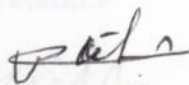


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гренго Абдель Кадер Омар Салах



Формирование фаз при взаимной диффузии
вдоль движущихся поверхностей раздела
в бинарных металлических системах
на основе никеля

01.04.07 — Физика твердого тела

01.04.07 — Физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков — 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00740221 (G)

Формирование фаз при гетерогенной диффузии
в системах с переменными параметрами
на основе теории

01.04.07 — Физико-математические науки

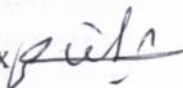
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гренго Абдель Кадер Омар Салах



Формирование фаз при взаимной диффузии
вдоль движущихся поверхностей раздела
в бинарных металлических системах
на основе никеля

01.04.07 — Физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков — 1996



ДВ 34.000

Диссертация является рукописью.
Диссертация выполнена в Харьковском государственном университете.

Научные руководители: доктор физ.-мат. наук, профессор
Кагановский Юрий Семенович
доктор физ.-мат. наук, профессор
Парицкая Людмила Натановна

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор,
чл.-корр. НАНУ
Слезов Виталий Валентинович
(ННЦ Харьковский физико-технический институт)
доктор физ.-мат. наук, профессор
Пугачев Анатолий Тарасович
(Харьковский государственный политехнический университет)

Ведущая организация: Институт монокристаллов НАН Украины,
г. Харьков

Защита состоится "12" апреля 1996 г. в 16⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета Д 02.02.15 в
Харьковском государственном университете (310077, г. Харьков,
пл. Свободы, 4, ауд. им. К.Д.Синельникова)
С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ

Автореферат разослан "11" марта 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

В.П.Пойда

ЛНБ им. В. Стефани — 2 —
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень исследования тематики диссертации. Процессы диффузионного переноса массы на поверхностях раздела достаточно основательно исследованы применительно к само- и гетеродиффузии и практически не исследованы в условиях взаимной диффузии атомов диффузанта и подложки, в особенности когда она не сопровождается диффузией в объеме. В исследованиях закономерностей само- и гетеродиффузии на атомношероховатых поверхностях, на которых каждая точка поверхности может быть источником и стоком атомов, были определены количественные характеристики поверхностной диффузии и установлены ее атомные механизмы. На атомногладких поверхностях, где источники и стоки атомов локализованы на элементарных ступенях, кинетика процессов поверхностного массопереноса может определяться не только диффузионным транспортом вещества в меру коэффициента поверхностной диффузии D_s , но и скоростью отрыва или присоединения атомов к ступеням в меру кинетического коэффициента β_s . Представления о диффузионно-кинетическом режиме процессов переноса массы позволили установить взаимосвязь между кинетикой этих процессов и реальной структурой вицинальных поверхностей.

Естественно предположить, что взаимная поверхностная диффузия, когда в отличие от гетеродиффузии навстречу потоку атомов диффузанта осуществляется поток атомов подложки, будет иметь свои закономерности, главная из которых заключается в возможном формировании новых поверхностных фаз. До настоящего времени были неизвестны ни условия формирования поверхностных фаз, ни кинетические коэффициенты, ни атомные механизмы фазообразования при взаимной поверхностной диффузии. Между тем исследование закономерностей поверхностного фазообразования представляет как научный, так и практический интерес, поскольку этот процесс является, с одной стороны, источником сведений о роли дефектов структуры в диффузионном переносе массы, с другой, — важным элементом многих технологий создания новых композиционных материалов на основе тонких пленок, нанокристаллов и других объектов с развитой свободной поверхностью и границами раздела между элементами структуры.

Цель и основные задачи исследования. Цель работы состояла в экспериментальном и теоретическом исследовании механизмов и кинетики формирования твердых растворов в системах Au-Ni и Cr-Ni и интерметаллических фаз в системах Cd-Ni и Mo-Ni в условиях взаимной диффузии вдоль свободной поверхности и поверхностей раздела между элементами структуры.

В связи с этим в работе ставились следующие задачи:

1) исследовать кинетику формирования твердых растворов Au в Ni и Cr в Ni и сопутствующие эффекты при взаимной поверхностной и граничной диффузии атомов компонентов раствора при температурах $T \approx (0.3-0.5) T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления никеля), когда "отсос" в объем практически отсутствует, т.е. $(D_v t)^{1/2} \leq a$ (a — параметр решетки, D_v — коэффициент объемной диффузии);

2) на основании теоретического анализа и экспериментальных данных, полученных на системах Au-Ni и Cr-Ni, установить атомный механизм формирования твердых растворов в приповерхностных и приграничных слоях без участия объемной диффузии;

3) экспериментально и теоретически исследовать механизм и кинетику формирования интерметаллических фаз $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$ и MoNi при взаимной поверхностной диффузии в системах Cd-Ni и Mo-Ni в интервалах температур $T = 200-280^\circ\text{C}$ и $T = 950-1100^\circ\text{C}$, соответственно;

4) по кинетике формирования поверхностных слоев твердых растворов и интерметаллических фаз, воспользовавшись результатами теоретического анализа, определить кинетические коэффициенты, в меру которых осуществляется рост поверхностных фаз.

Научная новизна. На примере бинарных металлических систем на основе Ni (Au-Ni и Cr-Ni) установлено формирование твердых растворов в приповерхностных и приграничных слоях при $T \approx (0.3-0.5) T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления Ni) без участия объемной диффузии. Впервые обнаружено, что этот процесс сопровождается возникновением макроскопического ступенчатого рельефа в зоне поверхностной диффузии и установлен кинетический закон его распространения.

Решена задача о взаимной диффузии вдоль поверхности атомов диффузанта и подложки со стоком на элементарных ступенях, приводящим к послойному росту твердого раствора. Получено решение для распределения концентрации на поверхности формирующегося раствора и нормальной скорости его роста, которая зависит от плот-

ности ступеней и величины пересыщения. На основании установленного соответствия между экспериментальными и теоретическими результатами предложен атомный механизм формирования твердых растворов на движущихся поверхностях раздела без участия объемной диффузии. Предложенный механизм дает возможность описать некоторые закономерности явления диффузионно-индуцированной граничной миграции (ДИГМ), которые раньше были непонятны, а именно, определить направление движения границы при ДИГМ, объяснить экспериментально установленный факт движения разных участков одной границы в разные стороны.

Впервые экспериментально и теоретически исследована кинетика латерального распространения интерметаллических фаз при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности. Установлена возможность определения констант диффузии по поверхности интерметаллидов по кинетике их роста. На основании сопоставления экспериментальных результатов с теоретическим анализом впервые определены коэффициенты диффузии по поверхности интерметаллидов $Cd_{21}Ni_3$ и $MoNi$, которые оказались на 2-3 порядка выше, чем в тех же температурных условиях для металлов.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Атомный механизм формирования твердых растворов в приповерхностных слоях без участия объемной диффузии, заключающийся в послойном росте раствора вследствие взаимной поверхностной диффузии атомов диффузанта и подложки со стоком на ступенях.

2. Экспериментальное обнаружение и закономерности формирования макроскопического ступенчатого рельефа, сопровождающего послойный рост твердого раствора при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности в отсутствие отсоса в объем.

3. Физическая модель, описывающая атомный механизм ДИГМ, основанный на зависимости скорости движения межзеренной границы общего типа от разности плотностей ступеней на ее берегах. Модель позволяет определить направление движения границы и объяснить экспериментально установленный факт движения разных участков границы в разных направлениях.

4. Механизм формирования интерметаллических фаз при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности. Определение кон-

стант диффузии на поверхности интерметаллидов $Cd_{21}Ni_3$ и $MoNi$ в интервалах температур $T = 200-280^\circ C$ и $T = 950-1100^\circ C$, соответственно.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основании полученных экспериментальных и теоретических результатов построены физические модели, описывающие закономерности формирования новых фаз (твердых растворов и интерметаллидов) при взаимной диффузии вдоль движущихся в процессе диффузии поверхностей раздела (свободных поверхностей, межзеренных и межфазных границ). Установленная возможность определения констант поверхностной диффузии для твердых растворов и интерметаллических фаз по кинетике их роста и полученные значения характеристик поверхностной диффузии для интерметаллических фаз $Cd_{21}Ni_3$ и $MoNi$ могут быть использованы для развития представлений о диффузии и диффузионных процессах в упорядоченных структурах. Знание этих диффузионных характеристик также необходимо для определения условий получения композиционных материалов с участием интерметаллидов на основе тонких пленок, дисперсных порошков, нанокристаллов и других объектов с развитой свободной поверхностью и границами раздела между элементами структуры.

Диссертация выполнена на кафедре физики кристаллов Харьковского госуниверситета в соответствии с планами НИР по теме "Взаимная диффузия вдоль поверхностей раздела; эволюция структуры и фазового состава в кристаллических структурах с дефектами", № 32-12-94 выполняемой по решению Минобразования Украины.

Личный вклад соискателя состоит в получении представленных в работе экспериментальных результатов, их обработке и обсуждении, сопоставлении полученных экспериментальных данных с теоретическим анализом, выполнении расчетов диффузионных характеристик, в меру которых осуществляется формирование и рост фаз на движущихся поверхностях раздела.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях:

I конференция "Физические явления в твердых телах", ХГУ, Харьков — 1993г.; II конференция "Физические явления в твердых телах", ХГУ, Харьков — 1995г.; "1-st International Workshop on Diffusion and Stresses", Balatonfured, Hungary May — 1995; "7-th

International Conference Intergranular and Interphase Boundaries in Materials", Portugal, 1995.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований; она содержит 113 страниц, в том числе 31 рисунок и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой (обзорной) главе изложены существующие представления о закономерностях поверхностной взаимной диффузии в растворимых системах при достаточно высоких температурах $T > 0.7T_{пл}$, когда отсос в объем значителен: $(D_v t)^{1/2} > a$. Описаны известные из литературы представления о формировании твердых растворов при взаимной граничной диффузии в отсутствие отсоса в объем $((D_v t)^{1/2} \leq a)$ механизмом ДИГМ, а также особенности процессов диффузионного формирования фаз в дисперсных объектах — тонкопленочных и порошковых, в которых роль поверхностей раздела является определяющей.

Во второй главе описаны методы исследования, разные постановки диффузионных экспериментов, отличающиеся типом источника диффузии вдоль поверхностей раздела, и обоснован выбор систем, на которых проведены исследования.

Эксперименты на свободной поверхности проводили в трех разных постановках: 1) на поверхности кристалла В, по которой диффундируют атомы А из источника в виде дисперсной (5-10 мкм) частицы А, припекающейся к поверхности В; 2) на поверхности В, по которой распространяются атомы А из источника в виде тонкой (толщиной 100-300 нм) пленки А с резкой границей, нанесенной на подложку В испарением в вакууме; 3) на поверхности двухслойного диффузионного образца А-В, в котором между слоями А и В формируются фазы в результате взаимной диффузии в объеме, а источником диффузии атомов А по поверхности В является пластинка А. Объектами исследования были двухкомпонентные металлические системы с разными типами фазовых диаграмм, компоненты которых

образуют либо твердые растворы замещения, либо интерметаллические фазы. Основные эксперименты проводили на системах Au-Ni, Mo-Ni и Cd-Ni.

Эксперименты, выполненные на трех типах образцов, состояли в проведении изотермических отжигов разной длительности в защитной атмосфере с последующим изучением методами оптической и растровой электронной микроскопии в сочетании с рентгеновским микроанализом тех изменений, которые происходили на поверхности вблизи источника диффузии.

Эксперименты, в которых исследовалось участие движущихся границ раздела между элементами структуры в формировании фаз, проводили на модельном объекте — дисперсном многослойнике с чередующимися тонкими ($h \leq 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$) слоями А-В-А-В... Исследования проводили на системе Ni-Cr с практически односторонней растворимостью Cr в Ni. Методами оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и рентгеновского фазового анализа исследовали эволюцию фазового состава и структуры, а также изменения локального элементного состава в процессе изотермических отжигов при 400 и 500°C.

Третья глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию механизма и кинетики формирования твердых растворов при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности, межзеренных и межфазных границ в условиях, когда диффузия в объеме практически отсутствуют, т.е. $(D_v t)^{1/2} \leq a$. Известно, что основным механизмом фазообразования в этом случае является диффузионно-индуцированная граничная миграция ДИГМ, которая состоит в движении границ, вызванном диффузией вдоль них чужеродных атомов, и последующем формированием новых фаз за движущимися границами.

Для выяснения атомного механизма ДИГМ в работе предлагается исследовать процесс низкотемпературного фазообразования на свободной вицинальной поверхности кристалла, которую можно рассматривать как один из берегов "вскрытой" межзеренной границы. Такое рассмотрение позволяет установить взаимосвязь скорости образования новой фазы с атомной структурой поверхности, а именно, с плотностью атомных ступеней, которая может быть задана ориентацией поверхности. В работе приведены экспериментальные резуль-

таты, полученные при исследовании кинетики формирования твердых растворов и сопутствующих эффектов на примере диффузии Au из Au-пленки с резкой границей по поверхности Ni в интервале температур 550-700°C что составляет $(0.45-0.55)T_{\text{пл}}$ никеля. Измерена кинетика отступления Au-пленки, являющейся источником диффузии. С помощью рентгеновского микроанализа измерено распределение концентрации атомов Au и Ni и установлено плавное спадание концентрации диффузанта (Au) с удалением от края Au-пленки, что свидетельствует о формировании диффузионной зоны поверхностной диффузии. Из анализа измеренных диффузионных распределений сделан вывод о формировании поверхностного слоя твердого раствора толщиной Δz_1 не менее 0.1 мкм. Между тем в соответствии с известными при этих температурах значениями коэффициентов объемной диффузии Au в Ni и его сплавы с Au в условиях взаимной диффузии $D_{\text{Au}} \approx (1.0-6.0) \cdot 10^{-23} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ при 550°C (при концентрациях Ni 0.75-0.98) отсос в объем за время диффузии $t \approx 10^5 \text{ с}$ мог бы произойти на глубину $\Delta z \approx (D_{\text{Au}}t)^{1/2} \approx 10^{-3} \text{ мкм}$, т.е. меньшую на 2 порядка. Следовательно, твердый раствор формируется в приповерхностном слое без участия объемной диффузии, только в результате диффузии атомов Au по поверхности Ni. Установлено, что исследуемый процесс сопровождается формированием ступенчатого макрорельефа, область распространения которого коррелирует с шириной диффузионной зоны поверхностной диффузии.

Для описания наблюдаемого низкотемпературного образования растворов на свободной поверхности и установления атомного механизма процесса рассмотрена задача о взаимной поверхностной диффузии атомов двух сортов А и В при условии, что "отсосом" их в объем можно пренебречь, а их стоком являются элементарные ступени. Если вещества А и В взаимно растворимы, то на ступенях они перемешиваются, а так как химические потенциалы атомов А и В в растворе ниже, чем в чистых компонентах, то в диффузионной зоне поверхностной диффузии возникает пересыщение, которое вызывает послойный рост твердого раствора. В результате на поверхности формируется слой раствора, объемная концентрация компонента А в котором $C_A(x)$ убывает с удалением от источника диффузии.

Из диффузионных уравнений получены распределения концентраций, которые зависят от характерных расстояний

$\lambda_{SA} = (D_{SA}/\beta_{SA}\rho)^{1/2}$ и $\lambda_{BA} = (D_{BA}/\beta_{BA}\rho)^{1/2}$, определяющих протяженности диффузионных зон в условиях стационарного послойного роста твердого раствора (за счет захвата диффундирующих атомов ступенями); каждое из расстояний λ_i тем больше, чем больше соответствующий коэффициент диффузии и чем меньше количество атомов, захватываемых ступенями, которое пропорционально $\beta_i\rho$. На основе полученных распределений концентраций определены количества адатомов I_A и I_B , "захваченных" ступенями в единицу времени в расчете на единичную поверхность, рассчитана нормальная скорость роста твердого раствора V_n . Результирующее выражение для V_n имеет вид:

$$V_n = N_0\rho\{\beta_{SA}C_0\sigma_A\omega_A \exp(-x / 2\lambda_{SA}) + \beta_{SB}C_{Bz}\sigma_B\omega_B \exp[(x - \lambda_{SA}) / \lambda_{SB}]\} \quad (1)$$

где N_0 — поверхностная плотность атомных позиций; C_0 — концентрация в источнике диффузии, ω_A и ω_B — атомные объемы компонентов А и В, σ_A и σ_B — пересыщения адатомами. Таким образом, V_n зависит от плотности ступеней ρ , кинетических коэффициентов ступеней β_{SA} и β_{SB} и пересыщений адатомов. В работе осуществлено сопоставление полученных на системе Au-Ni экспериментальных данных с проведенным теоретическим анализом. Установлено хорошее соответствие между результатами расчетов и экспериментов, на основании чего предложен атомный механизм образования растворов в приповерхностных слоях без участия объемной диффузии. Механизм основан на взаимной диффузии по поверхности адатомов диффузанта и подложки со стоком на элементарных ступенях, которые перемещаясь, оставляют за собой новые слои твердого раствора.

По аналогии со свободной поверхностью рассмотрена задача о взаимной диффузии атомов сорта А и В вдоль межзеренной (или межфазной) границы со стоком на ее берегах, в результате чего граница смещается с некоторой нормальной скоростью V_n , оставляя за собой твердый раствор в объеме зерна. Распределения истинной и равновесной концентраций найдено в предположении, что раствор формируется с одной стороны границы, где плотность ступеней равна ρ_1 . Скорость диффузионно-индуцированной граничной миграции (ДИГМ) определяется потоком атомов сорта В с другого берега границы, т.е. из соседнего зерна, в область раствора. Этот поток про-

порционален разности химических потенциалов атомов сорта В в чистом компоненте В и в растворе, и определяет скорость $V_n(x)$, которая пропорциональна разности соответствующих концентраций, и зависит от плотности ступеней на разных берегах границы ρ_1 и ρ_2 :

$$V_n(x) = \beta_{\text{ВВ}} N_0 \omega_{\text{В}} [\rho_2 - \rho_1 (1 - C)], \quad (2)$$

где $C=C(x)=C_0 \exp(-x/\lambda_{\text{ВВ}})$, $\beta_{\text{ВВ}}$ — кинетический коэффициент ступеней по отношению к атомам В, $\lambda_{\text{ВВ}}$ — характерная диффузионная длина вдоль движущейся границы.

Соотношение (2) объясняет, почему на разных участках межзеренной границы твердый раствор может формироваться по разные стороны от нее. Это связано с тем, что скорость ДИГМ зависит от разности плотностей ступеней на разных берегах границы. Раствор формируется на том берегу границы, где плотность ступеней ниже, поскольку выражение в квадратных скобках в (2) должно быть положительным. Если протяженность границы мала по сравнению с длиной $\lambda_{\text{ВВ}}$, скорость ДИГМ практически постоянна по длине границы. Эти выводы в работе подтверждены экспериментально на дисперсных многослойных образцах системы Cr-Ni.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования кинетических закономерностей формирования и роста интерметаллических фаз на свободной поверхности двух металлических систем Cd-Ni и Mo-Ni. По данным рентгеновского микроанализа, из всех возможных фаз, предусмотренных фазовыми диаграммами, в системе Cd-Ni в интервале температур 200-280°C формируется одна фаза $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$, в системе Mo-Ni при 950-1100°C — одна фаза MoNi. Установлено, что рост обеих фаз осуществляется униполярно, т.е. один из компонентов диффундирует намного быстрее другого: фаза $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$ растет в результате диффузии через нее атомов Cd и реакции на границе $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$ -Ni, фаза MoNi в результате диффузии атомов Ni и реакции на границе MoNi-Mo. Униполярный рост слоев интерметаллидов сопровождается их смещением как целого в сторону быстро диффундирующих компонентов, т.е. соответственно в сторону Cd в системе Cd-Ni и Ni в системе Mo-Ni. Установлено, что интерметаллид MoNi зарождается на поверхности в виде отдельных островков, которые подрастая в процессе поверхностной диффузии Ni, сливаются, формируя сплошной слой

фазы MoNi. В отличие от этого интерметаллид $Cd_{21}Ni_5$ распространяется по поверхности сплошным слоем; минимальная толщина его на фронте распространения h^* , которую можно наблюдать методом оптической микроскопии, порядка 1 мкм. Методами оптической и растровой электронной микроскопии в сочетании с рентгеновским микроанализом проведены измерения кинетики латерального распространения интерметаллических фаз $Cd_{21}Ni_5$ и MoNi по свободной поверхности и роста их в объеме (т.е. между слоями составляющих их компонентов); исследована также эволюция профилей поверхностных фаз в процессе их роста.

Проведен теоретический анализ закономерностей роста поверхностных фаз при взаимной поверхностной диффузии для случая униполярного роста, когда $D_A \gg D_B$ как в объеме фазы, так и на ее поверхности. Атомы А диффундируют из источника А по поверхности В; в результате химической реакции между А и В формируются вначале отдельные зародыши, а затем — сплошной слой фазы АВ, после чего диффузия атомов А осуществляется по поверхности АВ.

Решена задача о распределении концентрации $C_s(x)$ на поверхности интерметаллида, которая определяется характерной длиной $\lambda = (D_s \delta / \beta)^{1/2}$, где D_s — коэффициент диффузии атомов А по поверхности интерметаллида АВ; δ — толщина слоя, в котором диффузия осуществляется в меру D_s , β — кинетический коэффициент, характеризующий скорость встраивания атомов А в слой АВ.

Установлено, что на начальных стадиях роста кинетика латерального распространения фазы описывается параболическим законом, что подтверждено экспериментально и использовано для расчета произведений $D_s \delta$ для интерметаллидов $Cd_{21}Ni_5$ и MoNi.

В работе установлена и осуществлена еще одна возможность определения констант поверхностной диффузии для растущих фаз по эволюции профиля слоя фазы в процессе ее латерального распространения. Значения $D_s \delta$, определенные по кинетике латерального распространения слоя фазы и эволюции ее профилей, практически совпадают. Анализ полученных произведений $D_s \delta$ показал, что при $\delta \approx 10^{-9}$ м, получаются высокие значения D_s до $10^6 - 10^7$ м²с⁻¹, которые на 2-3 порядка выше, чем в тех же условиях для металлов, но отношение коэффициентов поверхностной и объемной диффузии

$D_s/D_v \approx 10^4 - 10^5$ для интерметаллидов того же порядка, что и для металлов.

В заключении суммированы основные результаты, полученные в работе:

1. Методами оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и рентгеновского фазового анализа установлено, что в бинарных металлических системах на основе Ni при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности и межзеренных и межфазных границ в интервале температур $T \approx (0.4 - 0.55) T_{пл}$ ($T_{пл}$ — температура плавления никеля) в приповерхностных и приграничных областях формируются слои растворов макроскопической толщины (более 0.1 мкм) без участия объемной диффузии.

2. Впервые обнаружено, что формирование твердого раствора в приповерхностном слое кристалла при взаимной диффузии вдоль его свободной поверхности в отсутствие отсоса в объем, т.е. при условии $(D_v t)^{1/2} \leq a$, сопровождается возникновением макроскопического ступенчатого рельефа, который распространяется от источника диффузии по закону $\ell_{ст} \sim \ln t$. Показано, что ступенчатый рельеф является следствием послойного роста твердых растворов на вицинальных поверхностях.

3. В предположении взаимной диффузии вдоль вицинальной поверхности атомов диффузанта А и подложки В со стоком на элементарных ступенях, приводящим к послойному росту твердого раствора, теоретически рассчитано распределение концентрации на поверхности формирующегося раствора и нормальная скорость его роста V_n . Показано, что V_n зависит от плотности ступеней ρ на поверхности, кинетических коэффициентов ступеней по отношению к атомам А и В (β_{SA} и β_{SB}), пересыщения адатомов и характерной диффузионной длины ($\lambda_{SA} = (D_{SA}/\beta_{SA}\rho)^{1/2}$).

4. Путем сопоставления экспериментальных данных по кинетике формирования твердых растворов Au в Ni на поверхности Ni и расширения зоны ступенчатого рельефа с результатами теоретического анализа определены кинетические коэффициенты ступеней, с помощью которых рассчитаны значения V_n и, соответственно, толщины слоев растворов, формирующихся без участия объемной диффузии. Установлено хорошее соответствие между результатами расчетов и экспериментов. Предложен атомный механизм низкотемпе-

ратурного формирования растворов в приповерхностных слоях. Механизм основан на взаимной диффузии по поверхности адатомов диффузанта и подложки со стоком на элементарных ступенях, которые перемещаясь, оставляют за собой слой твердого раствора.

5. Основываясь на аналогии между структурой свободной поверхности и ступенчатых берегов межзеренной границы общего типа, проведен теоретический анализ низкотемпературного формирования твердого раствора механизмом ДИГМ при взаимной диффузии вдоль границы, которая, как и свободная поверхность, смещается из-за захвата атомов обоих сортов ступенями на ее берегах. Показано, что нормальная скорость V_n перемещения границы определяется разностью плотностей ступеней на ее берегах и раствор формируется на том берегу границы, где плотность ступеней ниже.

6. На основании проведенного теоретического анализа и подтверждающих его экспериментальных результатов предложен атомный механизм нормального роста твердого раствора при ДИГМ, который основан на взаимной диффузии вдоль границы с преимущественным стоком атомов диффузанта на одном из ее берегов и поперечными скачками собственных атомов через границу. Механизм позволяет определить направление движения границы при ДИГМ и объяснить установленный экспериментальный факт движения разных участков одной и той же границы в разные стороны.

7. Методами оптической и растровой электронной микроскопии в сочетании с рентгеновским микроанализом впервые исследована кинетика латерального распространения интерметаллических фаз при взаимной диффузии вдоль свободной поверхности в системах Cd-Ni в интервале температур $T=200-280^\circ\text{C}$ и Mo-Ni при $T=950-1100^\circ\text{C}$. Установлено, что в этих условиях в системе Cd-Ni формируется только одна γ -фаза $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$, в системе Mo-Ni одна фаза MoNi. Рост обеих фаз осуществляется униполярно, т.е. один из компонентов диффундирует намного быстрее другого: фаза $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$ растет в результате диффузии через нее атомов Cd и реакции на границе $\text{Cd}_{21}\text{Ni}_5$ -Ni, фаза MoNi в результате диффузии атомов Ni и реакции на границе MoNi-Mo.

8. В предположении униполярного роста фазы решена задача о распределении концентрации на ее поверхности. Получены кинетические уравнения, описывающие закономерности латерального ра-

спространения фазы и эволюцию ее профиля. Установлена возможность определения констант диффузии по поверхности интерметаллидов по кинетике их латерального распространения.

9. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с теоретическим анализом, на основании чего впервые определены коэффициенты диффузии по поверхности интерметаллидов в процессе их латерального распространения. Установлено, что полученные для интерметаллидов $Cd_{21}Ni_5$ и $MoNi$ коэффициенты диффузии на 2-3 порядка выше, чем в тех же условиях для металлов, но отношение коэффициентов поверхностной и объемной диффузии $D_s/D_v \approx 10^4-10^5$ для интерметаллидов того же порядка, что и для металлов.

Список литературы по теме диссертации

1. Низкотемпературное формирование твердых растворов в приповерхностных слоях кристаллов в условиях припекания дисперсных частиц / Ю.С. Кагановский, Ф. Лофай, Л.Н. Парицкая, А.О. Гренго // Порошковая металлургия. - 1994. - N516. - С.8-16.
2. Kaganivskii Yu.S., Paritskaya L.N., Grenго A.O. Diffusional Phase Formation at Interfaces in Binary Crystal Systems // Functional Materials. - 1994. - V.1, N1. - P.30-38.
3. Кагановский Ю.С., Гренго А.О. Кинетика послойного роста твердого раствора в процессе взаимной поверхностной диффузии // Физические явления в твердых телах; Материалы конференции, г.Харьков. - 1993. - С.25.
4. Кагановский Ю.С., Парицкая Л.Н., Гренго А.О. Эволюция ступенчатого микрорельефа в процессе взаимной поверхностной диффузии // Физические явления в твердых телах; Материалы конференции, г.Харьков. - 1995. - С.65.
5. Kaganovskii Yu.S., Paritskaya L.N., Grenго A.O. The Effect of Stress on the Evolution of Macrostep Morphology During Surface Interdiffusion // Abstract and Program 1st International Workshop on Diffusion and Stresses, Hungary. - 1995. - P.54.
6. Kaganovskii Yu.S., Paritskaya L.N., Grenго A.O. Atomic Mechanism of Interface Motion at Low Temperature Phase Formation // Abstracts of 7-th International Conference Intergranular and Interphase Boundaries in Materials. Portugal. - 1995. - P.231.

Gringo Abdel Kader Omar Salah. "Phase formation during interdiffusion along migrating interfaces in binary metallic systems on the basis of nickel". Manuscript dissertation is to achieve the degree of Doctor of Philosophy in physics and mathematics on the Speciality 01.04.07 — Solid state physics. Kharkov State University. Kharkov. Ukraine. 1996.

6 scientific works are maintained. Regularities of layer by layer growth of solid solution in subsurface layer of crystal and accompanying phenomenon of step relief formation without volume diffusion participation have been studied experimentally and theoretically. Atomic mechanism of solid solution formation during interdiffusion along migrating interfaces has been proposed. It makes more precise the mechanism of DIGM (diffusion-induced grain boundary migration). Kinetics of lateral spreading of intermetallic phase during interdiffusion along free surface has been investigated theoretically and experimentally. The constants of diffusion on the surface of intermetallics $Cd_{21}Ni_3$ and $MoNi$ have been determined at first.

Key words: layer by layer growth, solid solution, step relief, interdiffusion, intermetallics, migrating interface, surface diffusion constants, lateral spreading.

Гренго Абдель Кадер Омар Салах. "Формування фаз при взаємній дифузії вздовж мігруючих поверхонь розділу в бінарних металічних системах на основі нікелю".

Дисертація у формі рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла. Харківський державний університет. Харків. Україна. 1996.

Робота ґрунтується на 6 наукових працях. Експериментально та теоретично досліджені закономірності пошарового росту твердих розчинів у приповерхневому шарі кристала та супроводжуючий процес формування ступеневого рельєфу без участі об'ємної дифузії. Запропоновано атомний механізм низькотемпературного формування розчинів на мігруючих поверхнях розділу, який уточнює механізм дифузійно-ініційованої граничної міграції (ДІГМ). Досліджена кінетика латерального розповсюдження інтерметалідної фази при взаємній дифузії вздовж вільної поверхні та встановлені константи дифузії на поверхні інтерметалідів $Cd_{21}Ni_3$ та $MoNi$, які раніш були невідомі.

Ключові слова: пошаровий ріст, ступеневий рельєф, твердий розчин, інтерметалід, взаємна дифузія, мігруючі поверхні розділу, константи поверхневої дифузії, латеральне розповсюдження.

AB 31.552

Информация о работе ИТ-подразделения

В ходе работы ИТ-подразделения в период с 01.01.2024 по 31.12.2024 годами были выполнены следующие задачи:

- 1. Обеспечение бесперебойной работы информационных систем.
- 2. Внедрение новых информационных систем.
- 3. Техническое обслуживание оборудования.
- 4. Обучение сотрудников.
- 5. Анализ эффективности работы ИТ-подразделения.

11/11/24

Ответственный за выпуск В.П. Мацокин

Сдано в набор 09.03.96. Подписано к печати 09.03.96.

Формат 148 x 210. Бумага RANK XEROX.

Гарнитура балтика. Печать высокая. Усл. печ. л. 0,96.

Уч.-изд. лист 0,72+0,24. Тираж 100 экз. Заказ № 10.

Издательство "КиПи-РИЗО", 310166, Харьков,
пр. Ленина 17а. Тел. (0572) 45-21-33.