

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

На правах рукописи
УДК 539.219.3:53

МАЗАНКО Владимир Федорович

ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ АТОМОВ И ОБРАЗОВАНИЯ ФАЗ В МЕТАЛЛАХ
В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Специальность 01.04.07 - физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1994



Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте металлофизики НАН Украины

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Д.Я. МЕШКОВ (Институт
металлофизики НАН Украины, г. Киев),

доктор физико-математических наук,
профессор М.Г. ИСАКОВ (Физико-тех-
нологический центр по применению
высокоэнергетических пучков и р/а
изотопов ШНИИЧМ, г. Москва)

доктор технических наук,
профессор Б.А. ЛЯШЕНКО (Институт
проблем прочности НАН Украины,
г. Киев)

Ведущая организация: Белорусская государственная поли-
техническая академия (г. Минск)

Защита диссертации состоится " 8 " июня 1994 г.
в _____ часов на заседании Специализированного совета Д.016.37.01.
при Институте металлофизики НАН Украины (252680, Киев, пр. Вер-
надского, 36, конференц-зал Института металлофизики НАН Укра-
ины)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
металлофизики НАН Украины.

Автореферат разослан " 6 " мая 1994 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета Д. 016.37.01
кандидат физико-математических наук

Э.Г. МАДАТОВА

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Подписано к печати 26.04.94. Формат 60x84 1/16. Бумага тип.
Обсетная печать. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 100 экз. Зак. 439к.

ГПНН ІКНТ, 252171, Киев 171, ул. Горького, 180.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование широкого круга процессов, протекающих в металлах и сплавах в условиях импульсных внешних воздействий приобретает в последние годы все большее развитие. Особое место при этом занимает эффект аномального массопереноса (обнаружен в 1973 году), характеризующийся совокупностью уникальных физико-химических явлений, не имеющих аналогов в стационарных условиях. Обнаружение этого эффекта существенным образом изменило представления о скоростях миграции атомов в твердых телах, особенностях формирования твердых растворов и образования фаз в сплавах, структурных превращениях в металлах и их влиянии на миграцию атомов и т.д. Кроме того, на основе этих эффектов могут быть созданы способы обработки металлов и сплавов, обладающие не только значительными преимуществами по сравнению с традиционными, но и обеспечивающие получение уникальных свойств, недостижимых ранее.

В связи с этим, целенаправленное, глубокое исследование явления аномального массопереноса, его особенностей, выяснение его механизма является одной из важных задач физики твердого тела, имеющей большое фундаментальное и прикладное значение. Так как, эффект ускорения подвижности атомов в данном случае чрезвычайно велик, появляется возможность изучать процессы массопереноса в твердых телах при температурах $T < 0,5 T_{пл}$, недоступных для исследований ранее. Несмотря на то, что экспериментальное изучение процессов переноса при низких температурах является методически сложной проблемой, возможность обнаружения неизвестных ранее физических закономерностей и создания на их основе принципиально новых способов обработки металлов и сплавов делает эти исследования чрезвычайно важными. Актуальным является также дальнейшее развитие теории аномального массопереноса, разработка которой позволит не только расши-

речь наши представления о его механизме, но и может явиться вкладом в развитие общей теории диффузии.

Не менее важным является также исследование вопросов фазообразования в условиях ускоренного массопереноса. Имеющиеся в литературе данные немногочисленны и не позволяют создать обобщенной картины протекания указанного процесса. В то же время необходимость в подобных данных очевидна.

Цель и задачи исследования. Основная цель работы заключается в исследовании влияния различных факторов на массоперенос в условиях импульсных воздействий, в изучении процессов взаимодействия разнородных материалов и фазообразования в условиях ускоренной миграции атомов, выяснении возможности более широкого практического использования обнаруженных закономерностей.

В соответствии с этим в перечень основных научных и прикладных задач данной работы включены

а) в области фундаментальных исследований

1. Изучение влияния исходной структуры металла, полиморфизма, типа твердого раствора, природы проникающего атома на особенности массопереноса в условиях импульсных воздействий, установление связи между параметрами нагружения и массопереносом в широком диапазоне скоростей и температур обработки, выяснение особенностей массопереноса в условиях многократных обработок, дальнейшее развитие представлений о физической природе процесса переноса вещества в условиях импульсных внешних воздействий.

2. Исследование процессов массопереноса в условиях различных видов импульсных нагружений и выяснение общих закономерностей и различий, характеризующих эти процессы.

3. Изучение особенностей распределения атомов в зоне массопереноса при наличии и отсутствии границы раздела, взаимодействия металлов с легкими (H, C, N и др.) и нерастворимыми в стационарных условиях элементами.

4. Исследование процессов взаимодействия разнородных металлов и закономерностей фазообразования в условиях различных видов импульсных воздействий и построение

математической модели этого процесса.

б) в области прикладных исследований

1. Разработка комплекса оборудования и методик физического эксперимента для всестороннего исследования массопереноса и сопровождающих его эффектов в широком диапазоне температур и скоростей импульсных воздействий.

2. Разработка на основе исследованных закономерностей новых, а также оптимизация существующих способов обработки изделий из металлов и сплавов с целью получения требуемых эксплуатационных характеристик.

Объекты исследования. Основные исследования были проведены на чистых металлах с ОЦК и ГЦК решетками в поли- и монокристаллическом состоянии, а также различных сплавах на их основе. Импульсная обработка при низких температурах чистых металлов с широким диапазоном физических свойств позволяет существенно ограничить влияние термической активации на процесс массопереноса, упрощая, тем самым, физическую картину, на фоне которой происходит процесс имассопереноса.

Для повышения достоверности сопоставления между собой результатов исследований на различных металлах все образцы имели в большинстве случаев одинаковые размеры и форму и, в зависимости от требований эксперимента, одинаковое структурное состояние, что достигалось соответствующими обработками.

Научная новизна результатов исследования. В работе впервые подробно рассмотрено влияние различных факторов на массоперенос в условиях импульсных внешних воздействий и показано, что дефекты различного типа действуют избирательно на миграцию атомов. На широком круге металлов установлено, что размер зерна не влияет на скорость массопереноса, в то же время увеличение концентрации вакансий в кристалле приводит к снижению подвижности атомов. Впервые исследованы особенности массопереноса в диапазоне температур ниже $0,5 T_{пл}$ и установлено, что при температуре 77 K происходит повышению подвижности атомов.

Впервые прямым экспериментом с помощью метода

радиоактивных изотопов показано, что ускоренный массоперенос реализуется не только в поверхностных слоях, но и в объеме кристалла в отсутствие границы раздела.

Построена феноменологическая модель процесса массопереноса в условиях импульсных воздействий, позволяющая оценить вклад в него релаксационных явлений.

Определено значение движущей силы, действующий на мигрирующий в кристаллической решетке атом при импульсном нагружении и показано, что ее температурная зависимость в широком температурном интервале носит немонотонный характер

Исследованы процессы взаимодействия разнородных металлов и фазообразования в многокомпонентных системах при использовании различных видов импульсных воздействий и установлено, что в этих условиях удается получить не только пересыщенные твердые растворы, но и интерметаллические соединения нестехиометрического состава. Кроме того показано, что с помощью импульсного воздействия удается вводить в кристаллическую решетку металлов на макроскопические глубины атомы элементов, нерастворимых в стационарных условиях. На основе экспериментальных данных построена математическая модель процесса фазообразования в условиях импульсных воздействий.

Исследована взаимосвязь процесса массопереноса с параметрами импульсного воздействия и показано, что изменяя их можно целенаправленно влиять на свойства металлов и сплавов.

Исследованы особенности протекания диффузионных процессов и фазообразования в условиях многократного импульсного сжатия газовой среды, в которой осуществляется диффузионный отжиг. Установлено, что в этих условиях в несколько раз увеличивается скорость диффузии и изменяется характер фазообразования.

Практическое значение работы. Практическое значение имеют следующие результаты работы.:

I. Создание комплекса оригинальной аппаратуры и методик, позволяющих проводить в широком диапазоне температур и скоростей деформации импульсную обработку металлических материалов, а также осуществлять всестороннее исследование их физико-химических свойств. Указанная аппаратура может быть

также использована для обработки материалов в реальных технологических процессах.

2. Разработка на основе экспериментальных данных ряда оригинальных способов механико-химико-термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, в которых используются импульсные воздействия различного типа.

3. Разработка на основе результатов исследования процессов массопереноса и фазообразования при электроискровом легировании (ЭИЛ) и ударном механическом нагружении рекомендаций, использованных для оптимизации ряда способов ЭИЛ и сварки давлением.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Процесс массопереноса в условиях импульсных нагружений характеризуется избирательной структурной чувствительностью, что проявляется в различном влиянии точечных, линейных, поверхностных, объемных дефектов, концентрации примесных атомов, типа твердого раствора и кристаллической решетки на подвижность атомов.

2. Подвижность и распределение атомов, взаимная растворимость элементов в импульсно нагруженных металлах предопределяется параметрами импульсного воздействия: температурой, скоростью деформации, кратностью приложения нагрузки. Варьирование указанных параметров позволяет целенаправленно изменять физико-химические свойства обрабатываемых материалов.

3. Процессы фазообразования при деформации со скоростями, превышающими 10^2 с^{-1} в условиях ударного сжатия, облучения импульсами (ЖГ, обработки искровыми разрядами) заключается в одновременном возникновении в зоне массопереноса пересыщенных твердых растворов и химических соединений с отклонением от стехиометрического состава.

Личный вклад автора. В диссертационной работе обобщены результаты исследований, выполненных непосредственно автором или группой сотрудников под его руководством. В последнем случае автор формулировал цели, задачи и производил постановку работы, анализировал и обобщал полученные результаты.

Материал диссертационной работы не содержит идей или разработок, принадлежащих соавторам, с которыми были написаны научные статьи.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: X Всесоюзная научно-техническая конференция "Диффузионное соединение металлических и неметаллических материалов", Киев, 1982; XIX Республиканский семинар по диффузионному насыщению и защитным покрытиям, Львов, 1982; V Всесоюзное совещание по электрической обработке материалов, Кишинев, 1985; IX Всесоюзное совещание по кинетике и механизму химических реакций в твердом теле, Алма-ата, 1986; XI Всесоюзная конференция "Физика прочности и пластичности металлов и сплавов", Самара (Куйбышев), 1986; Всесоюзная конференция "Диффузия в металлах и сплавах", Тула, 1986; Всесоюзное совещание "Прикладная мессбауэровская спектроскопия", Москва, 1988; XXII сессия Научного совета "Новые конструкционные металлические материалы, технология их производства и обработки", Киев, 1987; Всесоюзная конференция "Соединение тугоплавких металлов", Киев, 1988; VIII Международная конференция по спектроскопии твердого тела, ЧССР, Прага, 1988; Всесоюзная конференция "Диффузия и дефекты", Пермь-Самара, 1989; Всесоюзное совещание "Влияние внешних воздействий на массоперенос в металлах", Киев, 1990; XIII Всесоюзное совещание "Получение, структура, физические свойства и применение высокочистых и монокристаллических тугоплавких металлов", Суздаль, 1990; Семинар "Роль диффузионных процессов в формировании поверхности металлов с особыми свойствами и образовании неразъемных соединений", Киев, 1992.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 42 научных труда.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 5-ти глав, введения, заключения и библиографического списка. Она содержит 320 страниц машинописного текста, включая 110 рисунков, 2 таблицы и библиографию из 202 наименований работ по теме диссертации.

Введение. В введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, изложены основные результаты исследований и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава. В первой главе рассмотрены и проанализированы имеющиеся в научной литературе немногочисленные данные, касающиеся вопросов, рассматриваемых в настоящей диссертации.

Так, в одном из первых исследований о влиянии дефектов кристаллической структуры на массоперенос было установлено (Л.Н.Лариков и др.), что при лазерной импульсной обработке с увеличением концентрации избыточных вакансий от $1,2 \cdot 10^{15}$ до $2,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ подвижность атомов резко падает, а влияние исходной плотности дислокаций на подвижность атомов носит немонотонный характер. Замедляется подвижность атомов и при увеличении концентрации вакансий в условиях ультразвуковой импульсной обработки, причем это происходит независимо от способа введения избыточных вакансий в кристалл.

В то же время, как следует из литературы, влияние границ зерен на массоперенос при импульсных воздействиях неоднозначно. Прежде всего установлено, что это влияние чрезвычайно слабо, в отличие от стационарных условий, что свидетельствует о специфическом характере массопереноса в рассматриваемых условиях.

Противоречивы данные о влиянии на массоперенос в этом случае энергии дефектов упаковки.

Уже в первых работах по изучению массопереноса в условиях внешних импульсных воздействий была установлена слабая температурная зависимость коэффициентов массопереноса, причем, как и в стационарном случае, подвижность атомов с понижением температуры уменьшалась. Однако эти результаты не могут быть экстраполированы на температуру ниже комнатной, т.к., судя по косвенным данным, при достижении 77 К подвижность атомов может увеличиться.

Что касается результатов исследования вопроса влияния на массоперенос кратности приложения нагрузки, то согласно данным ультразвуковой механической обработки увеличение количества ударов приводит к замедлению подвижности собственных атомов в железе. Однако специфика этого вида обработки, заключающаяся в больших искажениях структуры поверхностных слоев, не позволяет обобщить этот результат на другие виды импульсных воздействий.

К сожалению, ограниченное количество данных, имеющихся в литературе, не позволяет создать цельную картину взаимосвязи процесса массопереноса со структурными характеристиками и параметрами импульсного воздействия. Но они дают возможность проследить некоторые тенденции во влиянии совокупности факторов на процесс миграции атомов в импульсно деформированных металлах и поставить ряд вопросов, которые нуждаются в разрешении.

Что касается вопросов фазообразования, то высокие скорости массопереноса, значительно превышающие подвижность атомов при изотермических отжигах, естественно вносят специфические особенности в взаимодействие разнородных материалов и формирование фазового состава в материалах при импульсных воздействиях. Причем, как показывают литературные данные, подобное влияние сказывается на фазообразовании даже в условиях, например, диффузионной сварки, квазистатическом растяжении, осадке на прессе, когда эффект аномального ускорения массопереноса не реализуется. Так, например, при диффузионной сварке молибдена со сталью IX13 возникают (Н.Ф.Казаков и др.) пересыщенные твердые растворы железа в молибдене, молибдена в железе и интерметаллид Fe_3Mo_2 нестехиометрического состава. При сварке давлением сталей XI7 и Ст.45 со сталью типа I8-8 (Б.И.Медовар и др.) в результате восходящей диффузии углерода происходит насыщение аустенитной стали углеродом и распад цементита в малоуглеродистой стали. Распад карбидных фаз в сталях наблюдался, например, при прокатке, деформации растяжением и т.д. При механическом сжатии ($\dot{\epsilon}$ до 100 с^{-1}) в условиях ударной сварки в вакууме (Г.К.Харченко и

др.) также возникают твердые растворы и карбидные фазы (системы: IXI8H10T-Nb, Mo) Однако, в зоне массопереноса в этом случае не образуются интерметаллические соединения, несмотря на то, что в данных условиях обработки, согласно равновесной диаграмме состояний, эти соединения должны возникать.

Данные, полученные при более высоких скоростях деформации, к сожалению весьма противоречивы ($10^3 - 10^5 \text{ с}^{-1}$). Например, при магнитноимпульсной сварке разнородных металлов без подогрева (Δ порядка 10^4 с^{-1}) отмечены только пересыщенные твердые растворы, причем степень пересыщения была велика, но ни интерметаллических соединений, ни фаз внедрения обнаружено не было (Д.С.Герцрихен и др.). Однако в другой работе было показано, что в тех же условиях обработки при наличии касательных напряжений возникают сложные интерметаллиды с нарушением стехиометрии состава и морфологии.

При сварке взрывом (Δ порядка 10^5 с^{-1}) в некоторых случаях (В.Н.Поляков) образуются только пересыщенные твердые растворы (Nb-St.45), тогда как в случае сварки титана с кобальтом и железа с алюминием (Л.Н.Оклей и др.) возникает большое количество интерметаллических фаз с образованием диффузионной зоны до 100 мкм. Однако другие авторы указывают на отсутствие диффузионного взаимодействия металлов при сварке взрывом. Этому утверждению противоречит обнаружение взаимного растворения меди и железа, меди и серебра и т.д. при взрывной обработке (В.П.Алексеевский, В.В.Куприна, Л.И.Маркашова и др.).

Таким образом, результаты исследования процесса фазообразования в условиях различных внешних воздействий являются фрагментарными. В большинстве случаев не установлена взаимосвязь между фазовым составом зоны взаимодействия и условиями нагружения, не выявлена также роль параметров обработки. В силу этих причин, по-видимому, не была разработана приемлемая модель фазообразования применительно к случаю взаимодействия разнородных металлов в условиях импульсных внешних воздействий. Тем не менее, существует неслучайная потребность получения систематизированного экспериментального материала и построения на его основе базовой модели, которая

бы позволяла описать основные закономерности процесса фазообразования в рассматриваемых условиях обработки. Такая модель необходима, в частности, для прогнозирования фазовых изменений в сплавах в процессе эксплуатации изделий из них в условиях многократных и знакопеременных нагрузок, импульсного изменения температуры и давления.

Вторая глава. Для достижения поставленных в работе целей пришлось решать ряд методических задач. Прежде всего появилась необходимость в создании установок для деформации металлов со скоростями до 10^5 с^{-1} в интервале температур от 77 К до $T_{\text{пл}}$.

В связи с невозможностью создания универсальной установки был разработан и построен ряд устройств, обеспечивающих проведение экспериментов в требуемом интервале скоростей деформации $\dot{\epsilon}$.

Для деформации металлов со скоростями 10^2 – 10^4 с^{-1} была построена установка, в которой сверхзвуковой поток газа толкает снаряд, деформирующий с необходимой скоростью образец. Образец находится в экспериментальной камере, где также помещен электроннолучевой нагреватель и массивная наковальня. Экспериментальная камера подключена к вакуумной системе, состоящей из форвакуумного насоса и диффузионного вакуумного агрегата. Время прохождения снарядом участка конечной длины в камере низкого давления измеряется с помощью метода последовательного дискретного счета. Температура образца измеряется термопарой, привариваемой к образцу. Максимальная скорость движения снаряда в камере низкого давления колеблется в пределах 280–300 м/с при минимальной массе снаряда, удовлетворяющей условиям эксперимента.

Для обработки металлов с еще более высокими скоростями деформации (до 10^5 с^{-1}) была создана установка, в которой разгон снаряда в ударной трубе осуществляется пороховыми газами. Экспериментальная камера, вакуумная система, измерение скорости полета снаряда и температуры образца осуществляется также, как на описанной выше установке. Скорость полета снаряда на этой установке достигает величин 800–

1000 м/с, что позволяет деформировать металлы со скоростями от 10^4 до 10^5 с⁻¹. Таким образом, на данной установке удается достичь скоростей деформации, близких к тем, которые реализуются при взрывной обработке. Однако в этом случае отпадает необходимость в создании сложных защитных сооружений, либо специальных помещений, изготовлении ампул сохранения образцов. Все это делает эксплуатацию установки простой и эффективной.

Описанные выше установки сконструированы так, что в результате обработки образцы имеют значительную остаточную степень деформации (до 10-30 %). Однако при проведении экспериментов, а также в промышленной практике возникают задачи, когда образец (или изделие) должен сохранять свою форму и размеры после обработки. Для решения этой задачи была создана установка, в которой импульсное воздействие на образец передавалось через газообразную среду.

Установка состоит из камеры высокого давления и пневматического цилиндра. Камера высокого давления в свою очередь состоит из рабочей камеры (в ней находятся обрабатываемые образцы) и цилиндра, по которому поршень совершает поступательное движение. При подаче под высоким давлением газа в пневматический цилиндр приходит в движение поршень, который сжимает газ в рабочей камере, создавая необходимое давление. Данная установка позволяет осуществлять многократную импульсную обработку металлов в диапазоне перепада давлений от 10^5 до 10^7 ГПа с частотой от 1 до 100 импульсов в минуту. Обработка может осуществляться либо в нейтральном газе (гелий, аргон), либо в насыщающей газовой среде, такой, например, как аммиак, метан и др. Температуру можно изменять в зависимости от требований эксперимента от комнатной до 1473 К.

С целью автоматизации процесса определения коэффициентов диффузии (массопереноса) разработан метод автоматической записи концентрационного распределения различных элементов в металлах. Суть метода заключается в том, что материал образца и эталона одновременно струвливаются и наносятся электролитически на электропроводящую движущуюся с известной

скоростью ленту или диск, что позволяет однозначно сопоставить любой участок ленты или диска с соответствующим слоем диффузионной зоны. Способ позволяет также исследовать диффузию одновременно в нескольких образцах и сравнивать их с эталонным распределением, изучать диффузию не только радиоактивного, но и любого другого элемента. Наиболее эффективен этот способ в тех случаях, когда исследуется диффузия в чистых металлах, а диффузионная зона растянута на сотни микрон. Именно такие ситуации наиболее часто возникают при исследовании процессов массопереноса в условиях внешних воздействий. Однако, использование данного способа ограничено теми случаями, когда существует возможность подобрать состав и концентрацию электролитов, необходимых для обеспечения однородного травливания и осаждения на электропроводящую ленту материала образца и эталона.

В настоящей работе также впервые применен метод исследования, включающий в себя одновременное использование радиоактивных изотопов и массбауэровской спектроскопии (РИМС). Применение традиционных способов регистрации резонансного γ -излучения (в геометрии пропускания и рассеяния) затруднено в случае применения радиоактивного диффузанта из-за фонового излучения. Это затруднение можно преодолеть при использовании метода наблюдения ядерного γ -резонанса по вторичному электронному излучению, т.к. рабочий объем детектора электронного излучения может быть сделан нечувствительным к рентгеновскому и ядерному γ - и β -излучению.

Экспериментальная проверка возможности совместного использования р/а изотопов и массбауэровской спектроскопии (РИМС) на конверсионных электронах, проведенная при изучении строения цементированных слоев в железе, оказалась удачной и метод РИМС был успешно применен для решения поставленных в настоящей работе задач.

Методика обработки экспериментальных данных.

Для изучения закономерностей процессов массопереноса в металлах и сплавах, их анализа и интерпретации чрезвычайно важным является выбор параметров, наиболее точно

характеризующих эти процессы. Функциональный анализ концентрационных профилей, полученных экспериментально при импульсных воздействиях показал, что основная часть из них удовлетворительно описывается выражением

$$C = C_0 \exp(-\alpha x^2/\tau), \quad (1)$$

где $\alpha = I/4D_M$, D_M - коэффициент массопереноса. Данное соотношение аналогично выражению, описывающему закон распределения диффундирующего элемента в объеме образца при диффузии в стационарных условиях. Следовательно, при описании процесса переноса вещества в условиях импульсных внешних воздействий, когда выполняется соотношение (1), правомерно воспользоваться параметром D_M , как основной характеристикой массопереноса. В этом случае для определения значений D_M можно применять стандартные методики.

В ситуациях, когда в процессе импульсной обработки образец претерпевал пластическую деформацию, для расчета D_M использовалась методика, учитывающая этот фактор. Ошибка при определении значений D_M не превышала 20%.

Однако при импульсных воздействиях в ряде случаев соотношение (1) не выполняется. В этой ситуации пользоваться параметром D_M по аналогии с коэффициентом диффузии для анализа процесса массопереноса нельзя. В этом случае, для количественного описания процесса массопереноса использовалась максимальная глубина проникновения атомов в образец X_{\max} , которая принималась равной абсциссе точки, ордината которой соответствует чувствительности метода меченых атомов.

Кроме описанных основных методов, основанных на использовании радиоактивных и стабильных изотопов (например, ^{57}Fe) в работе были использованы рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный, оже-спектрометрический методы, метод вторичной ионной масспектрометрии, электронной микроскопии, металлографический и др.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния различных факторов на массоперенос в металлах и сплавах. Изучение влияния структуры металла на массоперенос в поликристаллическом железе, в его сплавах с никелем и углеродом в молибдене с размером зерна от 15 до 10^3 мкм при температурах от 673 до 1673 К, а также в моно- и поликристаллической меди ($T=295$ К), алюминии ($T=77$ К), ниобии ($T=1273-1673$ К), сталях X18H10 и X18H18 ($d=10-150$ мкм, $T=77-295$ К) показало, что в условиях импульсного воздействия ($\epsilon = 1-10^3$ с⁻¹) наличие и протяженность границ зерен не влияет в пределах ошибки эксперимента на подвижность атомов. Не отличаются также коэффициенты массопереноса и в случае миграции атомов в монокристаллах различной ориентации (медь, алюминий, ниобий), причем данный эффект проявляется во всем исследованном интервале температур и скоростей деформации. Следует однако отметить, что в монокристаллических материалах при импульсном воздействии обнаруживаются участки с пониженным содержанием меченых атомов. Из сопоставления автордиографий со структурой металла вытекает, что обедненные участки соответствуют границам субзерен с высокой плотностью дислокаций. То есть меченые атомы в этом случае как бы избегают места скопления дислокаций (субграница) и располагаются в объеме субзерна. Действительно, предварительная пластическая деформация, приводящая к увеличению плотности дислокаций, сопровождается в железе и других металлах уменьшением подвижности атомов при импульсном воздействии в несколько раз.

В то же время, в стационарных условиях наличие границ зерен и их протяженность в значительной степени сказываются на подвижности атомов, особенно до температур порядка $0,5 T_{пл}$.

Существенное влияние на массоперенос оказывают точечные дефекты типа вакансий и внедренных атомов. Для оценки влияния вакансий использовались закаленные, озвученные путем ультразвуковой обработки и отожженные образцы железа и никеля, содержащие различное количество избыточных вакансий. При $\epsilon=25$ с⁻¹ и $T=295$ К увеличение концентрации вакансий от

10^{15} до 10^{20} см⁻³ в никеле, например, приводит к уменьшению значений D_M почти на порядок. Подобное влияние обнаружено также и на сплавах вычитания. Присутствие в междузлиях атомов внедрения (углерод, азот и др.) также, как и наличие избыточных вакансий, существенно снижает скорость проникновения атомов матрицы, причем степень этого влияния растет с увеличением концентрации атомов внедрения.

Что касается дефектов упаковки, то на примере монокристаллического молибдена и его сплавов с рением установлено, что при импульсном нагружении ($\lambda = 290$ с⁻¹, $T = 295$ K) с уменьшением энергии ДУ подвижность атомов ⁶³Ni понизилась в несколько раз. Аналогичный эффект наблюдается при взрывной и импульсной лазерной обработках.

Существенное влияние на массоперенос в металлах оказывает тип кристаллической решетки. Исследования, проведенные на железе, кобальте, титане, цирконии, сплавах Fe-Ni обнаружено, что при импульсных воздействиях подвижность атомов в кристаллических решетках с большей плотностью упаковки выше, по сравнению с более "рыхлой" структурой. При этом показано, что с понижением температуры превращения уменьшается различие D_M в разных модификациях. Это же происходит при увеличении скорости деформации.

При импульсных воздействиях, как и в случае изотермических отжигов, существенное влияние на подвижность атомов оказывает тип твердого раствора сплава, в котором происходит массоперенос. При изучении переноса атомов железа в железе и твердых растворах железа с никелем, углеродом и аргоном установлено, что наибольшей глубиной при импульсном нагружении ($\lambda = 25$ с⁻¹, $T = 295$ K) характеризуется проникновение собственных атомов в чистое железо (~25 мкм), затем в порядке убывания идут твердый раствор никеля в железе (~18 мкм), раствор углерода в железе (~12 мкм) и твердый раствор аргона в железе (~5 мкм).

Концентрационная зависимость подвижности атомов, исследованная на примерах систем Fe-Ni, Cu-Ni, Cu-Zn, Mo-Re и др., имеет во всех случаях импульсного нагружения

немонотонный характер. Однако, общим является то, что скорость миграции собственных атомов и атомов замещения в сплавах ниже, чем в чистом металле-растворителе. Однако с ростом скорости деформации влияние примесей на массоперенос ослабевает. Это же относится и к твердым растворам внедрения и вычитания.

Увеличение размера атома при импульсном воздействии также приводит к существенному замедлению их подвижности. При изучении массопереноса в железе ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{95}Nb , ^{204}Tl и ^{137}Cs (γ_a , соответственно, 0,126; 0,127; 0,147; 0,171; 0,274) при скорости деформации 25 c^{-1} и $T = 295 \text{ K}$ оказалось, что с увеличением разности между радиусом атома матрицы и мигрирующего атома величина D_M уменьшается при переходе от ^{55}Fe к ^{137}Cs , примерно, в 3 раза. При этом, максимальное падение D_M наблюдается на участке, где $(\gamma_{\text{Me}} - \gamma_{\text{Fe}}) < 0,044$, а затем процесс замедляется. Та же тенденция наблюдается при более высоких скоростях нагружения, причем изменение температуры обработки не оказывает влияния на характер этой зависимости. Следует подчеркнуть, что данный результат аналогичен результатам по диффузии в железе в стационарных условиях атомов, образующих с ним твердые растворы внедрения - H, C, N, и др.

Исследование массопереноса в условиях низких температур позволило установить эффект, свидетельствующий о нарушении аррениусовской зависимости $D_M = f(T)$, причем при температурах $T < 300 \text{ K}$ наблюдается повышение подвижности атомов. Этот результат получен на Fe, Ni, Cu, Zr, сплавах Fe-Ni, Fe-Mn и др. (табл. I). Следует отметить, что данный результат принципиально отличает массоперенос собственных атомов и атомов замещения при импульсных воздействиях от диффузии тех же атомов в равновесных условиях. Однако он подобен процессу миграции атомов водорода при реализации явления квантовой диффузии.

Исследование взаимосвязи массопереноса со скоростью и температурой импульсного нагружения показало, что в интервале температур 273-1163 K зависимость $D_M = f(\dot{\epsilon}, T)$ представляет собой систему квазипараллельных прямых и аналитически может

Таблица

Зависимость коэффициентов массопереноса от температуры железа в железе и меди, никеля в никеле и цирконии при $\dot{\epsilon} = 25 \text{ с}^{-1}$

Температура Т, К	Коэффициенты массопереноса, D_M см ² /с			
	Fe-Fe	Fe-Cu	Ni-Ni	Ni-Zr
373	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$
295	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
77	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$

описана уравнением

$$D_M = D + C I \dot{\epsilon}^{\alpha} \exp(\beta T), \quad (2)$$

где D - коэффициент диффузии при $\dot{\epsilon} = 0$, C - деформационный фактор, α и β - константы. Показатель $\alpha = 2 \pm 0,2$ в данных условиях нагружения, что характерно для импульсных видов воздействия. Коэффициент $\beta = 3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Аналогичная зависимость получена и для других ОЦК металлов - молибдена и ниобия. При этом параметр α сохраняет свое значение, а $\beta = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, т.е. несколько меньше, чем в α -Fe. В ГЦК металлах (α -Fe, Cu, Al) наблюдается та же зависимость, причем и в этом случае значение показателя α составляет $2 \pm 0,2$. Таким образом, можно считать, что зависимость $D_M = f(\dot{\epsilon}, T)$ для кубических металлов в указанных интервалах $\dot{\epsilon}$ и T может быть описана уравнением (2) с различными значениями β , но практически равным для всех металлов показателем α .

На основании экспериментальных и имеющихся в литературе данных установлена корреляция между коэффициентами массопереноса и изменением механических свойств в широком интервале $\dot{\epsilon}$. Такая корреляция установлена для железа, алюминия, меди. Характерным при этом является то, что с увеличением скорости деформации исчезает влияние способа импульсного нагружения как на механические свойства, так и подвижность атомов.

Рассмотрение вопроса влияния многократного импульсного нагружения на массоперенос на примере железа и его сплавах с

N_1, C, M и др. позволило установить, что увеличение числа нагружений одного приводит к росту общей глубины зона проникновения, однако значения коэффициентов массопереноса при этом падают. При этом следует отметить, что замедление процесса массопереноса при $p > 1$ (и соответственно увеличении общей степени деформации) подобно эффекту влияния предварительной пластической деформации на диффузию в металлах атомов внедрения (C, N) по межузельному механизму. Кроме того, при $p=3$ на концентрационных кривых распределения железа в железе при $T=973$ К и $t=25c^{-1}$ появляется четко выраженный максимум концентрации меченых атомов. Возникновение подобного максимума было отмечено и при лазерной импульсной обработке. Наличие максимума является особенностью, характерной для процесса миграции атомов под действием движущей силы (F), обеспечивающей направленный характер миграции атомов. Оценка значений этого параметра показала, что величина F , например, для железа меняется сложным образом от температуры и сильно растет при понижении температуры эксперимента до 77 К. При этом значения F изменяются в пределах $10^{-12} - 10^{-3} Н$.

Полученные экспериментальные данные по влиянию многократного импульсного воздействия на массоперенос проанализированы с позиций модели последовательных потоков.

Обсуждение механизма массопереноса в условиях импульсных нагружений основывается на представлениях о миграции межузельных атомов в металлах, образующихся в процессе скоростной пластической деформации. При этом принципиальным моментом является использование понятия о движущей силе, действующей на межузельные атомы и обеспечивающей им направленное движение в кристаллической решетке. Однако предложенные ранее модели массопереноса не учитывали вклада в него диффузионных процессов, протекающих при релаксации после импульсного воздействия. В общем случае конечное распределение $C(t^*, x)$ с учетом этих процессов определяется не одной, а двумя характерными длинами: $V\tau$ и $(D, t^*)^{1/2}$. Здесь t^* - время протекания релаксационных эффектов; V - скорость движения атома под действием движущей силы; τ - продолжительность

процесса массопереноса; D - коэффициент диффузии в отсутствие импульсного воздействия; X - ширина зоны миграции атома.

В случае, когда $X \rightarrow \infty$ или $X \gg 2(Dt^*)^{1/2} [1 + (Dt^*)^{1/2}/V_T]$, уравнение массопереноса приобретает вид:

$$\frac{C(t^*, X)}{C(t^*, 0)} = \frac{1}{1 - \operatorname{erf}(Dt^*)^{1/2}/V_T} \cdot \exp(-X/V_T) \quad (3)$$

Анализ этого выражения позволяет рассмотреть следующие варианты:

1. $(Dt^*)^{1/2} \gg V_T$. В этом случае основной вклад в массоперенос при импульсном нагружении вносят диффузионные процессы, вызванные релаксацией напряжений после внешнего воздействия.

2. $(Dt^*)^{1/2} \ll V_T$. Массоперенос осуществляется главным образом в процессе нагружения в результате дрейфа под действием движущей силы.

3. $(Dt^*)^{1/2}$ равно или незначительно отличается от V_T . Расчеты показывают, что при $(Dt^*)^{1/2} = 0,5$ на значительном интервале X (вплоть до $X/V_T = 1$) сохраняется "квадратичный" закон (в этом случае $(\ln C_{II})/(X/V_T)^2 = 0,4$, а при $(Dt^*)^{1/2}/V_T = 0,1$ "квадратичный" закон исчезает уже при значении $X/V_T = 0,2$ и переходит в "линейный".

Данное феноменологическое рассмотрение позволяет оценить вклад различных этапов ускоренного массопереноса в конечный результат.

Четвертая глава посвящена изучению закономерностей процессов фазообразования в зоне взаимодействия разнородных металлов при импульсных воздействиях. Особенностью этих процессов является то, что в условиях импульсных воздействий образование различных фаз и химических соединений происходит за очень короткие времена. Поскольку все это происходит одновременно с процессом ускоренного массопереноса, то становится очевидной их тесная взаимосвязь.

В связи с этим в работе экспериментально изучен вопрос о распределении атомов в зоне контакта деформируемых металлов.

Установлено, что при скоростной деформации ($\dot{\epsilon}=100 \text{ с}^{-1}$, $T=1073$ и 1473 К) находящийся в контакте образцов железа и железа с молибденом в результате ускоренного массопереноса происходит обеднение контактной поверхности р/а изотопом (^{55}Fe) и проникновение его на глубину более 100 мкм . Этот эффект подобен смещению максимума концентрации р/а изотопа в глубь образца при многократном импульсном нагружении. Анализ концентрационных профилей за пределами максимума, а также также в случае его отсутствия (например, система Fe-Nb) показывает, что концентрация проникающего элемента и в этих случаях спадает монотонно, а концентрационный профиль описывается экспоненциальной зависимостью. Плавный характер концентрационных профилей свидетельствует об отсутствии скоплений р/а атомов, что является косвенным подтверждением отсутствия интерметаллических фаз. Этот вывод подтверждается структурным и фазовым анализом зон взаимодействия разнородных металлов (например, системы Cr-Mo). В то же время при взаимодействии Mo и Nb со сталью Ст.3 в зоне контакта образуются карбиды Mo_2C и Nb_2C . Однако эти эффекты наблюдаются на границах, которые могут служить источником проникающих атомов.

Поэтому проведены экспериментальные исследования реализации эффекта ускоренного массопереноса (на примере никеля) в отсутствие границы раздела, когда радиоактивный ^{63}Ni находится в объеме образца никеля. Установлено, что при $\dot{\epsilon}=2,9 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ и $T=1173 \text{ К}$ никель перераспределяется в объеме образца за время $\tau=6,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ на расстояние более 20 мкм , что дает значение коэффициента массопереноса $D_M=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$. Это значение D_M совпадает по порядку величины с данными, полученными при деформации поверхности образца и значительно выше значений D для стационарных изотермических условий.

Изучены особенности фазообразования при взаимодействии разнородных металлов на парах Fe-Cr , Fe-Nb , Fe-Mo , Fe-V . Установлено, что при импульсной обработке пары Fe-Cr (неограниченная растворимость) при параметрах нагружения $\dot{\epsilon}=100 \text{ с}^{-1}$ и $T=295$ и 673 К взаимное проникновение атомов приводит к изменению параметров кристаллических решеток Fe и

Ст, причем повышение температуры обработки сопровождается ростом концентрации этих элементов в матрице металлов. Подобные результаты получены и на системе Fe-Nb. Измерение концентраций в кристаллических решетках Fe и Mo при совместной импульсной обработке ($\Delta t = 100 \text{ с}^{-1}$, $T = 900-1800 \text{ K}$) показало, что ее уровень в Fe и Mo достаточен для образования интерметаллических соединений, однако фиксируются только твердые растворы с содержанием растворенных элементов выше уровня, предельного для равновесных условий. Однако, согласно литературным данным, в случае проплавления, (например при сварке взрывом) интерметаллид в этой системе успевает образоваться за времена $\tau < 10^{-6} \text{ с}$. В результате проведенных экспериментов получены фрагменты диаграмм состояний системы Fe-Mo для скоростей деформации 5 и 110 с^{-1} и температур 900 - 1800 K. При этом установлено, что взаимное растворение Fe и Mo происходит по типу замещения.

Особенности взаимодействия металлов с ГЦК решеткой в процессе импульсного воздействия рассмотрены на примере пар Cu-Ni (неограниченная растворимость) и Cu-Al (ограниченная растворимость). В первой системе при импульсной обработке образуется непрерывный ряд твердых растворов. При взаимодействии Cu с Al ($\Delta t = 10^{-1}-1,2 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $T = 300-850 \text{ K}$) также происходит образование твердых растворов с максимальным значением концентрации алюминия в меди порядка 18 вес.% ($\Delta t = 120 \text{ с}^{-1}$, $T = 300 \text{ K}$). Этого количества алюминия достаточно для образования интерметаллической фазы Cu_2Al , однако она не обнаружена. Итак, для ОЦК и ГЦК металлов характерной особенностью является, при указанных параметрах импульсного нагружения образование, твердых растворов с концентрацией, превышающей предел растворимости для равновесных условий, причем их взаимное растворение происходит по типу замещения.

Исследовано также взаимодействие металлов с легкими элементами. Так, например, исследование особенностей взаимодействия при импульсном воздействии ($\Delta t = 100 \text{ с}^{-1}$, $T = 373-973 \text{ K}$) железа с углеродом показало, что концентрация углерода в твердом растворе значительно превышает равновесную

На поверхности импульсно обработанного железа ($T=673$ К) присутствуют две фазы - твердый раствор углерода в железе с концентрацией углерода 1,15% вес. ($a=0,2848$, $c=0,3002$ нм) и небольшое количество карбида железа Fe_3C . С ростом глубины зоны количество углерода падает и на глубине порядка 200 мкм содержание углерода находится на уровне основного металла. На основе экспериментальных данных построен фрагмент диаграммы Fe-C для указанных условий нагружения. Взаимодействие железа с азотом происходит аналогичным путем, с тем лишь отличием, что нитриды не образуются. Анализ рентгеноструктурных данных показал, что растворение углерода и азота в железе происходит в данных условиях по типу внедрения.

Обнаружено, что при импульсных воздействиях возможно взаимное проникновение и растворение элементов, которые, согласно диаграммам состояния, практически нерастворимы в равновесных условиях. Этот факт установлен при исследовании пар Fe-Cs, Cu-Mo, Mo-Cu, Cu-C и др. При этом показано, что изменением параметров импульсного воздействия удается изменять как концентрацию элементов в растворе, так и глубины их проникновения, причем это относится ко всем типам взаимодействующих металлических систем. Показано, также что описанные эффекты имеют также место при импульсной лазерной, электроискровой и взрывной обработках.

Однако, при повышении скорости деформации $\dot{\epsilon} > 10^2$ с⁻¹ меняется характер взаимодействия разнородных металлов. На системе Ni-Zr установлено, что при импульсном воздействии со скоростью порядка 150 с⁻¹ при $T=1073$ К наряду с образованием пересыщенных твердых растворов возникает новая кристаллическая фаза, ранее неизвестная в системе Ni-Zr. Обнаруженная фаза относится к тетрагональной сингонии со степенью тетрагональности $\sim 1,5$. Метастабильная фаза подобной симметрии ранее была обнаружена в системе Ni-Zr при кристаллизации аморфного сплава $Ni_{67}Zr_{33}$, однако со степенью тетрагональности ~ 3 . Со стороны никеля при этом образуется соединение переменного состава на основе Ni_3Zr .

Следует отметить, что данный результат важен не только тем

что обнаружена новая фаза, но и тем, что при $\lambda > 10^2 \text{ с}^{-1}$ наряду с твердыми растворами (в том числе пересыщенными) образуются интерметаллические соединения нестехиометрического состава. Этот вывод подтвержден данными, полученными при исследовании процессов фазообразования в условиях импульсного лазерного (λ порядка 10^3 с^{-1}) и взрывной обработок (λ порядка 10^5 с^{-1}). В первом случае исследования проводились на системе Fe-Nb при многократной импульсной обработке в режиме модулированной добротности с длительностью импульса 50 нс и энергией импульса $E = 5 \text{ Дж}$. Эксперименты показали, что и в этом случае наряду с образованием твердого раствора ниобия в железе образуется интерметаллическое соединение Fe_2Nb . При этом установлено, что с увеличением количества лазерных импульсов количество этой фазы растет. Во втором случае при исследовании взаимодействия медного стержня, движущегося с дозвуковой скоростью, с железом и кремнием, установлено образование пересыщенного твердого раствора железа в меди и кремния в железе ($\epsilon\text{-Cu}$, $\alpha\text{-Fe}$). Кроме того, в матрице обнаружены мелкодисперсные выделения, состоящие не только из пересыщенных $\epsilon\text{-Cu}$ и $\alpha\text{-Fe}$, но и силицидов железа и меди нестехиометрического состава с превышением содержания железа и меди.

Полученные экспериментальные данные легли в основу математической модели процесса фазообразования при импульсных внешних воздействиях. Модель основана на предположении о возможности разделения рассматриваемого процесса на 2 этапа:

1. собственно массоперенос, создающий распределение (и градиент) концентрации диффузанта, а также приводящий к образованию дефектов, облегчающих возникновение решеток новых фаз;

2. полиморфные превращения - возникновение и рост зародышей промежуточных фаз в процессе перехода системы к тепловому и механическому равновесию.

В модели рассмотрены одномерные и сферические зародыши. В первом случае

$$\Delta X_{\text{max}} = L(\Delta C_{\text{m}}/C_{\text{g}}) \quad (4)$$

где ΔX_{\max} - максимальная ширина зоны насыщения, L - размер образовавшейся частицы интерметаллида, т.е. в данном случае наблюдается пропорциональность размеров образовавшихся частиц интерметаллидов толщине зоны массопереноса (при повторном воздействии ΔX_{\max} вместе с L должна увеличиваться, что, как показано выше, установлено экспериментально при многократной импульсной лазерной обработке.

Во втором случае

$$X_{\max} = 2 \frac{L}{C} \left[\left(\frac{2\Delta g_0}{g} \right)^2 + \left(\frac{g'}{g} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

а концентрационная ширина максимального зародыша $\Delta C = (3)^{1/2} C_m$,

Анализ этой модели позволяет сделать следующие выводы:

1. Размеры зародышей образовавшихся фаз при импульсном воздействии пропорциональны ширине зоны массопереноса.
2. Концентрационная ширина образовавшихся фаз должна значительно превышать равновесную.
3. Существует предельная ширина зоны L^* такая, что при $L < L^*$ фазы не образуются. Оценки показывают, что размер этой зоны составляет, примерно, $2 \cdot 10^2$ нм.

Таким образом, цикл экспериментальных и теоретических исследований процесса фазообразования при импульсных воздействиях позволил впервые установить основные его закономерности, наиболее существенные отличия от аналогичных процессов в стационарных условиях, построить математическую модель, достаточно хорошо описывающую наблюдаемые экспериментально эффекты.

В пятой главе представлены результаты исследования особенностей массопереноса при лазерной импульсной, взрывной, электроискровой обработках, а также в условиях импульсного сжатия среды, в которой осуществляется диффузионный отжиг. В том числе изучены возможности использования установленных в работе закономерностей массопереноса и фазообразования при импульсных внешних воздействиях для создания новых и улучшения существующих технологий обработки материалов. Эти

результаты свидетельствуют о том, что закономерности ускоренного массопереноса и сопровождающих его физико-химических явлений в металлах и сплавах реализуются в большинстве своем и при лазерной импульсной, взрывной и электроискровой обработках. Однако особенности каждого из этих видов импульсного воздействия накладывают свой отпечаток на поведение обрабатываемого материала. Это касается скорости массопереноса, влияния на него различных факторов, характера протекания процессов взаимодействия разнородных материалов и фазообразования.

Данные, касающиеся лазерной импульсной и взрывной обработок уже представлены выше. Поэтому остановимся подробнее на электроискровой обработке, представляющей собой чрезвычайно сложный процесс, в котором одновременно участвует большое количество факторов. В результате экспериментальных исследований показано, что подвижность атомов в этом случае также высока. При этом глубина проникновения атомов легирующего элемента в матрицу, толщина покрытия, фазообразование определяются возможностью взаимного растворения взаимодействующих атомов в соответствии с равновесной диаграммой состояния, тогда как в случае ударного механического, импульсного лазерного и взрывного воздействия это выражено слабее. Однако, в случае взаимодействия железа с медью и молибденом обнаружено образование пересыщенных твердых растворов с содержанием в слое до 40 мкм в первом случае 57 % ат. Fe и 32 % ат. Cu, во втором - 70% ат. Fe и 18% ат. Mo. Обнаружено, что в случае электроискровой обработки на воздухе в покрытии (например, пары Fe-Cu, Fe-Mo) находится до 12 % ат. кислорода, не связанного в окислы, а при бесконтактном способе обработки - до 60 % ат. Следует отметить, что этот результат получен впервые и не наблюдался при других видах импульсной обработки. Исследовано также влияние магнитного поля на процесс взаимодействия металлов при электроискровой обработке и установлено, что в случае наложения магнитного поля происходит изменение характера массопереноса и фазообразования, т.е. появляется возможность

управлять этими процессами.

На базе полученных экспериментальных данных разработана установка для электроискровой обработки поверхностей и способ изготовления анодов для химической промышленности, где указанные аноды используются для получения диоксида марганца (а.с. N I426I44). Указанная установка предназначена для обработки изделий с проводящим покрытием мощными электрическими разрядами. Она может быть использована на металлообрабатывающих предприятиях для электроискрового легирования поверхностных слоев металлов большой площади. Новый способ получения анодов позволяет повысить кратность их использования в 1,5-2 раза. Изучена также возможность создания на металлах коррозионностойких покрытий и обнаружено, что при нанесении методом ЭИЛ на сталь I2X18N10T покрытий из никеля и молибдена стойкость последних в горячих агрессивных средах более чем в 1000 раз выше стойкости металла основы.

Изучены закономерности массопереноса и фазообразования в металлах при многократном импульсном сжатии среды, в которой осуществляется диффузионный отжиг. На примере Fe, Ni, Ti установлено, что скорость само- и гетеродиффузии в этом случае увеличивается почти в 2 раза. При цементации железа, а также сплавов Fe-Ti, Fe-Cr с использованием указанной схемы происходит ускорение процесса насыщения углеродом. При температуре насыщения 1223 К - в 1,5 - 2 раза, а при понижении температуры насыщения до 973 К - в 10 - 12 раз. Изменяется при этом и характер фазообразования - после импульсной обработки поверхностный слой железа содержит, например, 65% аустенита, тогда как без нее - только 35%. На основе экспериментальных данных исследования указанного эффекта разработан принципиально новый способ химико-термической обработки (а.с. N I31797I). Этот способ является универсальным, т.к. позволяет получать на металлах самые разнообразные покрытия. При этом сокращается продолжительность обработки, появляется возможность понизить ее температуру. Он может быть использован для финишной

обработки изделий.

Описан новый способ механико-химико-термической обработки изделий из металлов и сплавов (а.с. N 1354752), основанный на использовании многократного импульсного механического нагружения в пределах скоростей деформации 1-300 м/с. Его использование позволяет значительно интенсифицировать процесс ХТО и получить на изделиях из металлов и сплавов различные покрытия. Немаловажным фактором является возможность управлять процессом формирования профиля концентрационного распределения легирующего элемента в поверхностных слоях металлов. Варьируя параметры импульсной обработки можно на заданной глубине создавать слой с повышенной концентрацией легирующего элемента и, тем самым, обеспечивать требуемые механические свойства.

Перераспределение элементов в результате диффузии или массопереноса в условиях внешних воздействий часто приводят к изменению химического и фазового состава материалов. Результаты исследования этого эффекта явились основой для разработки уплотнительного узла сверхвысоковакуумного затвора (а.с. N 1255794).

Следует отметить, что применение в промышленной практике технологий, использующих импульсные воздействия с целью сообщения изделиям из металлов и сплавов необходимой совокупности физических, химических, механических и др. характеристик недостаточно распространено. Предложенные в работе новые способы обработки металлов и сплавов, дополненные фундаментальными исследованиями метод ЭИЛ и ударной сварки, оригинальные установки для импульсных нагружений отличаются высокой производительностью и возможностью обеспечить новые полезные свойства, получение которых с помощью традиционных приемов часто в принципе невозможно. Некоторые из этих разработок представляют интерес для промышленной практики и в настоящее время уже внедрены в научных учреждениях и промышленных предприятиях. Полученный экономический эффект на 1990 год составлял порядка 800 т.р.

В результате проведенных исследований изучены особенности миграции атомов в металлах и сплавах в условиях импульсных внешних воздействий и влияния на них различных факторов, таких как наличие границ зерен и структурных несовершенств, типа твердого раствора и полиморфизма, природы проникающего атома и параметров импульсного нагружения и т.д.

Исследованы особенности распределения атомов в зоне миграции, а также фазообразования при взаимодействии разнородных металлов в широком интервале скоростей деформации.

Использование в работе установленных закономерностей массопереноса и фазообразования позволило уточнить известные механизмы массопереноса и построить математическую модель фазообразования в условиях импульсных внешних воздействий.

Полученные в работе экспериментальные результаты легли в основу новых способов обработки изделий из металлов и сплавов, в которых используются различные виды импульсных нагружений.

1. Разработаны устройства для импульсной обработки металлов и сплавов и созданы методики, позволяющие изучать в комплексе процессы массопереноса, структурной перестройки, изменение фазового состава и механических характеристик.

2. Установлено, что процесс массопереноса в металлах, подвергнутых импульсному нагружению, является структурно чувствительным, при этом выявлено избирательное влияние на него различных типов структурных несовершенств.

3. Для металлов, обладающих полиморфизмом, влияние типа кристаллической решетки на массоперенос ослабевает при понижении температуры полиморфного превращения и увеличении скорости пластической деформации при импульсном нагружении.

4. Впервые исследована концентрационная зависимость коэффициентов массопереноса в твердых растворах различного типа (замещения, внедрения и вычитания) и показано, что с ростом скорости деформации влияние концентрации и типа

твердого раствора уменьшается. При этом происходит сближение параметров массопереноса в металле и твердом растворе.

5. Установлено, что подвижность атомов в деформируемом металле уменьшается с ростом разницы между радиусом атома мигрирующего элемента и матрицы.

6. В металлах с кубической и гексагональной симметрией, а также в бинарных и многофазных сплавах экспериментально установлено протекание процесса переноса вещества, характеризуемого немонотонностью температурной зависимости коэффициентов массопереноса и повышением подвижности атомов при достижении температуры 77 К.

7. Впервые в широком интервале скоростей деформации установлена корреляция между скоростью массопереноса и механическими свойствами металлов с ОЦК и ГЦК решеткой.

8. Впервые показано, что объемный характер распределения радиоактивных атомов, проникших в металл в процессе импульсного нагружения при высоких температурах сохраняется и при обработке в жидком азоте - 77 К.

9. В условиях механического импульсного нагружения установлено, что атомы, находящиеся в объеме обрабатываемого металла также участвуют в массопереносе с аномально высокими скоростями.

10. Обнаружено и исследовано взаимное проникновение и растворение элементов, нерастворимых в равновесных условиях, что делает возможным синтез принципиально новых материалов.

11. Экспериментально и теоретически определены температурно-скоростные и концентрационные границы образования фаз при импульсных нагружениях. Установлено, что величина зародышей новой фазы пропорциональна ширине зоны взаимодействия, а также определены критические размеры этой зоны.

12. Показано, что в условиях высокоэнергетических внешних воздействий (облучение импульсами ОКГ, взрывная и электроискровая обработки) наибольшей подвижностью в металлах обладают собственные атомы и атомы замещения, а минимальной - атомы элементов, не растворяющихся в равновесных условиях.

13. Установлено, что в условиях импульсного сжатия внешней

среды происходит ускорение процесса миграции собственных и внедренных атомов. При этом с понижением температуры эффективность импульсной обработки для атомов внедрения увеличивается.

14. Полученные результаты легли в основу принципиально новых способов обработки изделий из металлов и сплавов, а также были использованы с целью оптимизации и улучшения существующих технологий обработки материалов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах.- Киев: Наукова думка.- 1991.- 208 с.

2. Денисова О.М., Мазанко В.Ф., Томашевский Н.А. и др. Метод автоматической записи концентрационного распределения различных элементов в металлах // Сб. "Физические методы исследования металлов".- Киев.- 1981.- С. 171-174.

3. Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Массоперенос в металлах при импульсном нагружении // ФизХОМ.- 1983.- №6.- С. 144-145.

4. Денисова О.М., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Исследование процессов миграции дефектов в металлах при скоростной пластической деформации // Сб. трудов XIX Республиканского семинара по диффузионному насыщению и защитным покрытиям.- Львов, 1982.- С.15-17.

5. Зворыкин Л.О., Мазанко В.Ф. Исследование подвижности атомов в металлах при электродисковом воздействии // Сб. "Новые порошковые и композиционные неорганические материалы".- Киев, 1983.- С. 53-58.

6. Ковтун В.И., Мазанко В.Ф., Полотник В.В. и др. Влияние взрывного нагружения на магнитные свойства и фазовые превращения сплава железо-никель // Физика и техника высоких давлений.- 1983.- вып.12.- С. 28-31.

7. Мазанко В.Ф., Михайлов В.В., Фальченко В.М. и др. Влияние параметров импульсного разряда на распределение

элементов электродов в электроискровых покрытиях // ЭОМ.- 1983, N1.- С. 22-24.

8. Немошкаленко В.В., Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е. и др. Исследование особенностей взаимодействия ниобия с железом при лазерной обработке // УФЖ.- 1984.- т.29,N4.- С. 624-625.

9. Мазанко В.Ф., Фальченко В.М., Пашков П.О. и др. Влияние амплитуды ударной волны на подвижность атомов в молибдене и меди//Металлофизика.- 1984.- т.6,N1.- С. 118-119.

10. Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е. Миграция атомов цезия в железе при лазерном воздействии // Металлофизика.- 1984.- т.6,N4.- С. 108-109.

11. Мазанко В.Ф., Зворыкин Л.О. Подвижность атомов $^{55,59}\text{Fe}$ в хrome при воздействии электрического разряда высокой мощности // Сб. "Структура и свойства порошковых материалов на основе тугоплавких металлов и соединений" .- Киев, 1984.- С. 122-125.

12. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Харченко Г.К. и др. Распределение радиоактивного изотопа в стыке при сварке давлением // Автомат. сварка.- 1984.- N10.- С. 73-74.

13. Мазанко В.Ф., Томашевский Н.А. Исследование цементированного слоя железа методом МСКЭ // Металлофизика.- 1985.- т.7,N1.- С. 118-120.

14. Мазанко В.Ф., Миронов В.М., Покоев А.В. и др. Исследование влияния магнитного поля на диффузию алюминия в железе методом радиоактивных изотопов // Металлофизика.- 1985.-т.7, N5.- С. 115-116.

15. Ворона С.П., Мазанко В.Ф., Полищук Д.Ф., Фальченко В.М. Установка для ударного деформирования металлов // Приборы и техника эксперимента.- 1986.- N4.- С. 196-198.

16. Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е., Томашевский Н.А. и др. Исследование процессов внедрения атомов ниобия в железо при лазерном облучении // Металлофизика.- 1986.- т.8,N3.-С.22-24.

17. Мазанко В.Ф., Миронов В.М., Фальченко В.М. и др. Диффузия ^{26}Al в железе при 730°C . // ФММ.- 1986.-т.62,N4.- С.818-819.

18. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Исследование массопереноса при импульсном воздействии // Сб. "Диффузионные процессы в металлах".-Тула.-1987.- С. 107-112.

19. Мазанко В.Ф., Остапкин В.В., Петров Д.Н., Якубцов И.А. Особенности энергетики комплексных дефектов упаковки в легированном аустените при высоких давлениях // Физика и техника высоких давлений.- 1987.- вып. 26.- С. 77-81.

20. Белоцкий А.В., Иващенко Е.В., Мазанко В.Ф. Формирование дислокационной структуры диффузионной зоны при науглероживании сплавов железа с титаном и хромом // Сб. "Влияние внешних воздействий на структуру и свойства твердых тел".- Куйбышев.- 1987.- С. 18-22.

21. Мазанко В.Ф., Петров Д.Н., Фальченко В.М. и др. Влияние температуры на подвижность атомов никеля в аустенитных хромоникелевых сталях при высокоскоростной деформации // Металлофизика.- 1988.- т.10,№2.- С. 124-125.

22. Ковтун В.И., Мазанко В.Ф. Движение высокоскоростной струи в плотной среде // ЖТФ.- 1988.- т.58,№4.- С. 825-827.

23. Абрамчук А.П., Мазанко В.Ф., Михайлов В.В. и др. Распределение элементов в поверхностных слоях алюминия при электросквозном легировании // ЗОМ.- 1989.- №6.- С. 12-13.

24. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Прокопенко Г.И., Фальченко В.М. Массоперенос в железе и сталях в условиях многократных импульсных воздействий // Сб. "Прогрессивные технологические процессы и оборудование для термообработки.- Москва, 1989.- С. 43-45.

25. Ковтун В.И., Мазанко В.Ф., Трефилов В.И. Взаимодействие тела с плотной средой при движении с дозвуковой скоростью // ФХММ.- 1989.- №4.- С. 34-39.

26. Алексеевский В.П., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. и др. Массоперенос в металлах, вызванный сходящейся цилиндрической ударной волной // Порошковая металлургия.-1989.-№10.-С.80-84.

27. Журавлев А.Ф., Журавлев Б.Ф., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Распределение меченых атомов в ударно нагруженных металлах // Металлофизика.- 1990.- т.12,№4.- С. 8-10.

28. Гитлевич А.Е., Мазанко В.Ф., Томашевский Н.А. и др. Массоперенос в поверхностных слоях стали и титана при многократном воздействии импульсных разрядов // ЗОМ.- 1990,№2.- С. 20-23.

29. Неможкаленко В.В., Мазанко В.Ф., Томашевский Н.А. и др. Особенности формирования поверхностных слоев при искровых разрядах // Металлофизика.- 1990.- т.12,№3.- С. 132-133.

30. Герцрикен Д.С., Игнатенко А.И., Мазанко В.Ф. и др. Влияние типа твердого раствора на подвижность атомов в

сплавах при ударном сжатии // *Металлофизика.*-1990.- т.12,№2.- С. 67-71.

31. Евсеева Т.Т., Ворона С.П., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М. Исследование влияния размера атома на массоперенос в железе при импульсном нагружении // *Металлофизика.*- 1990.- т.12,№5.- С. 3-6.

32. Гасик М.И., Петров Д.Н., Мазанко В.Ф. и др. Аномальная подвижность атомов при ударном нагружении ПДК сплавов железо-марганец-углерод с разной энергией дефектов упаковки // *ДАН УССР.*-1990.- сер.А,№8.- С. 79-82.

33. Захаров С.М., Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф. и др. Массоперенос в твердой фазе при ударном нагружении пары никель-цирконий // *Металлофизика.*- 1990.- т.12,№5.- С. 94-97.

34. Гусак А.М., Мазанко В.Ф., Томашевский Н.А., Фальченко В.М. Особенности фазообразования при импульсном воздействии // *Металлофизика.*- 1992.- т.14,№3.- С. 33-36.

35. Лариков Л.Н., Белякова М.Н., Жолудь В.В., Мазанко В.Ф. Массоперенос при ударном нагружении монокристаллов молибдена и молибдена, легированного рением // *Металлофизика.*- 1992.- т.14,№2.- С. 96-100.

36. Mazanko V.F., Pokoev A.V., Stepanov D.I., Trofimov I.S. The Constant Magnetic Field Influence on Diffusion of ^{63}Ni in $\alpha\text{-Fe}$ // *Phys. Stat. Sol. (a).*-1993.- v.137,k1.- P. 1-3.

37. Мазанко В.Ф., Докторович Э.Л., Фальченко В.М., Зворыкин Л.О. Установка для электроискровой обработки // *Информ. листок №2-137.*- Киев: УКРНИИТИ.- 1982.- 3 с.

38. Герцрикен Д.С., Игнатенко А.И., Мазанко В.Ф. и др. Интенсификация процесса легирования поверхности металлических изделий // *Информ. листок №3-034.*- Киев: УКРНИИТИ.- 1983.- 3 с.

39. Мазанко В.Ф., Соловьев А.Д., Харитонский С.Я., Яковенко П.Г. Уплотнительный узел для прогреваемого сверхвысоковакуумного затвора // *Авторское свидет. N 1255794.*- 1986.

40. Ворона С.П., Докторович Э.Л., Мазанко В.Ф. и др. Способ механико-химико-термической обработки металлов и сплавов // *Авторское свидет. N 1354752.*- 1987.

41. Ворона С.П., Мазанко В.Ф., Полищук Д.Ф. и др. Способ химико-термической обработки металлических изделий // *Авторское свидет. N 1317971.*- 1987.

42. Абрамчук А.П., Бобрин С.В., Мазанко В.Ф. и др. Способ изготовления анода для электролитического получения диоксида марганца // *Авторское свидет. N 1426144.*- 1988.

Мазанко
2654301

AB 30.109