

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

УДК 539.219.3:53.09

ЗВОРЫКИН Леонид Олегович

**ОСОБЕННОСТИ МАССОПЕРЕНОСА
В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН**

01.04.07 — физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев — 1994

77B 21.05
Работа выполнена в Институте металлофизики Академии наук Украины

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

М. В. Белоус

(Киевский политехнический институт)

доктор технических наук,

В. В. Даниленко

(Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Академии наук Украины, г. Киев)

доктор технических наук,

В. В. Соболев

(Украинская государственная горная академия, г. Днепропетровск)

Ведущая организация:

Институт проблем прочности АН Украины, г. Киев

Защита состоится « 1 » июня 199 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Специализированного совета Д 016.37.01 при Институте металлофизики АН Украины (Киев, пр. Вернадского, 36, конференц-зал ИМФ АН Украины)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института металлофизики АН Украины

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 252680, ГСП, Киев-142, пр. Вернадского, 36, Институт металлофизики АН Украины

Автореферат разослан « 30 » апреля 1994 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета Д 016.37.01

кандидат физико-математических наук

Э. Г. Мадатова

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00801771 (O)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Интенсивное развитие исследований в области физики ударных волн, начавшееся в середине пятидесятых годов, позволило развить не только теорию этих процессов, но и технику экспериментов, позволяющую рассчитывать и измерять характеристики нагружения. Эти работы кроме решения прикладных задач открыли широкий спектр новых явлений, происходящих в твердых телах в условиях ударного сжатия. В частности, было установлено, что многие процессы протекающие в обычных условиях достаточно медленно при прохождении ударных волн происходят за время $\sim 10^{-10}$ – 10^{-11} с. К числу таких процессов были отнесены фазовые переходы I-го рода немартенситного типа, процессы структурной релаксации, некоторые химические реакции и другие. Общей особенностью этих процессов являлась их диффузионная природа в условиях близких к равновесным. Все это вызвало значительный интерес к исследованиям физических особенностей этих явлений. Однако, при обилии фундаментальных работ, выполняемых под руководством С.С.Бацанова, А.Н.Дремина, М.Мейерса и др., направленных на развитие физических принципов динамического синтеза новых материалов, исследования аналогичного уровня в области процессов массопереноса, вызываемых в твердых телах ударным сжатием не проводились. Новым шагом в этом направлении явились работы, начатые под руководством Л.Н.Ларикова и В.М.Фальченко, в которых было установлено, что при скоростях деформации, превышающих $\dot{\epsilon} \sim 10^2$ с⁻¹, процессы перераспределения атомов в металлах и сплавах ускоряются на много порядков. Эти исследования, проведенные за последние двадцать лет, позволили установить многие физические закономерности, присущие изучаемому явлению и сформировать определенные представления о физических механизмах их протекания. Это дало основу для дальнейшего развития исследований физической природы таких явлений в условиях ударного сжатия.

Изучение явления массопереноса в металлических материалах при прохождении ударных волн является звеном цепи, объединяющим фундаментальную проблему физики твердого тела – исследование механизма явления ускорения подвижности атомов при высокоскоростном деформировании металлов, и физики ударных волн в сплошных средах – касающейся особенностей кинетики процессов, протекающих в ударных волнах. Следует отметить, что, если в физике твердого тела эта проблема является в какой-то мере автономной, то формирование новых

представлений о механизме изучаемого явления может существенно повлиять на теорию ударных волн в кристаллах.

Актуальность исследований связана с необходимостью решения вышеуказанных проблем, которые и определили цель и задачи настоящей работы.

Цель работы.

Настоящая диссертационная работа посвящена решению научной проблемы разработки научных основ физики нестационарного массопереноса в металлах и сплавах при прохождении ударных волн.

При выполнении таких исследований необходимо было ответить на ряд основополагающих вопросов:

- При каких условиях наблюдается явление массопереноса при прохождении ударных волн в металлах?
- Какова роль ударной волны в реализации такого массопереноса?
- Какие особенности исходной структуры и свойств нагружаемых материалов оказывают наиболее заметное влияние на перераспределение элементов в металлах при прохождении ударных волн?
- За какое время протекают основные процессы массопереноса при прохождении ударных волн?

Все это обусловило выбор основных задач исследования:

- Экспериментальное исследование основных закономерностей процесса массопереноса в металлах и сплавах при прохождении ударных волн.
- Проведение анализа изменений структуры и свойств металлов и сплавов, вызываемых протеканием массопереноса в условиях взрывной обработки.
- Определение влияния массопереноса на особенности распространения ударных волн в кристаллах.

Научная новизна.

Проведенные исследования и анализ полученных результатов позволяют глубже понять природу явления нестационарного массопереноса в металлах и сплавах при прохождении ударных волн. Обнаружен нижний граничный уровень динамических давлений при которых массоперенос начинает проявляться. Показано, что этот процесс происходит практически во всем объеме ударно-сжимаемых кристаллов. Сопоставление закономерностей формирования зоны массопереноса в металлах при прохождении ударных волн и в условиях взаимодействия высокоскоростных ударников с металлическими преградами позволили выделить превалирующее влияние на массоперенос фронта ударной волны. Это подтвердили также установленные

особенности изменения размера зоны массопереноса при развитии процессов деформации за счет боковой разгрузки, структурные особенности материала, закономерности образования и роста новых фаз в такой зоне. Впервые установлено, что перераспределение элементов в металлах при ударном сжатии происходит за счет процессов, протекающих во фронте нарастания давления. Релаксационные процессы в области квазигидростатического сжатия и в волне разгрузки вносят изменения в уже сформировавшуюся зону массопереноса.

Теоретический анализ развития процессов массопереноса во фронте ударной волны, проведенный на основе гидродинамической теории Ранкина-Гюгонио, позволил разработать феноменологическую модель изучаемого явления. Результаты, полученные на основе этой модели, позволили объяснить высокие значения вязкости и ширины фронта ударной волны в металлических материалах, измеренные ранее в работах других авторов и не имевшие до сих пор удовлетворительного объяснения. Следует отметить, что аналогичное влияние процессов перераспределения атомов на ширину фронта ударной волны и вязкость были известны для газовых сред. В случае кристаллических металлов и сплавов такие закономерности были установлены впервые.

Полученные результаты позволили ответить на вопрос: где и когда происходит массоперенос? Он осуществляется, в основном, во фронте нагрузки плоской ударной волны за время прохождения такого фронта через кристалл. Вместе с тем, не менее важной является и проблема установления природы элементарных актов реализации массопереноса. Основой для установления микромеханизма массопереноса являются результаты модельных экспериментов по влиянию исходной структуры металлической матрицы на перераспределение элементов при прохождении плоских ударных волн. Закономерности влияния плотности структурных дефектов, энергии дефектов упаковки металлов и сплавов, кристаллографической ориентации различных монокристаллов, исходной температуры металлической матрицы позволили установить, что интенсивные процессы массопереноса развиваются в кристаллическом состоянии. Причем, более благоприятными являются условия, при которых процессам скольжения дислокаций сопутствуют альтернативные механизмы деформации. Показано, что высокие значения напряжений и их градиента во фронте ударной волны обеспечивают возможность не только скольжения, но и силового переползания краевых дислокаций, что, как известно, сопровождается переносом массы. Учет таких

процессов на основе использования модели фронта ударной волны М.Мейерса дал возможность не только связать элементарные акты массопереноса с переползанием дислокационных петель, ступенек и диполей межузельного типа, но и объяснить закономерности затухания плоских ударных волн в металлах. Предложенная гипотеза позволяет объяснить наличие в зоне массопереноса значительного количества перенесенных атомов железа, находящихся в скоплениях, сохраняющих в парамагнитной матрице ферромагнитные свойства. Таким образом, массоперенос в металлах и сплавах при ударном сжатии, по-видимому, является частью процессов пластической деформации, развивающихся во фронте ударной волны. Это позволяет описывать фронт ударной волны не привлекая гипотезу о сверхзвуковом скольжении дислокаций. Вместе с тем, для окончательного заключения относительно элементарных актов, обеспечивающих протекание массопереноса при прохождении плоских ударных волн, необходимо дальнейшее развитие экспериментальных и теоретических исследований. Полученные результаты дают основания считать, что исследования особенностей процессов массопереноса важно не только для понимания физики этого явления, но и для развития современных представлений о физике ударных волн в твердых телах.

Практическая значимость работы.

Анализ процессов массопереноса, происходящих в условиях реализации взрывных технологий обработки конструкционных материалов (сварка взрывом, динамического легирования порошковыми материалами, нанесения покрытий) показывает, что разработанные физические представления позволяют правильно выбрать режимы термообработки после импульсного нагружения, усовершенствовать технологии динамического легирования порошковыми материалами и нанесения покрытий путем использования энергии взрыва. Полученные результаты дают основания считать, что учет особенностей перераспределения элементов в металлах и сплавах в условиях взрывной обработки является эффективным путем повышения эксплуатационных свойств получаемых материалов.

Применение разработанных в диссертации представлений о физике нестационарного массопереноса для усовершенствования технологий взрывной обработки материалов позволяет более целенаправленно решать прикладные проблемы создания новых материалов и нанесения покрытий.

1. Массоперенос в кристаллических металлических материалах при ударном сжатии начинается при давлениях, превышающих динамический предел упругости, не связан с наличием границы раздела, а реализуется во всем объеме металла

2. В условиях прохождения плоских ударных волн массоперенос в металлах определяют преимущественно процессы, проходящие во фронте нагрузки, квазистатическое сжатие и фронт разгрузки в таких условиях вызывают перераспределение элементов и изменения структуры в пределах сформировавшейся зоны массопереноса

3. Процессы массопереноса во фронте ударной волны, распространяющейся в металлических кристаллах, приводят к размытию такого фронта, обуславливают увеличение вязкости и способствуют затуханию ударной волны

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на V и VI Всесоюзных конференциях по диффузии в металлах (Тула, 1981, 1986), Всесоюзном совещании "Работоспособность конструкционных материалов в азот-водородсодержащих средах при высоких температурах" (Славско, 1983), Всесоюзной школе-семинаре "Применение взрыва в эксперименте. Физика взрыва" (Красноярск, 1984), I Всесоюзном симпозиуме по химической кинетике и газовой динамике (Алма-ата, 1984), II Всесоюзной конференции "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике" (Киев, 1985), XI и XII научных семинарах "Влияние высоких давлений на вещество" (Одесса, 1986, 1987), Всесоюзном совещании "Применение высоких давлений для получения новых материалов и создания интенсивных процессов химических технологий" (Москва, 1986), Научном семинаре "Радиоактивные изотопы в исследовании свойств и качества металлов" (Киев, 1987), XI Международной конференции МАРИВД "Высокие давления в науке и технике" (Киев, 1987), III и IV Всесоюзном совещании по детонации (Таллинн, 1985; Телави, 1987), XII Всесоюзной конференции "Физика прочности и пластичности металлов и сплавов" (Куйбышев, 1989), Всесоюзном совещании "Влияние внешних воздействий на массоперенос в металлах" (Киев, 1990), Международной конференции "Зарождение и рост трещин в металлах и керамике - роль структуры и окружающей среды" (Варна, 1991), Международном симпозиуме по химии ударных волн (Красноярск, 1991), Международной конференции по физике высокоэнергетических воздействий (Минск, 1992); на периодических

заседаниях секции "Синтез новых материалов динамическими методами" Научного совета ГКНТ СССР "Теория и практика применения высоких давлений в народном хозяйстве".

Основные результаты исследований опубликованы в 27 научных статьях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов. Изложена на 240 страницах машинописного текста, включая 97 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 199 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научного направления, изложены цели и задачи исследований, кратко изложены полученные основные результаты и их практическое значение, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен краткий анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям процессов, протекающих в твердых телах при прохождении ударных волн. Приведенные результаты показали, что в условиях ударного сжатия кристаллов многие процессы, лимитированные в обычных условиях диффузией, протекают за время $\sim 0.1-1$ нс. Это подтверждают и данные исследований, направленных на изучение массопереноса в металлах и сплавах при различных видах импульсных воздействий, свидетельствующие об ускорении этого процесса на много порядков при превышении скорости пластической деформации $\dot{\epsilon} > 10 \text{ с}^{-1}$. Отмечено отсутствие систематических исследований закономерностей массопереноса в металлических материалах в условиях прохождения ударных волн. Обсуждены литературные данные, касающиеся основных черт массопереноса в металлах и сплавах при импульсных нагружениях. Показана необходимость разработки основ физики нестационарного массопереноса в твердых телах при прохождении ударных волн, установления взаимосвязи массопереноса в металлах с процессами протекающими в ударных волнах. В заключение на основании литературных данных сформулированы задачи исследования.

Во второй главе описаны материалы и экспериментальные методики, примененные в работе для решения поставленных задач.

Основными материалами матрицы, применяемыми в экспериментах, были медь (99.9%), никель (99.8%) и молибден (99.85%), кроме того для решения отдельных задач использовали цинк (99.99%), алюминий

(99.999%), вольфрам (99.99%), сталь 45, сталь РСМ5, сплав ВТ-4, аморфный сплав $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$. При этом цинк, алюминий и молибден использовали как в поликристаллическом состоянии, так и в виде монокристаллов различных ориентаций. Материалами, обеспечивающими проникание в металлическую матрицу, являлись ^{63}Ni , ^{55}Fe , ^{14}C , ^{137}Cs , ^{57}Fe , NbB_2 , MoSi , $\text{W}(\text{C}+^{14}\text{C})+\text{Ni}$, $\text{WC}+\text{Ga}$, цинк, олово, медь и свинец.

Выбор меди, никеля и молибдена в качестве основных модельных материалов был обусловлен наличием обширного экспериментального материала, содержащего подробные исследования их поведения в различных условиях ударного сжатия. Использование остальных материалов в качестве металлической матрицы было обусловлено особенностями их поведения при импульсных воздействиях, в условиях которых изучали массоперенос, или особенностями решаемых прикладных задач. Большинство используемых в работе материалов имеют известные ударные адиабаты, что позволяло достаточно точно определять параметры ударных волн, генерируемых методами взрывной обработки.

При выборе материалов, проникающих в металлическую матрицу, основным элементом, используемым в экспериментах являлся ^{63}Ni , обеспечивающий максимальные возможности при применении методов радиоактивных изотопов и позволяющий исследовать процесс массопереноса как в гетеро- так и в гомогенных металлических системах. Кроме него в ряде случаев использовали ^{55}Fe , ^{137}Cs , ^{60}Co и C^{14} , также удобные в проведении экспериментов, что давало возможность изменять природу мигрирующих атомов. Изотоп ^{57}Fe был применен при проведении КЭМ-спектрального анализа зоны массопереноса при прохождении плоской ударной волны в системе Fe-Ti.

Для генерирования ударных волн использовали обычные методики нагружения: плоскими ударными волнами по схеме плоского соударения стальных пластин, разогнанных продуктами взрыва, с цилиндрическими ампулами сохранения; нестационарными ударными волнами - по схеме контактного взрыва и косого соударения пластин. Расходящиеся ударные волны с малым радиусом расходимости генерировали с помощью сфокусированного пучка импульсного излучения ОКГ ($\lambda \sim 1.06$ мкм, $10^{12}-10^{13}$ Вт/см²). Взаимодействие высокоскоростных потоков с металлической матрицей для исследований закономерностей массопереноса достигали при проникновении металлических

кумулятивных струй и других высокоскоростных лайнеров, ускоряемых продуктами детонации в различных схемах в интервале скоростей 1-8.2 км/с.

Характеристики ударных волн определяли путем предварительного их расчета из условий нагружения и последующего экспериментального определения. Скорость метаемых пластин и отклонение от плоскостности поверхности соударения определяли методом скоростной фоторегистрации. Регистрацию динамических давлений в ударных волнах осуществляли с помощью известных методов применения манганиновых датчиков. Кроме того, совместно с сотрудниками ИЭП и ЛМ им. С.Калиского были специально разработаны и применены биметаллические датчики высоких динамических давлений, позволяющие не только значительно расширить диапазон регистрируемых амплитуд ударных волн, но и одновременно измерять фазовую скорость ударной волны, что значительно повысило точность определения характеристик ударных волн.

При проведении исследований в работе применяли методы радиоактивных изотопов, КЭМ-, электрономикроскопического, Оже-, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов материала в зоне массопереноса. Механические испытания проводили по методике, обеспечивающей анализ механических характеристик на основе теории хрупкого разрушения.

В третьей главе на основе анализа влияния начальных и краевых условий на вид концентрационных профилей распределения ^{14}C и ^{63}Ni в меди и никеле, сформированных при прохождении плоских ударных волн, установлено, что изменение концентрации проникающих с поверхности элементов по глубине проникновения может быть аппроксимировано функцией вида:

$$C(X) = \begin{cases} C_0, & 0 < X < X(\delta_n) \\ C_0 \exp[-\alpha(X-X_0)^n], & X > X(\delta_n) \end{cases} \quad (I)$$

где $n \sim 1$. При этом $X_0(0.3) = 0$; $X_0(1.0) = 0.7-0.8$ мкм; $X_0(3.0) = 2.5-2.8$ мкм. Анализ особенностей распределения элементов покрытия в металлической матрице после прохождения плоских ударных волн показывает, что увеличение поверхностной активности и толщины покрытия приводит к росту глубины проникновения атомов не изменяя аналитический вид концентрационных зависимостей распределения

элементов в зоне массопереноса. Это позволило использовать в качестве количественных характеристик массопереноса максимальную глубину проникновения $X_{\max}$ и параметры функции (I).

В экспериментах по исследованию массопереноса в металлах и сплавах при действии импульсных нагрузок образование зоны массопереноса, как правило, происходит вблизи поверхности контакта различных материалов. В условиях прохождения ударных волн наличие поверхностей раздела имеет принципиальное значение. При прохождении ударных волн через границу контакта различных материалов ударная волна распадается на прямую волну, распространяющуюся в первоначальном направлении, и отраженную волну, вектор скорости которой направлен в обратную сторону. Результаты исследований особенностей протекания массопереноса в модельных системах $Ni - {}^{63}Ni$ - Ni и $Fe - {}^{55}Fe$ - Fe свидетельствуют, что перераспределение элементов в металлических материалах при прохождении ударных волн происходит как в приповерхностных областях, так и в объеме сжимаемого материала. Протекание массопереноса в этих условиях является характерным для всего объема, однако происходит преимущественно в направлении распространения ударной волны. Перераспределение элементов в направлениях перпендикулярных вектору скорости ударной волны не обнаружено. Это дает основания считать, что увеличение подвижности атомов в металлах при прохождении ударных волн в определенные промежутки времени свойственно для каждой части кристалла и связано с процессами, протекающими в ударной волне.

При проведении экспериментов, по изучению влияния амплитуды ударной волны на характеристики массопереноса, остальные характеристики, не связанные с давлением в уравнении состояния, сохраняли постоянными. Интервал динамических давлений, используемых в выполненных экспериментах: 0.5 - 94 ГПа. Нижняя граница этого интервала определялась стремлением проанализировать возможность протекания массопереноса при прохождении упругих волн сжатия. Верхний предел динамических давлений был ограничен имеющимися экспериментальными возможностями. Полученные результаты свидетельствуют, что процесс массопереноса в металлах не наблюдается в случае прохождения волн сжатия с малыми амплитудами (в пределах амплитуд упругого предвестника). Начало реализации эффекта, по-видимому, следует отнести к диапазону давлений при которых возникает пластические течения в ударной волне. Такая

закономерность была проверена при проведении экспериментов на широком круге металлических материалов, обладающих различными свойствами и типом кристаллических решеток (табл. I). По-видимому, развитие процессов пластической деформации в ударной волне является необходимым условием протекания массопереноса в условиях ударного сжатия.

Таблица I Глубина проникновения элементов покрытия в различные металлические материалы при прохождении волн сжатия с различными динамическими давлениями

Материал матрицы	Материал покрытия	Динамический предел упругости P_y , ГПа	Амплитуда волны сжатия P , ГПа	Глубина проникновения X_{max} , мкм
Никель	^{63}Ni	1.0	1.0	0
	^{63}Ni	1.0	10	18
Медь	^{63}Ni	0.63	0.5	0
	^{63}Ni	0.63	10	26
	^{55}Fe	0.63	0.5	0
	^{55}Fe	0.63	30	32
Молибден	^{63}Ni	1.6	1.0	0
	^{63}Ni	1.6	10	8
	^{55}Fe	1.6	1.0	0
	^{55}Fe	1.6	10	6
Цинк	^{14}C	0.5	0.4	0
	^{14}C	0.5	25	130
Алюминий	^{14}C	0.54	0.4	0
	^{14}C	0.54	25	150
Железо	^{14}C	1.1	0.8	0
	^{14}C	1.1	30	42
Co-30 %Ni	^{63}Ni	1.0	0.9	0
	^{63}Ni	1.0	47	120

Анализ зависимости $X_{max} = f(P_{ув})$ показывает, что после достижения давлений, обеспечивающих протекание процессов пластической деформации, наблюдается реализация массопереноса глубина которого возрастает с увеличением амплитуды ударной волны. При росте динамических давлений зависимость глубины проникновения от $P_{ув}$ уменьшается, однако, при достижении давлений близких $P_{кр}$ в зависимости $X_{max} = f(P_{ув})$ существует точка перегиба. В интервале

$P_{ув} > P_{кр}$ снова наблюдается интенсивное увеличение глубины массопереноса, затем зависимость $X_{max} = f(P_{ув})$ также ослабевает. Наличие особой точки зависимости может быть связано с изменением конфигурации фронта ударной волны при превышении скоростью пластической волны скорости звука в несжатой среде. Это наблюдается при достижении критических значений динамических давлений, совпадающих с соответствующими $P_{кр}$ в зависимостях $X_{max} = f(P_{ув})$.

Увеличение $\tau_{ув}$ определяет длительность промежутка времени в течение которого элемент объема нагружаемого материала находится в состоянии сжатия до $P \sim P_{ув}$ и обладает термодинамическими характеристиками, соответствующими такому состоянию. Изменение длительности импульса сжатия не вызывает изменений в процессах, протекающих во фронте ударной волны. Вместе с тем, при увеличении длительности импульса сжатия $\tau_{ув}$ происходит релаксация деформационной структуры металлов к более равновесному распределению дислокаций. Наблюдаются изменения аналогичные происходящим при возрастании амплитуды ударной волны: формируются стенки дислокационных ячеек, достигается более равномерное распределение точечных дефектов и их скоплений. Диапазон длительностей импульса сжатия, используемых в экспериментах, был ограничен от 1 до 18 мкс. Полученные результаты дают основания считать, что изменение длительности импульса сжатия не оказывает значительного влияния на глубину проникновения ^{55}Fe и ^{63}Ni в медь, никель и молибден. Анализ изменений характеристик концентрационных профилей перераспределения элементов покрытий в зоне массопереноса от длительности импульса сжатия показывает, что увеличение $\tau_{ув}$ приводит к возрастанию параметра C_0 при постоянстве α (аппроксимирующая функция вида (I)).

Полученные результаты и их сопоставление с литературными данными дают основания считать, что глубину массопереноса, в основном, определяет амплитуда плоской ударной волны. Длительность импульса сжатия слабо влияет на эту характеристику зоны массопереноса. Увеличение амплитуды ударной волны, определяющее плотность структурных дефектов, их взаимодействие, характеристики фронта ударной волны и температуру металлов при ударном сжатии и после разгрузки, приводит к уменьшению параметра α и немонотонному возрастанию C_0 . Изменение $\tau_{ув}$ сопровождается постоянством α и увеличением C_0 при больших длительностях импульса сжатия. Сопоставление таких закономерностей с соответствующими структурными

изменениями дает основания считать, что значения параметра α определяются процессами, происходящими во фронте ударной волны, а величина C_0 , кроме того связана с протеканием структурной релаксацией неравновесной деформационной структуры металлов, сформированной во фронте ударной волны.

Установленные закономерности дают основания считать, что массоперенос в металлах при прохождении плоских ударных волн происходит только при развитии в волне сжатия процессов пластической деформации. При этом увеличение амплитуды динамических давлений приводит к интенсификации как массопереноса, так и структурных изменений, обеспечивающих такую деформацию. Процессы динамического возврата, вызываемые прохождением ударной волны, не оказывают определяющего влияния на перераспределение элементов в таких условиях нагружения.

Известны различные стадии деформации и виды пластических течений, возникающие в условиях взрывной обработки. Это позволило сделать попытку локализации во времени протекания процессов массопереноса, стимулированного ударной волной, путем установления зависимости процесса перераспределения элементов покрытий в металле от условий деформирования области материала, в которой формируется зона массопереноса.

Условия деформирования изменяли путем помещения образцов в различные условия сохранения при ударном сжатии. Полученная зависимость $X_{\max} = f(\epsilon)$ свидетельствует, что в интервале остаточных степеней деформации от 20 до 45 % с ростом ϵ наблюдается уменьшение глубины проникновения. Следует отметить, что такая зависимость не наблюдалась при других способах нагружения, не обеспечивающих генерирование ударной волны. Обнаруженная закономерность может быть объяснена на основе одного из следующих вариантов:

- протекание пластической деформации отрицательно влияет на элементарные акты, обеспечивающие протекание массопереноса
- зависимость размера зоны массопереноса $X_{\max} = f(\epsilon)$ не связана с особенностями этого процесса, а вызвано изменениями уже сформированной зоны массопереноса при пластической деформации.

Из более ранних исследований известно, что пластическая деформация со скоростями до 10^4 с^{-1} не оказывает на массоперенос отрицательного влияния, если не предшествует его протеканию в металле. О положительном влиянии на массоперенос пластической деформации свидетельствуют и результаты в которых показано, что

при отсутствии пластической деформации, когда интенсивность нагружения обеспечивает только упругое сжатие, массоперенос не наблюдается. Это дало основания считать, что более вероятным является второй вариант объяснения наблюдаемой зависимости $X_{\max} = f(\epsilon)$. По-видимому, формирование зоны массопереноса происходит на стадии нагрузки. При этом зона массопереноса, сформированная в ударной волне, будет продеформирована в условиях боковой разгрузки и увеличение степени деформации вызовет соответствующее уменьшение зоны массопереноса. Истинную глубину проникновения $X_{\max}$ можно рассчитать исходя из соотношения:

$$X_{\max} = X'_{\max} / (1 - \epsilon) \quad (2)$$

где $X'_{\max}$ - глубина массопереноса в образце со степенью остаточной деформации ϵ . Если при этом учесть, что приповерхностный слой в таких условиях деформируется больше, чем более глубокие, то зависимость истинной глубины проникновения от степени остаточной деформации будет характеризоваться прямой параллельной оси абсцисс. Таким образом, из анализа полученных результатов следует, что экспериментально наблюдаемое уменьшение $X_{\max}$ с ростом степени остаточной деформации становится понятным, если процесс массопереноса рассматривать как процесс, протекающий в ударной волне. При этом, пластическая деформация происходит в уже сформировавшейся зоне массопереноса и приводит к уменьшению размера зоны массопереноса.

При проникновении высокоскоростного ударника в металлическую матрицу на границе их взаимодействия реализуются условия высокоскоростной деформации скорость которой зависит от скорости ударника и его плотности. Однако, ударная волна, генерируемая в таких условиях движется на некотором расстоянии от поверхности взаимодействия. При этом формирование области взаимодействия контакта материалов преграды и ударника происходит в условиях высокоскоростного деформирования при высоких давлениях. Скорость деформирования в таких условиях остается столь же высокой, как и при прохождении фронта ударной волны, но отсутствует влияние самого фронта. Металлографический и микрорентгеноспектральный анализ особенностей распределения меди в области вблизи поверхности канала проникновения, образованного медной кумулятивной струей ($v_y = 5.3$ км/с) в материале преграды позволяет отметить, что глубина проникновения меди в ст.3 не превышает 15 мкм от поверхности канала. Образование новых фаз, соответствующих системе медь-железо,

в зоне массопереноса не обнаружено. Зависимость концентрации меди от глубины X является гладкой функцией, близкой к зависимости (I), однако показатель степени n при этом составляет 1.5-1.8. Аналогичный характер имеет и зона массопереноса свинца в стали 45, сформированная в условиях близких к предыдущим ($v_y \sim 2$ км/с). Размер зоны массопереноса не превышает 10 мкм. При этом, однако, концентрация свинца в стали 45 достигает 3%, что значительно превышает предел его растворимости в железе. Образование прослоек новых фаз в зоне массопереноса также не обнаружено.

При взаимодействии алюминиевой преграды с плотным порошковым лайнером (пористость 10-15%) WC (30 мас. %) + Ga (70 мас. %) после соударения ($v_y = 5500$ м/с; 8200 м/с) междофазных границ в области сформировавшегося покрытия на поверхности кратеров также не обнаружено. Вблизи зоны контакта галлия и алюминия наблюдается неоднородная по толщине зона массопереноса галлия в алюминии, при этом $X_{\max}$ не превышает 10 мкм. Концентрация галлия в зоне массопереноса не превышает 10 ат.%. Образования новых фаз в зоне массопереноса не обнаружено. Анализируя особенности образованных зон массопереноса, следует отметить, что глубина проникновения массопереноса неоднородна по поверхности образованных кратеров. Область максимальных значений $X_{\max}$ расположена в направлении, составляющем угол $\sim 45^\circ$ к вектору скорости ударника. При этом возрастание скорости ударника на $\sim 60\%$ приводит к увеличению максимальных значений глубины проникновения галлия на 20%.

Анализ особенностей распределения элементов порошковой частицы в радиальном направлении с помощью микрорентгеноспектрального анализа показывает, что размер зоны массопереноса, протекающего в этом направлении, составляет для неметаллических компонент частиц 4-6 мкм и характеризуется зависимостью близкой к экспоненциальному спаду концентрации легирующих элементов с увеличением расстояния от центра канала (точный функциональный анализ затруднен из-за малых значений размеров зоны массопереноса). Концентрация металлических компонент порошкового материала в области каналов на порядок ниже, чем неметаллических. Металлическая компонента в большей степени сохраняется в порошковых частицах и значительно меньше расходуется при их движении. Распределение легирующих элементов в феррите и перлите отличаются незначительно. Расходование неметаллической компоненты значительно увеличивается при взаимодействии порошковых частиц с прослойками неметаллических

фаз типа сульфидов.

Полученные результаты показывают, что при пластической деформации со скоростями близкими к скорости деформации в ударной волне процессы массопереноса также наблюдаются. Однако, при формировании зоны массопереноса в условиях прохождения фронта ударной волны глубина массопереноса значительно больше. Это также дает основания считать, что основной вклад в формирование зоны массопереноса при прохождении ударных волн вносят процессы, происходящие во фронте нагрузки.

Следует отметить, что во многих случаях импульсных нагружений волна напряжений, генерируемая при сжатии не является плоской. В этих условиях нагружаемый материал испытывает во фронте ударной волны не одноосную, а трехосную деформацию. Общие закономерности, характерные для формирования зоны массопереноса Ni^{63} , Fe^{55} , Cs^{137} в железе, меди, сплаве ВТ4 и вольфраме в условиях прохождения ударных волн с малым начальным радиусом расхожимости (сравнимым с глубиной массопереноса), заключаются в сохранении зависимости $X_{\text{max}} = f(P_{\text{ув}})$, наблюдаемой при прохождении плоских ударных волн. Особенностью влияния таких условий нагружения является изменение вида концентрационных профилей распределения проникающих элементов покрытий, аппроксимирующихся не экспонентой (I), а функцией близкой к функции Гаусса. Это, по-видимому, связано с быстрым затуханием сферических ударных волн с малым радиусом расхожимости. Образование новых фаз в зоне массопереноса не наблюдается.

Анализ структурных особенностей зоны контакта в биметаллических системах Ст.45 - Cu, Cu - Sn, Ст.45 - Pb после прохождения конических ударных волн, показывает, что зоны массопереноса имеют характерный размер от 15 до 35 мкм. Концентрационные профили меняются по мере распространения ударной волны в биметаллической системе; для них характерна зависимость типа (I), где параметр n изменяется от 0.7 до 3.1 при увеличении угла между фронтом волны и поверхностью контакта металлов. При достижении таким углом значений $\sim 90^\circ$ зона массопереноса практически не разрешима. Это согласуется с результатами полученными ранее в работе В.М.Фальченко, где показано, что скользящая волна оказывает значительно меньшее влияние на массоперенос, чем плоская. Параметр β слабо изменяется и в большинстве случаев принимает значения близкие 0.025 мкм^{-1} . Образование новых фаз в зоне массопереноса наблюдается только в

областях, для которых угол между фронтом волны нагрузки и поверхностью контакта находится в интервале $20-30^{\circ}$. Образующиеся фазы не соответствуют по составу равновесной фазовой диаграмме и из-за малой толщины не могут быть проанализированы методами рентгеноструктурного анализа.

При формировании зоны массопереноса в условиях косоугольного соударения плоских пластин из меди, никеля и сталей также наблюдается формирование зоны массопереноса. Вместе с тем, в таких условиях нагружения затруднительно разделить массоперенос, вызываемый непосредственно ударной волной и струйными течениями, возникающими на линии контакта метаемой пластины и металлической матрицы. Экспоненциальный рост ширины зоны массопереноса с увеличением исходного расстояния между соударяющимися поверхностями свидетельствует о преимущественном влиянии на формирование зоны массопереноса в этих условиях струйных течений.

Таким образом при воздействии на область контакта двух металлов расходящихся ударных волн закономерности, характерные для массопереноса в плоских ударных волнах принципиально не изменяются. В случае сходящихся ударных волн значительное влияние на формирование зоны массопереноса могут оказывать струйные течения, возникающие в таких условиях. Процессы фазообразования происходят преимущественно в условиях существования струйных течений, вызывающих значительный разогрев тонких приграничных соударяющихся слоев и приводят к формированию метастабильного фазового состава, часто не имеющего аналогов в квазиравновесных условиях.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что формирование зоны массопереноса в металлах в условиях взрывных воздействий может происходить за счет различных процессов. При прохождении плоских или расходящихся ударных волн перераспределение элементов осуществляется преимущественно за счет процессов, связанных с реализацией пластической деформации во фронте ударной волны, при сопутствующем слабом влиянии релаксационных процессов в деформированном кристалле. В условиях прохождения косых и сходящихся ударных волн значительное влияние на массоперенос оказывают процессы типа турбулентного перемешивания, значительно изменяющие характер распределения элементов в зоне массопереноса.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния исходной структуры и свойств металлов и сплавов на массоперенос при прохождении плоских ударных волн. Установление таких

закономерностей является одним из путей решения задачи установления элементарных актов пластической деформации, ответственных за протекание массопереноса. В частности, увеличение исходной плотности структурных дефектов в меди при предварительной пластической деформации приводит к подавлению двойникования и реализации деформации за счет скольжения дислокаций по разнообразным системам скольжения. На примере изучения массопереноса ^{63}Ni в меди с различной исходной плотностью дислокаций установлено, что увеличение дефектности кристалла приводит к уменьшению массопереноса. Наблюдаемые изменения могут быть связаны как с изменением механизма пластической деформации, так и с тем, что увеличение начальной плотности структурных дефектов приводит к уменьшению прироста их количества в условиях прохождения ударной волны. Кроме того, дополнительные структурные дефекты могут являться препятствием при реализации элементарных актов массопереноса, как это предполагается в условиях деформации с меньшими скоростями.

Анализ особенностей перераспределения ^{63}Ni в сплавах на основе кобальта и никеля позволил установить, что даже небольшое изменение содержания никеля приводит к значительному изменению глубины массопереноса. Изучение фазовых и структурных изменений в таких сплавах при взрывной обработке позволили установить, что увеличение содержания никеля от 27 до 33 мас.% Ni в сплаве Co-Ni уменьшается количество и размер пластин ϵ' -фазы, образующейся при нагружении. В участках непревратившейся α -фазы повышается плотность дислокаций, образуются линии скольжения и ячеистая дислокационная структура. В этом интервале концентраций увеличение % Ni приводит к уменьшению глубины массопереноса. Это объяснено на основе учета известной закономерности более интенсивного массопереноса в ГПУ кристаллической решетке по сравнению с ГЦК-решеткой. Уменьшение количества ϵ' -фазы (ГПУ), в которой массоперенос может протекать более интенсивно, по-видимому, и обуславливает наблюдаемую зависимость.

Увеличение глубины проникновения ^{63}Ni при возрастании %Ni до 40-42% связано с прекращением распада фронта ударной волны, вызванного $\alpha \rightarrow \epsilon'$ переходом. Образование ϵ' -фазы в таких сплавах практически не наблюдается. Правильность такого объяснения подтверждена установленными закономерностями изменений зоны массопереноса ^{63}Ni в меди, вызванного ударными волнами с

различными конфигурациями фронта нагрузки. Расщепление фронта нарастания давления на две или три волны приводит к уменьшению глубины массопереноса.

Дальнейшее повышение содержания никеля в сплаве Co-Ni до уровня 100% вызывает значительное возрастание энергии дефекта упаковки и в результате - изменение механизма деформации, на скопление дислокаций. При этом глубина массопереноса значительно уменьшается. По-видимому, и в данном случае протекание процессов деформации сдвигового типа создает условия благоприятные для массопереноса при прохождении плоских ударных волн.

Исследования массопереноса ^{63}Ni в аморфном сплаве $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ при прохождении плоских ударных волн показали, что в некристаллическом состоянии материала этот процесс либо не протекает, либо происходит значительно менее интенсивно, чем в кристалле.

При установлении температурной зависимости массопереноса в условиях импульсной деформации проведен анализа соответствующих закономерностей в трех видах импульсных нагружений: при прохождении плоских ударных волн; при высокоскоростной деформации $\dot{\epsilon} \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$ и при взаимодействии высокоскоростного потока с металлической преградой. В результате проведенных экспериментов установлено, что при понижении исходной температуры железа и его сплавов с никелем до уровня $T < 100 \text{ K}$ наблюдается значительное увеличение глубины проникновения элементов покрытий (^{55}Fe , ^{60}Co , ^{63}Ni) вызванного высокоскоростной деформацией $\dot{\epsilon} \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$. Аналогичная зависимость наблюдается и при массопереносе в условиях проникновения высокоскоростных ударников в железную преграду.

Анализ концентрационных профилей распределения ^{63}Ni в металлах после прохождения ударных волн в меди и никеле с исходной температурой 77 K и 180 K, показал, что уменьшение исходной температуры металлической матрицы практически не оказывает влияния на массоперенос, обусловленный действием ударной волны. Различия в наблюдаемых закономерностях могут быть связаны с особенностями протекания процессов деформации при таких видах импульсного нагружения. Как было показано выше, массоперенос протекает в более благоприятных условиях при подавлении процессов скольжения, альтернативой которым является двойникование и образование плоских дефектов кристаллического строения. Переход к деформированию металлов ($\dot{\epsilon} \sim 10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$) при низких температурах приводит к

развитию двойникования образованию дефектов упаковки, т.е. протеканию благоприятных для массопереноса процессов деформации. Прохождение плоской ударной волны ($P_{ув} = 25-30$ ГПа) в меди и никеле и при обычных начальных температурах (300 К) приводит к созданию большого количества таких дефектов. Именно поэтому, по-видимому, уменьшение температуры не оказывает существенного влияния на массоперенос в меди и никеле.

Изменение ориентации монокристаллов сильно, влияет на особенности протекания элементарных актов, обуславливающих реализацию пластических течений. Это вызвало интерес к осуществлению анализа возможных изменений в зонах массопереноса, формируемых при прохождении ударных волн в монокристаллах с различной кристаллографической ориентацией. В таблице 2 представлены основные результаты исследования массопереноса ^{14}C и ^{63}Ni в монокристаллах цинка, молибдена и алюминия, имеющих различную ориентацию по отношению к фронту ударной волны. При нагружении кристаллографическое направление, указанное в таблице 2 соответствовало направлению вектора $D_{ув}$, а плоскость поверхности контакта материала монокристалла с радиоактивным покрытием, была перпендикулярна $D_{ув}$.

Таблица 2 Изменение глубины проникновения атомов ^{63}Ni в монокристаллах молибдена и ^{14}C в монокристаллах алюминия и цинка различной ориентации при прохождении плоских ударных волн

Монокристалл	Ориентация	$P_{ув}$, ГПа	$\langle X_{max} \rangle$, мкм
Mo	[100]	50	6.2
Mo	[110]	50	3,7
Mo	[111]	50	9.2
Al	[110]	25	80
Al	[111]	25	150
Zn	[1010]	30	130
Zn	[1011]	30	105
Zn	[1124]	30	84

Совокупность закономерностей протекания массопереноса в металлах при прохождении плоских ударных волн в металлах и сплавах с различными свойствами металлической матрицы позволяет констатировать, что этот процесс сильно, зависит от особенностей кристаллической структуры. Увеличение ее дефектности приводит к

уменьшению глубины проникновения меченых атомов вплоть до практически полного подавления массопереноса в аморфных сплавах. Протекание в сплавах фазовых переходов, приводящих к распаду волны нагрузки, отрицательно влияет на процессы перераспределения элементов в металлических материалах при прохождении ударных волн. Вместе с тем, увеличение количества мартенситной фазы, образующейся в металлической матрице, при ударном сжатии, вызванное изменением элементного состава или понижением температуры сопровождается интенсификацией массопереноса. Уменьшение температуры оказывает значительное влияние на процессы миграции атомов только в случае определяющего влияния этого фактора на механизм пластической деформации. При деформировании металлов в ударной волне ($\dot{\epsilon} \sim 10^{-10} \text{ с}^{-1}$) такого влияния не наблюдается, в отличие от меньших скоростей деформации, при которых в области низких температур происходит переход от скольжения к двойникованию и образованию плоских дефектов кристаллического строения. Для протекания массопереноса в монокристаллах различной ориентации в условиях прохождения плоских ударных волн характерна анизотропия, наблюдаемая в монокристаллических металлах при развитии процессов пластической деформации. Полученные результаты дают основания считать, что процесс массопереноса непосредственно связан с элементарными актами пластической деформации во фронте ударной волны. При этом для реализации массопереноса при ударном сжатии нагружения более благоприятными являются условия реализации пластической деформации во фронте ударной волны не путем скольжения дислокаций, а при реализации сдвига.

В пятой главе приведены результаты исследований физической природы массопереноса в металлах и сплавах при прохождении плоских ударных волн.

Поскольку прохождение ударной волны является быстротекущим процессом, фиксировать процессы, непосредственно происходящие в ней, можно только по косвенным признакам, а именно: по изменению структуры и свойств материала после ударного сжатия, а также по характеристикам ударной волны. В этой связи, для установления механизма реализации процессов перераспределения элементов в металлических материалах в условиях ударного сжатия необходимо проанализировать основные особенности структуры и свойств материалов в области зоны массопереноса. При прохождении ударных волн через область контакта двух металлов наблюдается

образование переходной зоны с изменяющейся концентрацией компонентов. В случае, когда ударная волна, вызывающая массоперенос имеет плоский невозмущенный фронт нарастания давления, зона перераспределения контактирующих металлов является однородной в направлениях параллельных плоскости фронта нагрузки и имеет вид близкий диффузионной зоне взаиморастворимых элементов, образованной в результате протекания объемной диффузии. Для определения особенностей распределения ^{57}Fe в титане использовали методику послыйного анализа с использованием КЭМ - спектроскопии. Анализ особенностей полученных спектров дает основания считать, что до глубины ~ 8 мкм в регистрируемом спектре преобладает сикстет металлического железа, а на глубинах от 12 до 30 мкм - парамагнитный пик железа в $\alpha\text{-Ti}$. На глубине ~ 30 мкм изомерный сдвиг парамагнитной линии соответствует аналогичному сдвигу (0.34 ± 0.06 мм/с), наблюдаемому на глубине ~ 190 мкм при деформировании ($\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ сек}^{-1}$) в условиях повышенных температур. Сопоставление концентрационных профилей распределения железа в титане с соответствующим КЭМ-спектрами позволяет сделать заключение о том, что значительная часть железа (до 80% площади под концентрационной кривой) в зоне массопереноса характеризуется ферромагнитным сикстетом металлического железа. Вместе с тем, в области наибольших глубин ферромагнитное железо не обнаружено. Полученные результаты несколько отличаются от закономерностей, ранее полученных при исследовании массопереноса в условиях $\dot{\epsilon} \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$. При таком нагружении толщина слоев содержащих ферромагнитные скопления пренебрежимо мала по сравнению с глубиной массопереноса. Таким образом в зоне массопереноса, образовавшейся при прохождении плоской ударной волны, на малых глубинах атомы железа находятся в комплексах, обладающих ферромагнитными свойствами; на больших глубинах, сравнимых с максимальной глубиной массопереноса, железо находится в парамагнитном состоянии. Вероятно, при достижении максимальных глубин проникновения реализуется механизм перераспределения элементов, обеспечивающий формирование структурного состояния близкого к твердому раствору железа в титане, обладающего парамагнитными свойствами.

При определении особенностей деформационной структуры зоны массопереноса обнаружено, что в зоне массопереноса цинк-медь, образованной в результате прохождения ударной волны ($P_{\text{ув}} = 25$ ГПа; $\tau_{\text{ув}} = 2.8$ мкс), наблюдаются следы деформации, имеющие вид аналогичный

таким следам в меди. Условия сохранения образцов в условиях эксперимента исключали прохождение через зону массопереноса отраженной ударной волны. Наличие следов деформации свидетельствует о том, что формирование зоны массопереноса происходит, в основном, до разгрузки материала в этой области. Близкий по физическому смыслу результат наблюдается и при прохождении плоской ударной волны большей амплитуды ($P_{ув} = 40 \text{ ГПа}$). В области границы контакта меди и зоны Cu-Zn, образованной при прохождении ударной волны наблюдаются следы динамической рекристаллизации, происходящей в этом диапазоне динамических давлений. Для протекания такой рекристаллизации в зоне массопереноса ее формирование, в основном, должно быть завершено до разгрузки.

В большинстве случаев формирования зоны массопереноса в условиях прохождения ударных волн в этой области не наблюдается образования новых фаз. Исключение составляют волны неплоских конфигураций, вызывающие нестационарные пластические течения - высокоскоростные кумулятивные струи, косые ударные волны с высокой скоростью точки контакта и достаточно больших углах между соударяющимися пластинами. В других случаях образование новых фаз в области контакта двух металлов с ограниченной взаимной растворимостью требует дополнительных условий.

Цикл исследований закономерностей формирования фазового состава зоны массопереноса в области контакта двух металлов при прохождении плоских ударных волн на примере анализа систем Fe-Cu, Zn-Cu, Sn-Cu позволил установить, что для фазообразования в зоне массопереноса критическим параметром является время образования зародышей новой фазы. Развитие фронта нагрузки за счет возмущений, вызываемых шероховатостью поверхностей, концентрационными микронеразностями или микропорами на пути ударной волны до $t > t_{мкс}$ обеспечивает зарождение и рост новых фаз в зоне массопереноса. В других случаях в области контакта металлов с ограниченной растворимостью наблюдается образование метастабильных пересыщенных твердых растворов. Рост фаз в условиях прохождения плоских ударных волн возможен также и при наличии их прослоек в исходном состоянии.

Таким образом, установлено, что для образования новых фаз в зоне массопереноса, сформированной при прохождении плоских ударных волн через область контакта металлов с ограниченной взаимной растворимостью необходимо либо наличие зародышей этих фаз, либо

внесение геометрических искажений фронта ударной волны, позволяющее увеличить длительность воздействия такого фронта на область контакта металлов.

Проведенный анализ закономерностей формирования зоны массопереноса при прохождении ударных волн дает основания считать, что протекание этого процесса в значительной мере определяется явлениями, происходящими во фронте ударной волны. В этой связи в качестве основы для теоретического описания этого процесса была использована гидродинамическая теория ударных волн в сплошных средах Ранкина-Гюгонио. При этом протекание массопереноса было учтено путем введения дополнительной вязкой составляющей давления:

$$P_{vis} = (P_{ув}^2 - s^2) \frac{(V_0 - V)(V - V_{ув})}{V_0^2 (V_0 - V_{ув})} \quad (3)$$

где S – скорость звука в несжатой среде; $D_{ув}$ – скорость ударной волны; V – удельный объем (обратная плотность); P_0 , V_0 – характеристики сжимаемой среды перед фронтом ударной волны, а $P_{ув}$, $V_{ув}$ – за фронтом. Предполагалось, что зависимость P_{vis} может быть представлена с использованием вязкости во фронте нагрузки η стандартным образом:

$$P_{vis} = \eta j \frac{dV}{dx} \quad (4).$$

При ударном сжатии металла динамическая вязкость η зависит от многих факторов: миграции отдельных атомов и их скоплений, перемещения линейных дефектов, сдвига атомных плоскостей и т. д. Вместе с тем, измерения динамической вязкости η в ударных волнах, распространяющихся в алюминии и свинце в работах Минеева показали, что в пределах динамических давлений 10 – 100 ГПа ее изменения незначительны и не превышают величин $\Delta\eta \sim 10^2 - 10^3$ Па с. Подставляя (4) в (3) можно получить выражение характеризующее профиль фронта ударной волны:

$$V(x) = \frac{V_0 + V_{ув}}{2} + \frac{V - V_{ув}}{2} \operatorname{th} \frac{x}{\delta_{ув}}; \quad \delta_{ув}^2 \eta \frac{V_0 - V_{ув}}{V_{ув}^2 - s^2}; \quad (5)$$

$$P_{vis} = \eta j \frac{V_0 - V_{ув}}{2\delta_{ув}} \operatorname{ch}^{-2} \left(\frac{x}{\delta_{ув}} \right).$$

При этом предполагалось, что динамическая вязкость в области фронта ударной волны шириной $\delta_{ув}$ является константой.

Наличие вязкой компоненты напряжений предусматривает, что перенос импульса в ударной волне совершается не только за счет упругих межатомных соударений, но и за счет перемещения атомов или их комплексов во фронте. Существенно, что это перемещение не может

быть обеспечено диффузией, поскольку при этом частота атомных перескоков должна иметь порядок:

$$\omega \approx (D_{\text{ув}}^2 - s^2) / a_0^2 D_{\text{ув}} \approx 10^{18} 10^{19} \text{с}^{-1}$$

(a_0 - постоянная решетки), а величина ω в кристалле может достигать значений на пять порядков меньше, чем в данной оценке.

Для теоретического описания массопереноса выбран объем с толщиной вдоль оси X меньшей ширины фронта $\delta_{\text{ув}}$ и рассмотрен вязкий поток частиц через этот объем. Поскольку вклад диффузии мал, вязкий поток массы в направлении распространения волны будет значительно превосходить его значение в противоположном направлении и можно принять, что в этом вязком перемещении атомов они движутся только в одном направлении. Тогда изменение массы δM в выбранном объеме за время dt в координатной системе, связанной с кристаллической решеткой, можно записать в виде: $\delta M = -\langle \delta j_{\text{vis}} / \delta x \rangle \langle m / \rho \rangle dt$, где ρ - плотность в этом объеме. Уравнение перераспределения элементов в системе координат связанной с кристаллом имеет вид:

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = - \frac{j_{\text{vis}}}{\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \quad (6)$$

Решение этого уравнения должно учитывать граничные условия и может быть получено численно. Следует отметить, что для сопоставления с экспериментальными данными достаточно определения асимптотики убывания концентрации меченых атомов после прохождения ударной волны: $c(x, \infty) = c(x)$. Интегрируя (6) по t , используя тот факт, что первоначально для $x > 0$ $c(x, -\infty) = 0$, получаем уравнение:

$$c(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{j_{\text{vis}}(x, t)}{\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} \quad (7)$$

Используя для оценки $C(X)$ теорему о среднем получим:

$$c(x) = \gamma_1 \delta_{\text{ув}} \frac{\partial c(x)}{\partial x}; \quad \delta_{\text{ув}} = \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{j_{\text{vis}}(x, t)}{\rho(x, t)}, \quad (8)$$

где численный коэффициент γ_1 имеет величину порядка единицы. Отсюда получаем: $c(x) = c(0) \exp(-x/\delta_1)$. Таким образом концентрация исходно неоднородно распределенной компоненты после прохождения ударной волны будет характеризоваться экспоненциальным спадом. Концентрационный профиль распределения не сильно зависит от начальных условий и определяется преимущественно величиной $\delta_{\text{ув}}$. Определить $\delta_{\text{ув}}$ можно из выражения:

$$\delta_{\text{ув}} = (V_0 - V_{\text{ув}}) \eta / D_{\text{ув}} = (P_{\text{ув}} - P_0) v_0^2 \eta / D_{\text{ув}}^3.$$

Для ударных волн с параметрами $P_{\text{ув}} - P_0 \sim 10-100$ ГПа, $D_{\text{ув}} \sim (5-7) \cdot 10^3$ м/с величина $\delta_{\text{ув}} \sim 1-10$ мкм, что согласуется как с экспериментальными данными измерений ширины фронта ударной волны в

металлах, так и с характерными концентрационными профилями распределения элементов в зоне массопереноса.

Таким образом, используя гидродинамическую теорию ударных волн в сплошных средах, при дополнительном учете вязких процессов во фронте ударной волны, осуществляемых за счет перемещения микроскопических элементов объемов среды, в которой распространяется ударная волна, удается удовлетворительно объяснить перераспределение элементов вблизи исходных концентрационных неоднородностей. Следует отметить, что проведенный анализ не предусматривал какого-либо микроскопического механизма перераспределения атомов во фронте ударной волны. Но он показывает, что для того, чтобы динамическая вязкость в ударной волне принимала значения близкие к экспериментальным при типичных величинах ширины фронта ударной волны в металлах в таком фронте должен осуществляться массоперенос, приводящий к формированию концентрационных профилей, близких к экспериментальным.

Известно, что затухание плоской ударной волны происходит значительно интенсивнее, чем это предусмотрено теорией. Для учета массопереноса, протекающего во фронте ударной волны, наиболее удобной является модель фронта ударной волны, предложенная М.Мейерсом. В отличие от модели Мейерса, предусматривающей только скольжение дислокаций в плоскостях скольжения, для учета протекания процесса массопереноса в работе рассмотрено перемещение краевых дислокаций путем переползания. При этом массоперенос осуществляется при переползании краевых дислокаций, рождающих при движении вакансии, имеющих вектор Бюргерса, лежащий в плоскости фронта ударной волны. Оценки показывают, что условия во фронте ударной волны обеспечивают возможность такого силового переползания, не лимитированного диффузией. Учет таких процессов позволяет достичь практически полного совпадения экспериментальных и расчетных зависимостей энергии ударной волны от пройденного расстояния.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что массоперенос в металлических кристаллических материалах при прохождении плоских ударных волн может быть условно разделен на две стадии: перераспределение элементов за счет процессов, протекающих во фронте ударной волны, и развитие процессов миграции атомов при квазистатическом сжатии и в волне разгрузки.

Анализ возможных элементарных актов, способных обеспечивать массоперенос показывает, что наиболее вероятным является

превалирующий вклад в этот процесс коллективных перемещений атомных скоплений во фронте ударной волны (в частности, переползание краевых дислокационных диполей, ступенек и петель межузельного типа, пачек скольжения). Процессы миграции точечных дефектов, характерные для условий деформации с меньшими скоростями, хотя и вносят некоторый вклад в формирование зоны массопереноса, но становятся существенными, по-видимому, только на стадии структурной релаксации. Такие представления не только согласуются с основными закономерностями массопереноса при ударном сжатии, но и позволяют объяснить большие значения ширины фронта ударной волны и вязкости, а также интенсивное затухание ударных волн в нагружаемых металлах и сплавах измеренные в работах других авторов.

В шестой главе проанализировано влияние процессов массопереноса на механические свойства металлических материалов, подвергнутых взрывной обработке.

Биметаллические соединения, полученные с помощью взрывной обработки находят широкое применение в машиностроении. Однако, в отличие от сварки ударом в вакууме, сварка взрывом часто приводит к охрупчиванию материала в области сварного соединения. В ряде случаев взрывное плакирование металлов не имеет альтернатив, поскольку позволяет соединять металлические поверхности больших площадей, что недостижимо другими методами. Проблеме образования интерметаллидов в области контакта свариваемых взрывом металлов посвящено много работ. Вместе с тем, задача уменьшения образования химических соединений не является единственной. Нами исследованы особенности структуры и механических свойств соединений Х18Н10Т-ст.45-Х18Н10Т, Х14АГ15-ст.45-Х14АГ15, Х18АГ12-ст.45-Х18АГ12, полученных сваркой взрывом. Правильно выбранные режимы взрывной обработки позволяют значительно уменьшить количество образующихся интерметаллидов, однако, структурные исследования металла в области соединения Х18Н10Т-ст.45-Х18Н10Т показали, что в этой зоне кроме образования умеренного количества интерметаллидов наблюдается обеднение металлической матрицы легирующими элементами (Cr, Ni). Этот процесс определяется протеканием массопереноса и связан, по-видимому, с сегрегационными процессами хрома и никеля, приводящими к возрастанию концентрации этих элементов в дефектах упаковки. При исследовании механических характеристик полученного биметалла применена методика, предусмотренная теорией хрупкого разрушения. Результаты механических испытаний соединения Х18Н10Т-ст.45-Х18Н10Т

показывают, что интервале температур $+20^{\circ}\text{C}$ — -140°C разрушение осуществляется по ст.45. Анализ изломов свидетельствует о плавном переходе от вязкого ямочного к транскристаллитному хрупкому разрушению. При достижении температуры $T^* -140^{\circ}\text{C}$ разрушение происходит по зоне сварного шва, обедненной легирующими элементами. Для устранения концентрационной неоднородности в этой области соединения XI8NIOT-ст.45-XI8NIOT подвергали термической обработке $T = 650^{\circ}\text{C}$, позволяющей добиться равномерного распределения хрома и никеля. Это позволило понизить температуру хрупкого разрушения соединения XI8NIOT-ст.45-XI8NIOT до $T < -196^{\circ}\text{C}$ и увеличить коэффициент запаса вязкости с 1.36 до 1.8. Характерно, что разрушение при этом происходило по ст.45, т.е. зона соединения перестает быть областью вероятного хрупкого разрушения. Таким образом учет особенностей массопереноса позволил выбрать путь устранения его негативных последствий.

Аналогичные исследования соединений XI4AGI5-ст.45-XI4AGI5 и XI8AGI2-ст.45-XI8AGI2 позволили правильно выбрать оптимальный состав легированной стали. В биметаллах такого типа, получаемых сваркой взрывом, целесообразно использовать азотистые стали с умеренным содержанием азота. Таким образом, показано, что процессы миграции атомов легирующих элементов в области контакта многокомпонентного соединения, полученного сваркой взрывом являются одним из факторов, определяющих уровень механических характеристик соединений, получаемых сваркой взрывом. Их учет и регулирование путем изменения исходного состава или последующей термообработки удается достигать высокого уровня эксплуатационных характеристик.

Проведены исследования механических свойств конструкционных материалов после динамического легирования порошковыми материалами. Проникновение порошковых материалов в металлическую матрицу при реализации эффекта "сверхглубокого проникания", обнаруженного О.В.Романом и С.М.Ушеренко с сотрудниками, приводит к формированию каналов с убывающим распределением концентрации элементов частиц в радиальном направлении от центра канала. Достижение возможности динамического легирования порошковыми материалами металлов на глубину 10^{-2} — 10^{-1} м обеспечивает перспективность использования такой обработки для увеличения эксплуатационных характеристик сталей, работающих в режиме износа. Каналы, образованные частицами при динамическом легировании, в большинстве случаев имеют кристаллическую решетку когерентную с окружающей матрицей. В то же

время сравнительно высокая плотность некогерентных частиц, прекративших движение в металлической матрице на различных глубинах, оказывает значительное влияние на дислокационную структуру после импульсного нагружения и последующей термообработки. Такие порошковые частицы в объеме металлической матрицы предотвращают развитие двойникования и приводят к равномерному распределению дислокаций, образовавшихся при действии хвостовой части порошковой струи. При этом одним из факторов, оказывающих сильное влияние на механические свойства металлов после динамического легирования - упрочнение материала в области зоны массопереноса, обуславливающего расхождение порошковых частиц при их движении в сталях. Анализ достигнутых после обработки механических характеристик стали Р6М5 на основе теории хрупкого разрушения показывает, что динамическое легирование приводит к повышению опасности хрупкого разрушения при низких температурах или при наличии концентраторов напряжений. Результаты наших экспериментов показывают, что несмотря на достижение повышенных механических характеристик в условиях эксплуатации, целесообразно продолжить исследования, направленные на увеличение пластичности динамически легированных сталей.

При исследовании массопереноса в условиях формирования различного рода детонационных покрытий показано, что учет закономерностей этого процесса позволяет управлять им в условиях взрывной обработки. Это обеспечивает предотвращение образования охрупчивающих фаз в области контакта покрытие-матрица.

Особенности формирования зоны массопереноса при нанесении детонационных покрытий дали основания считать, что перспективным путем нанесения покрытий при использовании порошковых материалов может быть динамическое прессование таких материалов на металлической подложке при прохождении плоской ударной волны. На основе анализа структуры порошковых покрытий цинка и олова, нанесенных на медь методом динамического прессования ($P_{ув} \sim 25$ ГПа) установлено, что пористость получаемых покрытий в данном случае не превышает 5%, что значительно меньше, чем достигается, обычно при нанесении детонационных покрытий (15-20%). Анализ зоны перераспределения элементов покрытия и металлической матрицы дает основания считать, что при исходном размере порошковых частиц не превышающем 200 мкм и $P_{ув} < P_{кр}$ в переходной зоне интерметаллиды не образуются (где $P_{кр}$ - динамическое давление, вызывающее остаточный

разогрев, приводящий к плавлению сжимаемого материала).

Особый интерес вызывает обнаруженная возможность формирования очаговых многокомпонентных покрытий, наносимых методом динамического прессования. При этом используется смесь различных порошков, сжимаемая плоской ударной волной, трансформирующейся при взаимодействии со слоем такой смеси, в коническую сходящуюся волну. Такая схема обеспечивает высокую плотность ~100% материала покрытия, формирование необходимой переходной зоны массопереноса и достижение желаемого элементного состава приповерхностного слоя. Результаты исследований особенностей массопереноса в условиях такого ударного сжатия дают основания считать, что с помощью такого метода в перспективе могут быть получены покрытия практически любых составов.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследований особенностей массопереноса в металлах при прохождении ударных волн с различной амплитудой установлено, что перераспределение элементов покрытия и металлической матрицы осуществляется при прохождении волн сжатия с динамическими давлениями, превышающими динамический предел упругости соответствующих материалов. Увеличение амплитуды волн сжатия от 1 до 94 ГПа приводит к интенсификации массопереноса.

2. Концентрационные профили распределения элементов покрытий в металлической матрице, сформировавшиеся в результате прохождения ударных волн имеют вид: $C = C_0 \exp(-\alpha x^n)$,

где $n = 0.8-1.4$ для плоских ударных волн;

$n = 1.2-2.0$ для расходящихся ударных волн;

$n = 0.8-1.0$ для сходящихся ударных волн;

3. На примере массопереноса никеля в меди при прохождении плоских ударных волн установлено, что увеличение поверхностной концентрации проникающего элемента не изменяет аналитический вид концентрационного профиля его распределения в зоне массопереноса, но приводит к увеличению глубины его проникновения. Увеличение толщины покрытия, превышающего 0.3 мкм не приводит к изменению зоны массопереноса.

4. На примере массопереноса ^{63}Ni в никеле и ^{55}Fe в железе при прохождении плоских ударных волн показано, что перераспределение атомов (или групп атомов) в условиях ударного сжатия происходит не

только в приповерхностных областях, но и в объеме металлической матрицы

5. При взаимодействии высокоскоростных потоков металлов (свинец, медь, галлий) или порошковых материалов (WC , $WC+Ni$, NbB , TiB_2 , $MoSi$) с металлической матрицей (Fe , Al , Ст.45, Ст.3, Р6М5) глубина массопереноса в зоне контакта материалов значительно меньше, чем при прохождении ударных волн. Формирование новых фаз наблюдается только в областях турбулентного возмущения высокоскоростных потоков

6. Анализ закономерностей формирования зоны массопереноса в системах медь-цинк, медь-олово, медь-железо, железо-свинец дает основания считать, что при отсутствии в области контакта различных металлов зародышей новых фаз, необходимым условием фазообразования при прохождении плоских ударных волн является искажение фронта нагрузки до $\Delta t > 10^{-6}$ с.

7. Обнаружено, что увеличение плотности дислокаций в исходном состоянии металлической матрицы при прохождении плоских ударных волн, как и при меньших скоростях деформации (10^2-10^4 с $^{-1}$) приводит к уменьшению глубины массопереноса никеля и железа в медь

8. Уменьшение исходной температуры меди и никеля при прохождении плоских ударных волн ($\approx 10^{10}$ с $^{-1}$) не оказывает влияние на формирование зоны массопереноса, в то время, как при высокоскоростной деформации ($\approx 10^2-10^7$ с $^{-1}$) в интервале температур 95-150 К наблюдается интенсификация процессов перераспределения элементов

9. В аморфном сплаве $Co_{58}Ni_{10}Fe_5Si_{11}B_{16}$, в отличие от всех исследуемых в работе металлов и сплавов, в условиях прохождения плоской ударной волны амплитудой 12 ГПа протекания массопереноса никеля не обнаружено

10. Результаты исследований массопереноса никеля и углерода в монокристаллах молибдена, цинка и алюминия дают основания считать, что для этого процесса в условиях прохождения плоских ударных волн характерна анизотропия, наблюдаемая при развитии процессов пластической деформации.

11. Формирование зоны массопереноса в металлах при прохождении ударных волн определяется процессами перераспределения элементов в области фронта нагрузки ударной волны и последующими релаксационными процессами, связанными с возвратом кристаллической решетки к равновесному состоянию

12. Наблюдаемые концентрационные профили распределения элементов

покрытий в основном материале и особенности затухания ударной волны в никеле находят удовлетворительное объяснение на основе гидродинамической теории массопереноса в кристаллах при прохождении плоских ударных волн.

13. Особенности распределения проникающих элементов в зоне массопереноса, образовавшейся при ударном сжатии, и закономерности затухания плоских ударных волн в металлах дают основания считать, что в таких условиях процессы перераспределения элементов происходят не только за счет миграции отдельных точечных дефектов, а и путем коллективных перемещений атомных скоплений (дислокационных диполей, петель, ступенек и др.)

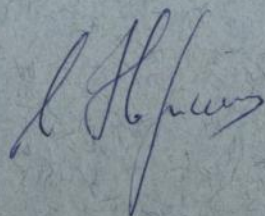
14. Основные закономерности, присущие массопереносу в металлах и сплавах при прохождении ударных волн, и представления о физической природе этого явления использованы для создания и усовершенствования технологий взрывной обработки металлических материалов

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Герцрикен Д.С., Зворыкин Л.О., Коваль Ю.Н., Фальченко В.М. Массоперенос в железе и его сплавах при низкотемпературных импульсных воздействиях// Доклады АН УССР, сер.А, №6, 1982, с.52-55
2. Зворыкин Л.О., Ревуцкий В.М., Мазанко В.Ф., Михайлов В.В., Фальченко В.М. Влияние параметров импульсного разряда на распределение элементов электродов в электроискровых покрытиях// Электронная обработка материалов, 1983, №1, с.22-24
3. Зворыкин Л.О., Мазанко В.Ф. Исследование подвижности атомов в металлах при электроискровом воздействии// В кн.: Новые порошковые и композиционные неорганические материалы, Киев. ИГиМ АН УССР, 1983, с.53-58
4. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М. О природе массопереноса в твердых телах в условиях импульсного нагружения// Инженерно-физический журнал, 1983, т.45, №1, с.118-123
5. Зворыкин Л.О., Мазанко В.Ф., Пашков П.О., Порозов Ю.В., Фальченко В.М. Влияние амплитуды ударной волны на подвижность атомов в молибдене и меди// Металлофизика, 1984, т.6, №1, с.118-119
6. Зворыкин Л.О., Мазанко В.Ф. Подвижность атомов при воздействии электрического разряда высокой мощности// В кн.: Структура и свойства порошковых материалов на основе тугоплавких металлов и соединений, Киев. ИГиМ АН УССР, 1984, с.122-125

7. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М. Особенности перераспределения элементов в металлах при прохождении ударных волн// В кн.: Труды III Всесоюзной конференции Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Киев, 1985, с.92-94
8. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М. Влияние импульсных нагрузок высокой мощности на процесс миграции атомов в металлах// Вестник АН УССР, 1986, N10, с.42-48
9. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М. Особенности миграции атомов в металлах при прохождении ударных волн// В кн: Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов, Киев, 1986, с.153-165
10. Зворыкин Л.О., Румянцев Б.В., Фальченко В.М., Филатов А.В. Влияние остаточной деформации на массоперенос никеля в меди при прохождении ударных волн//Металлофизика, 1987, т.9, N4, с.110
11. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М. Влияние импульсных нагрузок на подвижность атомов в металлах и сплавах//Механизмы упрочнения и свойства металлов.-Тула:ТулПИ, 1988, с.141-146
12. Зворыкин Л.О., Румянцев Б.В., Фальченко В.М., Филатов А.В. Особенности перераспределения атомов в системе $Ni-^{63}Ni-Ni$ при прохождении ударных волн//Металлофизика, 1989, т.9, N3, с.123-124
13. Зворыкин Л.О., Румянцев Б.В., Фальченко В.М., Филатов А.В. Закономерности изменения зоны массопереноса в металлах, деформированных взрывом, в различных условиях деформации//Тр. IV Всесоюзн. совещ.по детонации. Доклады, Т.1, М., 1988, с.90-96
14. Дерентович Г., Врубель Ю., Зилковски З., Фальченко В.М., Зворыкин Л.О. Влияние свойств соединений Cu-Ni-Cu на характер изменений ЭДС при их ударном нагружении//В кн.: Доклады IV Всесоюзного совещания по детонации. Телави-1988, т.2, с.170-175
15. Falczenko V.M., Zworykin L.O., Derentowicz H., Wrobel J., Ziolkowski Z. Wplyw wlasciwosci zlacz Cu-Ni-Cu na charakter zmian SEM przy ich uderzeniowym obciazeniu//BWAT.-XXXVIII, nr.10(434), 1988,- p.43-50
16. Zworykin L.O., Fal'chenko V.M., Filatov A.V. The peculiarities of elements redistributions in metals during shock wave transmissions//High pressure and technology. Proceeding XI th AIRIPT International Conference. V.4, -Kiev: Naukova Dumka, 1989. P.159-161
17. Зворыкин Л.О., Фальченко В.М., Филатов А.В. Массоперенос в металлах при прохождении ударных волн.-Киев, 1989, 32 с. (Препринт

18. Волосевич П. Ю., Засимчук И. К., Зворыкин Л. О., Фальченко В. М. Массоперенос и структурные изменения в металлах при прохождении ударных волн с различными параметрами // Металлофизика, 1989, т. 11, N3, с. 126—129.
19. Зворыкин Л. О., Румянцев Б. В., Фальченко В. М., Филатов А. В. Влияние шероховатости поверхности на массоперенос в меди под действием ударных волн // Металлофизика, 1991, т. 13, N11, с. 126—128.
20. Бъчваров И., Зворыкин Л. О., Мешков Ю. Я., Фарфорова С., Фальченко В. М., Шевченко А. В. Особенности разрушения биметаллического соединения сталь 45—сталь X18H10T, полученного сваркой взрывом. — Металлофизика, 1991, т. 13, N11, с. 3—8.
21. Зворыкин Л. О., Лободюк В. А., Румянцев Б. В., Фальченко В. М., Филатов А. В. Особенности массопереноса и структурных изменений в сплавах Co—Ni при прохождении ударных волн // Известия АН СССР, сер. Металлы, 1991, N4, с. 158—160.
22. Егоров Б. В., Зворыкин Л. О., Тимофеев Б. Б. Гидродинамическая теория аномального массопереноса в твердых телах при ударных воздействиях // Металлофизика, 1991, т. 13, N1, с. 124—127.
23. Дубик А., Зворыкин Л. О., Овсик Я., Фальченко В. М., Филатов А. В. Особенности массопереноса железа и никеля в металлах при прохождении ударных волн, генерированных импульсным излучением // Металлофизика, 1992, т. 14, N1, с. 46—49.
24. Timofeev B. B., Egorov B. V., Zvorykin L. O. Hydrodynamic theory of shock induced anomalous mass transfer in solids // Shock compression of condensed matter (Ed. S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes, D. G. Tasker), 1992. — Elsevier Science Publishers B. V., p. 237—240.
25. Зворыкин Л. О., Ушеренко С. М., Шилкин В. А. Особенности распределения ^{14}C в стали 45, обработанной высокоскоростным потоком частиц $\text{W}(\text{C}+^{14}\text{C})+^{60}\text{Co}$ // Металлофизика, 1992, т. 14, N12, с. 80—82.
26. Зворыкин Л. О., Ушеренко С. М. Структурные особенности стали 45, обработанной высокоскоростным потоком порошковых частиц // Металлофизика, 1993, — т. 15, N1, с. 92—95.
27. Зворыкин Л. О., Фальченко В. М., Румянцев Б. В., Филатов А. В. Массоперенос никеля в монокристаллах молибдена при прохождении ударных волн // Металлофизика. — 1993. — т. 15. — N3, с. 97—98.



Подписано к печати 18.04.94. Формат 60×84^{1/16}.
 Офсетная печать. Бумага тип. Усл. печ. л. 1,86. Зак. 390к. Тир. 100.

ГППП ГКНТ, 252171, Киев, ул. Горького, 180.

AB 29.699