности с распределенным источником энергии.

Математическая модель формулируется на основе системы уравнений включающей дифференциальные уравнения законов сохранения массы, импульса, энергии в адиабатическом приближении, кинематические соотношения, уравнения пластического течения, уравнение состояния, взаимосвязь тензора напряжений, шарового тензора и девиатора тензора напряжений. Построение численной модели рассматриваемого физического явления подразумевает замену реальной физической системы приближенным аналогом. Для этого сплошная среда представляется совокупностью конечного числа лагранжевых ячеек, т.е. вводится четырехугольная сетка, которая движется вместе со средой. При этом составляющие скорости приписываются узлам эйлеровой сетки, а такие величины как масса, внутренняя энергия, давление и другие, относятся к центрам ячеек. Интегрирование уравнений движения производится путем аппроксимации частных производных функций в центрах ячеек на введенной лагранжевой сетке.

Система уравнений описывающих гидродинамическую эволюцию поглотителя решалась методом Уилкинса, использующим разностную схему «крест» с модификацией, позволяющей рассчитывать сильные разрывы параметров в процессе «сквозного» счета. Параметры возмущения в мишени определяются эффективным источником энергии. Поэтому логически первым этапом расчета в целом является определение поля потерь энергии пучком и решение задачи теплопроводности на выбранной сетке за шаг интегрирования Δt . Задача восстановления поля энергетических потерь МИП основана на использовании соотношений приведенных в разделе 2.3.

В третьей главе рассмотрены модельные задачи и проведен анализ результатов численного моделирования различных процессов, протекающих при нагружении металлов. Анализ адекватности модельного описания ударных и акустических процессов в твердофазной области мишени проводился в численных экспериментах по распадам произвольного гидродинамического разрыва, имитирующего воздействие на мишень твердотельного ударника. Кроме того, рассмотрено соответствие результатов численных экспериментов фундаментальным физическим принципам при выходе ударной волны на свободную поверхность. Обоснована корректность допущений положенных в основу модели и адекватность описания широкого круга явлений и процессов. Доказана работоспособность численных алгоритмов и возможность сквозного счета различных задач физики взрыва и удара и взаимодействия МИП с веществом без использования искусственных приемов (введение внутренних границ и особых граничных условий). Модель применима в широком диапазоне параметров воздействия и дает хорошее количественное и качественное согласие с результатами экспериментальных исследований.

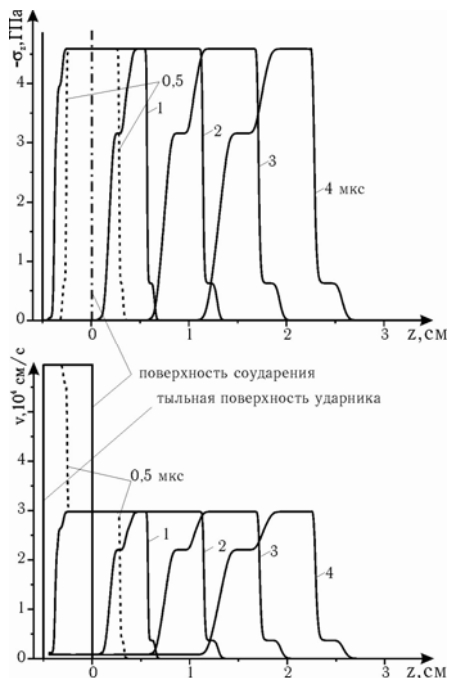


Рис. 1. Эволюция полей напряжения и массовой скорости в алюминиевой преграде при ударе алюминиевой пластинкой со скоростью $u_0 = 5.95 \cdot 10^4$ см/с

Когда волна,двигающаяся по ударнику, достигает тыльной поверхности, происходит ее отражение. При этом отраженная волна является центрированной волной разрежения. Вследствие различия продольных сжимаемостей в упругой и пластической областях деформирования на тыльную поверхность выходит упругопластический импульс. Остаточная массовая скорость после завершения отражения упругопластического импульса устанавливается равной скорости внутренних сечений ударника, прошедших через цикл растяжения. При этом значение остаточной массовой скорости однозначно определяется упругопластическими свойствами материала.

Наличие остаточной скорости после полного цикла нагрузки-разгрузки упругопластического тела объясняется гистерезисом цикла упругопластического деформирования. Данный факт строго обоснован и подтвержден экспериментально. После отражения от свободной поверхности в преграде формируется упругопластический импульс.

На рис. 2., приведены профили сжимающего напряжения в алюминии АД1, полученные методом манганиновых датчиков в условиях нагружения образцов алюминиевыми ударниками толщиной 5 мм со скоростью 595 м/с и тол-

В качестве одной из модельных задач исследована генерация ударной волны в упруго-пластической среде при воздействии на поверхность твердотельного ударника. Рисунок 1. иллюстрирует эволюцию полей напряжения и массовой скорости в алюминиевой преграде при ударе алюминиевой пластинкой со скоростью $u_0 = 5.95 \cdot 10^4$ см/с, полученных численным путем. Вещество в преграде покоится, а вещество ударника двигается с массовой скоростью u_0 по направлению к преграде. В результате соударения по обе стороны контакта образуются ударные волны, которые распространяются вглубь преграды и ударника. Распад такого гидродинамического разрыва обладает свойством формирования области равного давления $p_1 = p_2$ и массовой скорости $u_1 = u_2$ за фронтами расходящихся волн. Массовая скорость вещества ударника и преграды составляет половину начальной массовой скорости ударника.

щиной 4 мм со скоростью 1500 м/с. Из сравнения результатов численного моделирования, полученных в рамках предложенной модели, с экспериментальными данными, видна высокая степень их согласия.

В качестве другой модельной задачи, рассмотрена классическая задача гидродинамики – выход ударной волны (УВ) на свободную поверхность (рис. 3). Пусть по металлу распространяется плоская ударная волна постоянной амплитуды, характеризующаяся полным напряжением σ , взятым с обратным знаком, скачком плотности $\rho > \rho_0$ и массовой скорости u (рис. 3., а). По мере движения к свободной поверхности по невозмущенному веществу происходит расщепление ее фронта на упругий и пластический участки, формируется устойчивая комбинация упругой и пластической волн сжатия (рис. 3., б).

При решении задачи о выходе УВ, имеющей упруго-пластический фронт, на свободную границу нами получен следующий результат. Сначала свободной границы достигает упругая волна, при отражении которой происходит изменение знака нагрузки. Распространяясь в положительном направлении оси z , упругая волна разрежения встречается с фронтом пластической волны сжатия. Суперпозиция встречных пластической и отраженной упругой волн определяется суммой их амплитуд. Упругая и пластическая волны находятся в разных фазах, а модули их амплитуды таковы, что суммарное значение механической нагрузки не превышает предела упругости Гюгонио. В тонком приповерхностном слое вещества формируется участок вещества, не подверженного пластическим деформациям (рис. 3., в). Установлено, что размер области, не подверженной пластической деформации – Δz , определяется шириной упругого предвестника – Δz_y и отношением скоростей звука во фронте упругой нагрузки c_l и в пластической области c_b

$$\Delta z = \Delta z_y \frac{c_b}{c_l}, \quad (4)$$

Если амплитуда во фронте первоначального ударного возмущения превышает $2\sigma_g$, то данного эффекта не наблюдается. Это связано с тем, что в случае, когда $\sigma > 2\sigma_g$ суперпозиция отраженного упругого импульса и пластической волны превышает предел упругости σ_g .

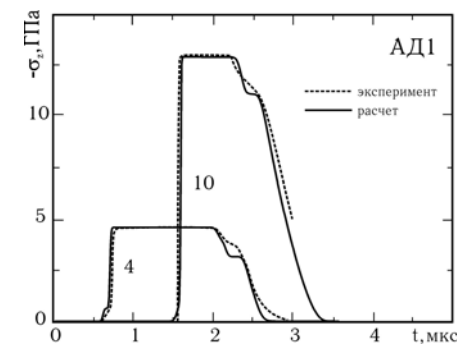


Рис. 2. Результаты регистрации и расчета импульсов сжатия в алюминии АД1. Цифры соответствуют расстоянию в миллиметрах от поверхности соударения до контролируемого сечения