

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Д.СЕРИКБАЕВА
КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Сеилханов Еркин Масхутович

Механохимические реакции в сплавах с мартенситными переходами

Специальность
6N0723 «Техническая физика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание академической степени
магистра технической физики

Научный руководитель: Квеглис Л.И. профессор, д.ф.м.н.
Научный консультант: Абылкалыкова Р.Б. дотцент, к.ф.м.н.

Усть-Каменогорск
2009

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемы твердофазного синтеза, инициированного механическим воздействием, всегда привлекали внимание исследователей. Однако механизм и кинетика твердофазных реакций до конца не поняты и, в большинстве случаев, происходит накопление экспериментальных данных. Простой возможностью реализации твердофазных реакций является возникновение структурных нестабильностей сплавов с мартенситными превращениями. Решение проблем выявления природы структурообразования, механизмов твердофазных реакций важно для создания новых материалов, используемых в различных областях науки и техники. Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними. Максимальная прочность достигается, если между матрицей и арматурой происходит образование твердых растворов или химических соединений.

Решение этих проблем важно для создания новых конструкционных материалов, используемых в машиностроении, а также для решения проблемы соединения металлических конструкций (диффузионная сварка). Сплав никелида титана широко используется в технике благодаря эффекту памяти формы. Этот эффект проявляется при мартенситном переходе. Поскольку при мартенситном превращении под действием механических нагрузок имеют место фазовые превращения с образованием новых фаз, то можно считать такие превращения твердофазными реакциями. Вероятно, можно ожидать образование продуктов твердофазной реакции на границе раздела двухслойного сплава никелида титана, испытывающего мартенситный переход при механической нагрузке [1].

Любой твердофазный процесс осуществляется благодаря диффузии, однако механизмы диффузии являются предметом острых дискуссий. Это происходит в основном из-за сложности проверки механизмов диффузии экспериментальным путем. Диффузия атомов в твердом теле - одно из основных фундаментальных свойств, на котором базируется понимание многих явлений. Величины, входящие в уравнения для параметров диффузии, приобретают свое конкретное содержание лишь при известном атомном механизме этого процесса. Смена атомом ячейки Вигнера-Зейтца происходит за время скачка порядка 10^{-13} с. Если число скачков составляет более 100, то температура локального атомного окружения может соответствовать температуре плавления, а, следовательно, организации новой ячейки Вигнера-Зейтца. Такая ячейка может представлять, собой плотную упаковку тетраэдров или структуру Франка-Каспера, поскольку на ее формирование требуется меньше энергии.

Известно, что материалы, атомная структура которых описывается многогранниками Франка-Каспера, имеют склонность к сжатию элементарной ячейки до 30 %. Многогранники Франка-Каспера – это плотноупакованные тетраэдры, в вершинах которых расположены атомы. Такие многогранники

имеют размеры несколько нанометров. Очевидно наличие больших внутренних напряжений в материалах с подобными структурами.

Известно, что нанокристаллические материалы имеют огромный потенциал не использованных полезных сочетаний свойств и приложений. Задача выявления механохимических эффектов в сплавах на основе никелида титана и установление корреляции структуры с физическими свойствами являются актуальными.

Тема диссертации соответствует «Перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований, утвержденных Министерством образования РК и президиумом РАН (раздел 1.2 «Физика конденсированных состояний и вещества»).

Цель диссертационной работы.

Выяснение физических причин и механизмов кинетических процессов, проходящих в условиях локализации деформации

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование продуктов твердофазных реакций, протекающих под действием механической нагрузки в двухслойной системе Ni-Ti и в многослойных образцах NiTi-ZrSiO₄-NiTi в зоне разрыва.
2. Исследование продуктов твердофазных реакций, протекающих в результате воздействия ударной нагрузки в зоне контакта образцов никелида титана с образцами нержавеющей стали.

Научная новизна работы.

1. Обнаружено, что продуктами твердофазных реакций, протекающих под действием механической ударной нагрузки в двухслойных системах Ni-Ti, Ni-Al, в многослойных образцах NiTi-ZrSiO₄-NiTi, а также в контакте образцов никелида титана с образцами нержавеющей стали являются наноструктурные образования в зоне контакта.
2. Продуктом реакции в системе Ni-Ti могут быть тетраэдрически плотноупакованные структуры Франка-Каспера, не характерные для равновесного состояния двухкомпонентного сплава.
3. Обнаружены аномально быстрые процессы направленной диффузии, протекающие при динамическом нагружении. Предлагается объяснение механизма обнаруженных процессов диффузии с помощью теории сдвиговой трансформационной зоны, основанной на модели возбужденных атомов.

Практическая значимость работы.

Показано, что не только на пленочных образцах, но и на массивных образцах системы Ni-Ti и сплавов с мартенситными переходами в зоне контакта могут проходить твердофазные реакции.

При покрытии слоем никелида титана толщиной несколько десятков микрон изделий из нержавеющей стали получают коррозионностойкие и износостойкие детали. Срок службы таких материалов может быть в несколько раз больше. Решается проблема прочности, долговечности, коррозионной

стойкости. Такие материалы могут быть рекомендованы для диффузионной сварки как составляющие компоненты.

Достоверность результатов и обоснованность выводов обеспечивается применением современных методов исследования в материаловедении, сопоставлением полученных результатов с современными данными других авторов

Публикации и апробация работы

Результаты докладывались на 3 Международных конференциях, в том числе на LDS (г.Сочи 2008), Международная научно-практическая конференция «Роль университетов в создании инновационной экономики» (Усть-Каменогорск - 2008); IV Международная школа-семинар «Высокотемпературный синтез новых перспективных наноматериалов» АлтГТУ «СВС-2008» (Барнаул, 2008).

1. Тажибаева Г.Б., Абылкалыкова Р.Б., Насохова Ш.Б., Квеглис Л.И., Сейлханов Е.М., Мусихин В.А. Механохимические реакции в массивных и пленочных образцах системы Ni-Ti. Фундаментальные проблемы современного материаловедения, изд. Алтайский государственный технический университет, 2007, №4. С. 31

2. Тажибаева Г.Б., Сейлханов Е.М., Квеглис Л.И., Носков Ф.М. Механохимические эффекты в двухслойных образцах никелид титана - нержавеющей стали. Low Dimensional Systems г. Сочи 5-9 сент. 2008г. с.135.

3. Тажибаева Г.Б., Сейлханов Е.М., Квеглис Л.И., Веригин А.А., Паничкин Ю.В. Механические эффекты в двухслойных образцах никелид титана-нержавеющая сталь. «Роль университетов в создании инновационной экономики». Материалы Международной научно-практической конференции 25-26 сентября 2008г. Том 2 Стр. 254-256.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В ней содержится 67 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 9 таблиц и 96 ссылки на литературные источники. Нумерация формул, таблиц и рисунков ведется по главам и пунктам. В конце каждой главы сделаны выводы. Общие выводы приведены в конце работы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Краткое содержание работы.

В *главе 1* выполнен краткий аналитический обзор литературы по теме диссертации. Даются основные понятия и определения, связанные с процессами твердофазных реакций; краткий обзор существующих моделей диффузии,

особое внимание уделяется модели возникновению структурных превращений через «сдвиговую трансформационную зону» и «жидкую зону».

Из анализа цитируемой литературы можно заключить, что особенности процессов быстрой диффузии и твердофазного синтеза на уровне межатомных взаимодействий могут быть описаны в рамках современной теории сдвиговой трансформационной зоны. Для вероятности перегруппировки частиц (трансформации) R_{\pm} (см.рис. 1.1, 1.2) и для кинетики возрастания свободного объема используются следующие уравнения:

$$R_{\pm} = R_0 \exp\left(\frac{-v_0}{v_f}\right) \exp\left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right),$$

$$\left(\frac{dv_f}{dt}\right) = -E_1 \exp\left(\frac{-v_1}{v_f}\right) + A_V \sigma \left(\frac{d\varepsilon^P}{dt}\right),$$

где v_0 – свободный объем вблизи зоны трансформации, необходимый для смещения частицы в поле напряжения сдвига, \bar{v}_f - средний свободный объем, v_1 – свободный объем, необходимый для смещения частицы при уплотнении структуры в отсутствие напряжения сдвига, (причем $v_1 < v_0$, поскольку при перегруппировке, связанной с уплотнением, требуется меньший свободный объем, чем при перегруппировке, обусловленной сдвигом), σ - напряжение, ε^P – пластическая деформация, $\bar{\sigma}$ - некоторое усредненное напряжение, R_0 , E_1 и A_V – константы.

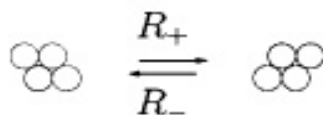


Рис.1.1 Схематическая иллюстрация модели сдвиговой трансформационной зоны предложенная A.Lemaitre [2]

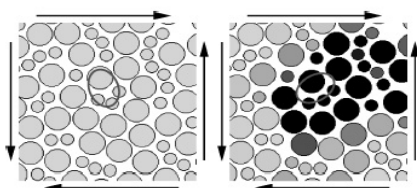


Рис.1.2 Модель сдвиговой трансформационной зоны до и после деформации [3]

Модель плотной неупорядоченной упаковки твердых сфер, разработана Берналлом [4] для жидкостей. Однако в нанометровых областях локализации деформации такая модель может быть использована благодаря тому, что локальная температура кристаллического объекта может оказаться значительно большей температуры его плавления. Поскольку в металлах процессы переноса идут с достаточно высокой скоростью то одновременно с теплоотводом, могут проходить процессы диффузии. При этом диффузия может носить направленный характер, зависящей от направления действия и распространения внешней нагрузки. Много работ посвящено порошковым и тонкопленочным

материалам в которых проходят твердофазные реакции. Особое внимание в этих работах обращается на сплавы, претерпевающих мартенситный переход. Мартенситные переходы в никелиде титана и других сплавах с эффектом памяти формы могут служить ярким примером направленности диффузионных процессов в локализованных областях с повышенной концентрацией напряжений [5].

В геометрической модели Берналла для идеальной жидкости предполагается, что атомы, рассматриваемые как твердые шары, занимают вершины пустых полиэдров (симплексов), ребра которых образованы связями между соседними атомами. Длины ребер могут изменяться примерно на 15 %. При этом свободный объем между шарами занимает 25-30%. Концепция свободного объема является одним из основных подходов, описывающих молекулярно-кинетические процессы в жидкостях и стеклах. Однако эта концепция не является однозначной. Так авторы [6] считают, что флуктуационный свободный объем, который рассчитывается по данным о кинетических свойствах вблизи температуры стеклования составляет всего лишь 2-3% от общего объема системы.

В работе [7], с целью избавиться от противоречивых понятий о свободном объеме, предлагается модель возбужденных атомов. Согласно этой модели энергия активации, равная работе смещения атомов на критическое расстояние, составляет величину, близкую к теплоте плавления для неметаллических полимеров.

Из экспериментов, проведенных на металлических стеклах, энергия активации перехода в кристаллическое состояние может составлять величину на порядок большую. Например, в [8, 9] энергия активации межзеренной ползучести наноструктурного никеля, составляет 115 кДж/моль. Согласно релаксационной теории стеклования [10, 11] энергия, заключенная в возбужденном объеме вещества, может максимально превышать теплоту стеклования примерно в 32 раза. Эти результаты подтверждаются более поздними работами по супер-аррениусовской релаксации в твердофазных стеклах.[3, 12]

Глава 2 посвящена описанию образцам и методам эксперимента.

Для исследования были выбраны материалы, в которых выявлена структурная неустойчивость и где легко происходят прямой и обратный мартенситные превращения. Были взяты образцы сплавов Ni-Ti, Ni-Al, стали инварных составов. Образцы в исходном состоянии имели аустенитную структуру, были гладко отполированы, имели размеры площадью 2,5 см² и толщиной 0,1-0,3мм.

Методы эксперимента: нагружение образцов в электромеханической гидравлической машине (пресс) и в установке испытаний по Бринеллю, оптическая металлография, рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (рентгеновский источник – трубка БХ-10, при U=45кВ, I=200мкА), рентгеноструктурный анализ, электронная дифракция и электронная микроскопия, магнитные измерения.

Оптический микроскоп ММР-4, просвечивающий электронный микроскоп ПРЭМ-200, растровые электронные микроскопы РЭММА-202, JSM-6390LV, электромеханический гидравлический пресс.

В главе 3 приведены экспериментальные результаты по выявлению особенностей атомной структуры неравновесных фаз, возникающих в процессе твердофазного синтеза в сплавах системы Ni-Ti.

3.1 Твердофазный синтез в системе никелид титана с нержавеющей сталью.

На поверхность нержавеющей стали помещали небольшие пластинки никелида титана и никеля. Эти кусочки вдавливали в электромеханическом гидравлическом прессе в нержавеющую сталь со скоростью 170 тонн/мин. В результате реакции кусочек никелида титана прочно связывался с пластинкой нержавеющей стали (рис. 3.3.1). Кусочек никеля не связывался с нержавеющей сталью.

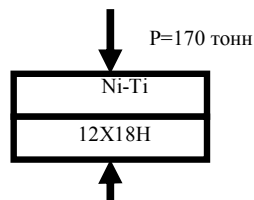


Рис. 3.3.1 Схема эксперимента твердофазной реакции

После проведения эксперимента образец никелида титана отделяли от нержавеющей стали. Для исследования продуктов реакции, возникающих в результате механохимической реакции, в образцах никелида титана при его совместной деформации с нержавеющей сталью проводились исследования химического состава поверхности образцов.

Исследования микроструктуры и микросостава контактных поверхностей проводили на растровых электронных микроскопах РЭММА-202 и JSM-6390LV.

На рисунке (3.3.2 а) приведено изображение поверхности нержавеющей стали при небольшом увеличении после отделения от нее образца никелида титана, связанного механохимической реакцией. Видна поверхность с развитым рельефом. До помещения образца под пресс пластинка никелида титана была гладко отполирована и не имела шероховатостей.

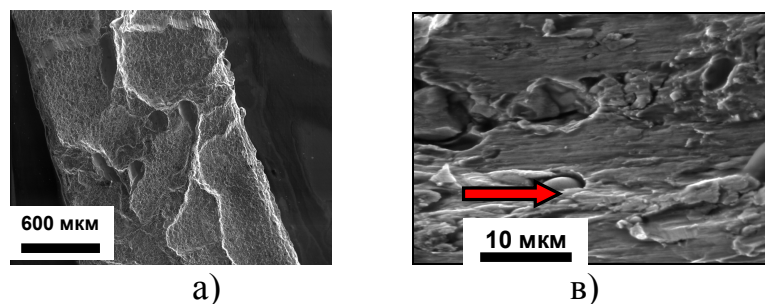
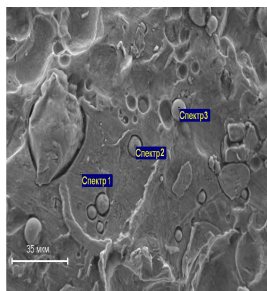


Рис. 3.3.2 а) Изображение поверхности разрыва между соединенными механохимической реакцией сплавами никелида титана и нержавеющей

сталью; в) Изображение поверхности никелида титана после прохождения механохимической реакции между никелидом титана и нержавеющей сталью

При исследовании поверхности разрыва на больших увеличениях в электронном микроскопе были обнаружены закристаллизовавшиеся капли металла (рис.3.3.2 в). Это свидетельствует о том, что в зоне реакции за счет локального контактного разогрева формировались капли жидкой фазы.



Элемент, К-серия	Атомный % (от спектра 1)		Атомный % (от спектра 2)		Атомный % (от спектра 3)
Ti	1,30		4,44		6,75
Cr	17,56		11,07		1,92
Fe	68,99		43,06		54,21
Ni	12,15		49,43		37,12
Итоги	100		100		100

а)

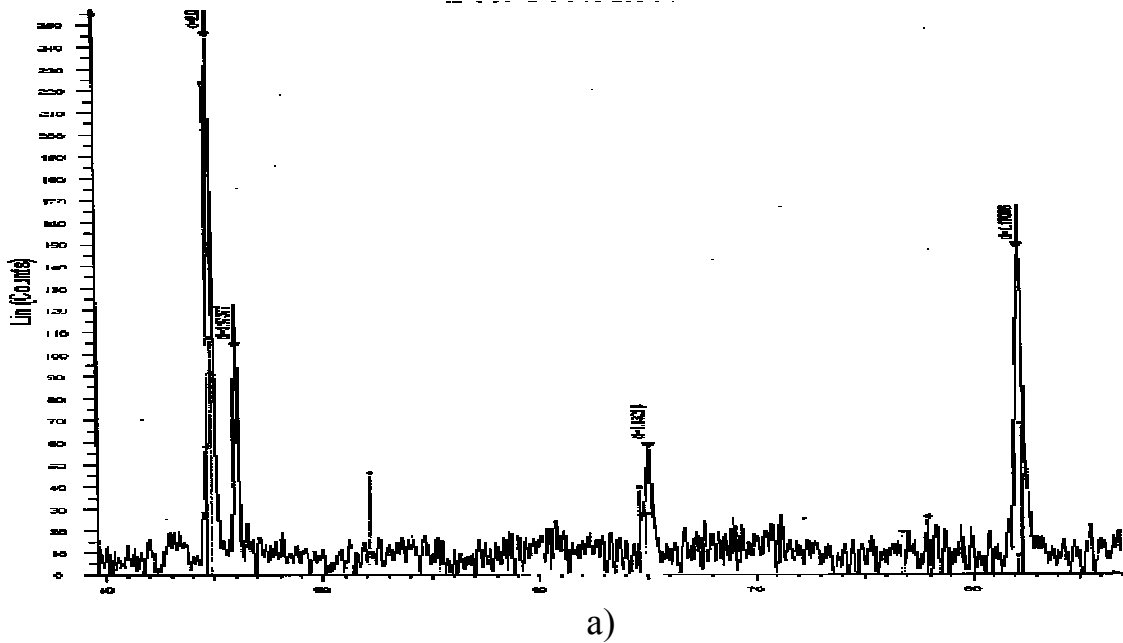
в)

Рис. 3.3.3 а) электронно-микроскопическое изображение поверхности нержавеющей стали JSM-6390LV; в) расшифровка спектров 1, 2, 3 показанных на рисунке 3.3.3 а

На рисунке (3.3.3 в) приведены расшифровки спектров энергодисперсионного анализа различных участков поверхности разрыва образца нержавеющей стали после прохождения механохимической реакции. Спектр 1 получен от участка нержавеющей стали, в котором относительно ровная поверхность. Спектры 2 и 3 получены от металлических капель. Видно, что плоский участок (спектр 1) содержит меньше титана, чем капли (спектры 2 и 3).

На рисунке 3.3.4 представлена картина дифракции рентгеновских лучей, полученная от поверхности разрыва между соединенными механохимической реакцией сплавами никелида титана и нержавеющей сталью.

В таблице (рисунок 3.3.4 в) приведены результаты расшифровки. Видно, что кроме компонентов, входящих в нержавеющую сталь (Fe, Cr, Ti, Ni) присутствуют фазы, которые образовались в ходе реакции: NiCr, NiTi, Ni₂Ti, Ti₂Ni, Fe₂Ti, Ni₃Ti.



d_{hkl}	NiCr			NiTi			Ni ₂ Ti			Ti ₂ Ni			Fe ₂ Ti			Ni ₃ Ti		
	d_{hkl}	hkl	I	d_{hkl}	hkl	I	d_{hkl}	hkl	I	d_{hkl}	hkl	I	d_{hkl}	hkl	I	d_{hkl}	hkl	I
2.0	2.01 0	202	ср				2.00 7	114	O.C.				2.00	201	1.00	2.07 72	004	O.C.
1.9737 7	1.953	212	C				1.970	202	C	1.98	440	0.60				1.9500	202	C
1.4321 4				1.492	200	оч.сл.												

в)

Рис. 3.3.4 а) Картина дифракции рентгеновских лучей, полученная от поверхности разрыва между соединенными механохимической реакцией сплавами никелида титана и нержавеющей сталью
в) результаты расшифровки дифракционной картины (рисунок 3.3.4 а)

Возникновение жидкоподобного состояния при деформации давлением известно достаточно давно и широко описано в литературе (например, сжижение металла при действии кумулятивных снарядов) [15]. Из переохлажденной жидкости согласно уравнениям Лангера возникают денриты, как результат взрывной кристаллизации. Движущей силой процесса взрывной кристаллизации из расплава является: градиент температуры, градиент концентрации и градиент давления (см. уравнения 3.1-3.3) [16].

$$D_T \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$D_C \nabla^2 \bar{\mu} = \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$R_{\pm} = R_0 \sqrt{T} e^{\frac{\pm \alpha \sigma}{P}} \quad (3.3)$$

где α - коэффициент трения, σ - сдвиговое напряжение, P – давление.

Последнее уравнение описывает процесс супер-Аррениусовской релаксации, проходящей при низких температурах и большой скорости изменения напряжений, приводящей к переключению химической связи и сдвигу в системе атомов в твердом теле. Скорости таких процессов могут составлять до нескольких километров в минуту.

На рисунке 3.3.5 а) для иллюстрации приведены примеры взрывной кристаллизации из жидкой капли, возникшей при обработке поверхности твердого сплава стальными шариками [17]. Другой пример - кусочек стекла, выбитого дробью выстрелом из ружья. Здесь стекло ведет себя как вязкое вещество благодаря большому градиенту давления [18]. То есть процесс сводится к локальному выдавливанию кусочка стекла, остальная часть стекла не испытывает нагрузки.

Пробивается локальный участок стекла, оставляя неповрежденной всю остальную его часть (см. рис. 3.3.5 в). Фрактальность распространения трещин, как и фрактальность взрывных кристаллитов, свидетельствуют о нелинейности процессов. В обоих случаях требовалась большая энергия активации для реализации структур с фрактальной морфологией. В первом случае энергия активации обеспечивалась в жидкоподобном состоянии капли, во втором – большой скоростью изменения давления от летящей дроби. Оба процесса идут с максимумом производства энтропии [19].

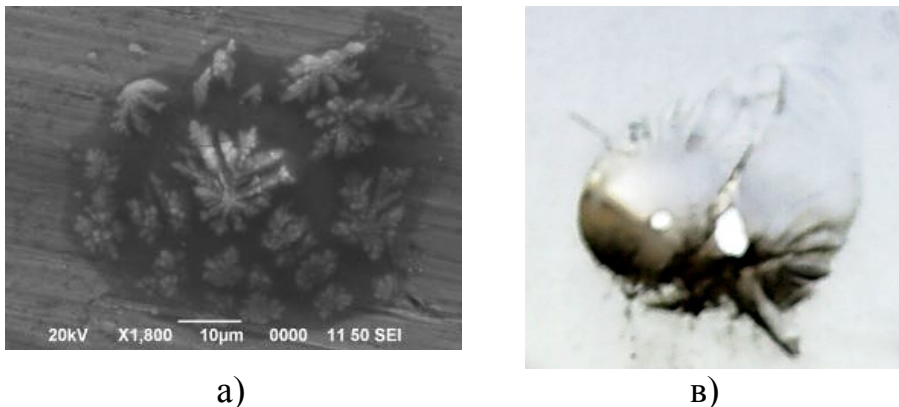


Рис. 3.3.5 Результаты быстрых процессов, протекающих при больших градиентах давления: а) взрывная кристаллизация из жидкой капли, возникшей при обработке поверхности твердого сплава CoW стальными шариками [17]; в) отверстия в стекле, выбитые дробью выстрелом из ружья.

Как известно, дендритный рост осуществляется в области градиента температур в жидкой фазе. Последняя может образоваться в точках контакта шарика с поверхностью обрабатываемого сплава за счет локального давления, достигающего десятков ГПа. За счет плохого отвода тепла из капли в металлический образец возникает градиент температуры, достаточный для

роста дендрита. Жидкая фаза может значительно облегчить движение по схеме «сдвиг-поворот», наблюдаемый в работах В.Е. Панина [20].

В дополнение к модели, предложенной В.Е.Паниным о движении элементов субструктуры по схеме «сдвиг-поворот» в процессе пластической деформации, можно предположить формирование жидкоподобной фазы в областях локализации давления. С этих же позиций возможно объяснение появления тетраэдрически плотноупакованных фаз со структурами Франка-Каспера в межзеренных межграницных прослойках.

Основные результаты работы.

В результате проведенной работы проведен анализ экспериментальных исследований ряда аспектов проблемы твердофазных реакций в сплавах на основе Ni-Ti, востребованных современной практикой. Основные научные результаты, представленные в диссертации, сводятся к следующему:

1. В результате совместного динамического нагружения образцов никелида титана и нержавеющей стали в зоне контакта происходят перераспределение компонентов сплавов и твердофазные реакции, продукты которых связывают образцы. Аналогичного связывания не происходит в образцах никеля в зоне контакта с нержавеющей сталью.
2. Установлена исключительная роль сдвиговых деформаций в инициировании твердофазных реакций на границе раздела реагентов, испытывающих мартенситные переходы.
3. Установлена связь между структурой и магнитными свойствами образцов никелида титана, подвергнутых циклическому мартенситному превращению.

1. X.J. Yran Impulse pressing diffusion bonding of Ti alloy to stainless steel. Materials character. Article in PREss.
2. Maloney C., Lemaitre A., Universal Breakdown of Elasticity at the onset of Material Failure // Phys/ Rev. Lett. 2004, V. 93, № 19, P. 195501(1-4).
3. Lemaitre A., Origin of a Repose Angle: Kinetics of Rearrangement for Granular Materials // Phys. Rev. Lett. 2002, V. 89, № 6, P. 064303(1-4).
4. Берналл Дж.Д., Карлайл С.Х.. Кристаллография 1968, 13, 927 (Sov. Phys.-Crystallogr.,1968, 13.(Engl. Transl).
5. Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Москва, (2005). Изд. 4-е.
6. Сандитов Д.С., Бартенев Г.М., Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982., С. 259.
7. Липатов Ю.С., Состояние изо-свободного объема и стеклование свободных полимеров // Успехи химии, 1978, Т. 47, № 2, С. 332-356.
8. Носкова Н.И., Физика деформации нанокристаллических металлов и сплавов // IX Международный семинар Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов Екатеринбург, Россия, 2002, С. 91-92.
9. Иванов К.В., Колобов Ю.Р., Гирсова Н.В. Эволюция структуры и особенности ползучести наноструктурного никеля, полученного воздействием

интенсивной пластической деформации// 1X Международный семинар Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов Екатеринбург,Россия, 2002, С. 123-124.

10. Кобеко П.П., Аморфные вещества. М.-Л.: Изд.АН СССР, 1952. С. 432.

11. Волькенштейн М.В., Птицын О.Б., Релаксационная теория стеклования. 1 – решение основного уравнения и его исследование. // Журн. техн. Физики, 1956, Т. 26. № 10, С. 2204-2222.

12. Langer J.S., Lemaitre A., Dynamic Model of Super-Arrhenius Relaxation in Glassy Materials // 2004, arXiv:cond-mat/0411038v1.

13. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пешли Д., Уэлен М., Электронная микроскопия тонких кристаллов. // Пер. с англ. – М.: Мир, 1968, 562 с.

14. V.N. Rozhanskii, G.V. Berezhkova // Phys. Stat. Sol., V.6, P.185 (1964).

15. Лаврентьев М. А., Кумулятивный заряд и принципы его работы, «Успехи математических наук», 1957, т. 12, в. 4.

16. Langer J.S., Lemaitre A., Dinamic Model of Super-Arrhenius Relaxation in Glassy Materials // 2004, arXiv:cond-mat/0411038v1.

17. Д.В.Алонцева, Л.И.Квеглис, Г.Ю.Зубрилов, Н.В.Прохоренкова, А.Б.Садибеков, Р.Б.Абылкалыкова. Эволюция структуры поверхности сплава при механической обработке стальными шариками. Фундаментальные проблемы современного материаловедения

18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория упругости // М.: «Наука», 1965, 202 с.

19. Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д., Кузнецова И.Е., Применение принципа максимальности производства энтропии анализу морфологической неустойчивости растущего кристалла // ЖЭТФ 2000, Т.118., № 1(7), С. 149-162.

20. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоёв твёрдых тел //Физическая мезомеханика.-1999(2), № 6, 5-23.

21. Утевский Л.М., Дифракционная электронная микроскопия металловедении, М.: "Металлургия", (1973), 471 с.

22. Jonn J.Gilman Mechanochemistry/Science, v.274,1996,p.65.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Тажибаева Г.Б., Абылкалыкова Р.Б., Насохова Ш.Б., Квеглис Л.И., Сейлханов Е.М., Мусихин В.А. Механохимические реакции в массивных и пленочных образцах системы Ni-Ti. Фундаментальные проблемы современного материаловедения, изд. Алтайский государственный технический университет, 2007, №4. С. 31

2. Тажибаева Г.Б., Сейлханов Е.М., Квеглис Л.И., Носков Ф.М. Механохимические эффекты в двухслойных образцах никелид титана - нержавеющей сталь. Low Dimensional Sistems г. Сочи 5-9 сент. 2008г. с.135.

3. Тажибаева Г.Б., Сейлханов Е.М., Квеглис Л.И., Веригин А.А., Паничкин Ю.В. Механические эффекты в двухслойных образцах никелид титана- нержавеющей сталь. «Роль университетов в создании инновационной экономики». Материалы Международной научно-практической конференции 25-26 сентября 2008г. Том 2 Стр. 254-256.