

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ДОНЕЦКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ТОКИЙ
Валентин Владимирович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ
ПРИ ВЫСOKИХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

01.04.07 - физика твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ДОНЕЦК - 1982

Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте АН УССР

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор

ОВАНДЕР Л.Н.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

АЛЬШИД В.И.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

НАУК. В.Д.

Ведущая организация Институт физики высоких давлений
АН СССР

Зашита состоится " " 1982 года
на заседании специализированного совета Д ОИ6.32.01 при
Донецком физико-техническом институте АН УССР, 340114,
г.Донецк - 114, ул.Р.Люксембург, 72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого физико-технического института АН УССР.

Автореферат разослан " " 1982 г.

Ученый секретарь
специализированного совета *Абасов* ДАННИН Н.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время физика высоких давлений привлекает к себе все больший интерес, так как современно очевидно, что высокое давление является мощным инструментом, при помощи которого можно воздействовать на вещество для исследования его физических свойств в конденсированном состоянии, т.е. в состоянии высокой плотности. Как отмечал Л.Ф. Верещагин уже первые исследования в этой области П.Бриджмена оказались весьма плодотворными, а многие из результатов настолько неожиданны (например резкое возрастание пластичности при высоком давлении), что для полного их объяснения потребуется глубокое теоретическое исследование. С другой стороны, современный научно-технический прогресс предъявляет все более увеличивающиеся требования к служебным характеристикам материалов, делающие применение к ним традиционных методов обработки либо невыгодными экономически, либо невозможными вообще. В связи с этим исследователями, работающими в области металлообработки, материаловедения и т.п., возникает необходимость в создании новых методов. В последние годы разрабатываются и широко внедряются методы пластической обработки материалов, основанные на использовании высоких гидростатических давлений. Самый первый из которых — гидроэкструзия впервые в мире была экспериментально осуществлена в СССР. Эти методы имеют ряд преимуществ перед традиционными видами обработки. Главные из них — возможность обрабатывать хрупкие труднодеформируемые в нормальных условиях материалы (такие как металлы с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК)), а также обрабатывать материалы с максимальным приближением формы заготовки к форме готового изделия, что позволяет резко сократить применение металлоконструкций обработки и приводит к значительной экономии металла. Кроме того, в процессах, основанных на использовании высоких гидростатических давлений

лений, улучшаются физико-механические свойства материалов.

Создание теоретических основ пластической деформации в условиях высоких гидростатических давлений неразрывно связано с исследованием внутренней структуры кристаллов под давлением представляет не только теоретический, но и большой практический интерес.

В соответствии с современными представлениями неупругие свойства материалов определяются плотностью и характером имеющихся в теле дислокаций. В связи с успешными экспериментальными исследованиями различных явлений воздействия высокого давления (уже в диапазоне порядка нескольких килобар) на дислокационную структуру, таких как "барополигонизация", подвижность дислокаций и их ансамблей, размножение дислокаций, а также тесно связанных с дислокационной структурой - деформационного упрочнения внутреннего трения становится актуальным развитие адекватной количественной теории. К тому же, как отмечал Л.Ф.Веренагин, становится очевидной возможность освоения в ближайшее время для научных исследований давлений до нескольких миллионов бар. Следовательно, особую актуальность приобретают теоретические исследования, позволяющие оценить изменения всех основных характеристик дислокаций, которые нас ожидает в новом диапазоне давлений.

Цель диссертации состоит прежде всего в последовательном, подробном и строгом анализе воздействия гидростатической компоненты упругих напряжений на основные параметры дислокаций в кристаллах. Результаты такого анализа позволяют описать изменение упругих свойств дислокаций, найти параметры дислокационного ядра в различных гидростатически скатых кристаллах и определить термоактивационные параметры процессов превращения дислокаций и их ядер, размножение, зарождения, подвижности дислокаций и их ансамблей, а также влияние высокого гидростатического давления на эти процессы. Конкретизация этой цели привела к следующим основным задачам, поставленным в работе:

1. Дать описание упругих характеристик дислокаций в гидростатически скатом кристалле.
2. Исследовать параметры, характеризующие ядро дислокации, в зависимости от давления и структуры кристаллической решетки, и на этой основе описать изменение устойчивости дислокационных ядер в гидростатически скатом кристалле и, в частности, выявить особенности влияния давления на сидячие стопорные с одной стороны и подвижные (скользящие) дислокации с другой.
3. Определить термоактивационные параметры превращения дислокаций и их ядер, по перечного и повторного по перечного скольжения, распада дислокационных барьера в условиях высокого давления, и, как следствие, описать изменение подвижности скользящих дислокаций при изменении гидростатической компоненты напряжений.
4. Построить количественную теорию размножения дислокаций по механизму двойного перечного скольжения, учитывающую термодинамические условия (давление и температуру) при размножении, и на этой основе описать изменение плотности дислокаций при деформации в различных термодинамических условиях.
5. Используя результаты предыдущего описания и на основе результатов по влиянию давления на устойчивость стопорных трещинообразующих дислокационных барьеров, определить изменение качественного состава дислокационной структуры в зависимости от степени деформации и величины гидростатического давления.
6. Определить влияние гидростатической компоненты на неконсервативное движение дислокаций и их ансамблей.
7. Исследовать особенности зарождения дислокаций на упругих неоднородностях при равномерном всестороннем скатии материала.

Новизна работы состоит в том, что впервые:

- I. Сформулировано и развито новое научное направление в физике твердого тела - континуальная теория дислокаций в кристаллах при

высоких гидростатических давлениях.

2. Дано полное последовательное теоретическое описание упругих свойств дислокаций в гидростатически скатом теле.

3. Предсказано изменение с давлением параметров ядер дислокаций в простых и переходных ГЦК и гексагональных металлах, в переходных ОЦК металлах и в ионных кристаллах со структурой каменной соли, предложена оценка влияния давления на энергию дефекта упаковки в этих кристаллах.

4. Проведены расчеты термоактивационных параметров (энергии активации объема) процессов рекомбинации дислокаций, превращения сидячих ядер в скользящие, поперечного и повторного поперечного скольжения, распада стопорных трещинообразующих дислокаций в условиях высокого гидростатического давления.

5. Рассмотрен ряд особенностей неконсервативного движения дислокаций в гидростатически скатых кристаллах.

6. Предложена количественная теория размножения дислокаций по механизму двойного поперечного скольжения при различных термодинамических условиях (давлении и температуре).

7. Дано теоретическое описание изменения качественного состава дислокаций при деформации в условиях всестороннего скатия, позволяющее предсказать изменение доли стопорных трещинообразующих дислокаций в общей плотности дислокаций с величиной деформации и давления.

8. Проведены теоретические исследования по динамическому зарождению дислокаций.

Практическое значение и достоверность результатов. Достоверность результатов, полученных в диссертации, достигнута за счет использования современных методов физической теории. Для нахождения упругих полей дислокаций исходными являлись основные положения и уравнения нелинейной теории упругости. Для нахождения параметров дислокационного ядра использовались известные модели кон-

тинуальной теории дислокаций, учитывающие дискретность кристаллической решетки, в приближении "замороженных" ядер Инденбома и Блехермана. Расчеты термоактивационных параметров проводились на основе методики Стро в приближении линейного напряжения. Для нахождения упругих полей дислокаций при зарождении исходной являлась система кинематических уравнений динамической теории дислокаций, разработанной Косевичем. Достоверность результатов определяется также экспериментальным подтверждением ряда предсказанных в диссертации эффектов таких как:

изменение с давлением упругих свойств дислокаций в гидростатически скатых кристаллах;

зависимость сдвиговых напряжений от угла разориентации и степени анизотропии всесторонне скатых поликристаллов;

существование критического давления, при котором происходит качественное изменение дислокационного ядра;

увеличение с ростом давления отношения скорости краевой компоненты дислокаций к скорости винтовой в ОЦК металлах;

снижение с ростом давления устойчивости, а, следовательно, и доли стопорных трещинообразующих дислокаций в общей плотности.

Вошедшие в диссертацию теоретические разработки проводились в тесном контакте с экспериментальными исследованиями, выполнявшимися в ДонЭТИ АН УССР. Теоретические выводы использовались при обработке экспериментальных данных и проверялись в работах, которые обобщены в докторских и кандидатских диссертациях, выполненных сотрудниками института по проблеме влияния высоких гидростатических давлений на дефектную структуру материалов. Наиболее важные результаты диссертации нашли отражение в монографиях Косевича и Зайцева и могут быть использованы в спекциях по физике высоких давлений, физике пластичности и смежных с ними областях физики твердого тела.

Изложенное в работе теоретические исследования являются необходимым этапом в создании физических основ технологических процес-

сов, основанных на использовании высоких гидростатических давлений. Они открывают пути управления количественным и качественным составом дефектов при деформировании и термообработке в условиях высокого давления, а, следовательно, управления физическими свойствами материалов, а также могут использоваться в разработке актуальных проблем сверхпластичности, спекания, заливания радиационных дефектов, методов неразрушающих испытаний, использующих явление акустической эмиссии.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и совещаниях: I Всесоюзном совещании по физике и технике высоких давлений (Донецк, 1973), 7, 8 и 9 Всесоюзных конференциях по физике прочности и пластичности (Куйбышев, 1973, 1976, 1979), 4 Всесоюзном совещании по динамике дислокаций (Харьков, 1973), Республиканской конференции по физике заливания макро- и микродефектов в металлах (Киев, 1974), 5 Международной конференции по физике и технике высоких давлений (Москва, 1975), 6 Всесоюзном совещании по физическим методам получения чистых металлов и исследованию их свойств (Харьков, 1975), Всесоюзной конференции по кристаллографии, минералографии и петрографии (Ленинград, 1975), 5 Всесоюзной конференции по физике пластичности кристаллов (Харьков, 1976), 3 Всесоюзном совещании по взаимодействию между дислокациями и атомами примесей и свойствами сплавов (Тула, 1976), 10 Всесоюзной конференции по электронной микроскопии (Ташкент, 1976), 3 и 4 Всесоюзных конференциях "Физика разрушения" (Киев, 1976, 1980), I и 2 Всесоюзных конференциях "Гидростатическая обработка материалов" (Донецк, 1979, 1981).

Кроме того, материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на Республиканских семинарах "Влияние высокого давления на вещества", а также на семинарах в ФТИ АН СССР им. А.Ф.Каффе, ИК АН СССР им. А.В.Шубникова, ИФИД АН СССР, ИФМ АН СССР, ИПМ АН УССР, ИМФ АН УССР, ФТИИМТ АН УССР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав (пестнадцати параграфов), выводов и заключительных замечаний. Общий объем 299 страниц, количество рисунков - 18, таблиц - 31, список литературы состоит из 182 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность и практическая важность проблемы, сформулированы цели работы и дана краткая аннотация новых результатов, полученных в диссертации, перечисляются положения, выносимые на защиту, раскрывается структура диссертации.

В первой главе "Упругие поля всесторонне сжатого кристалла" проведен анализ упругих полей вокруг дефектов в кристалле, подвергнутом внешнему равномерному всестороннему сжатию. В рамках нелинейной теории упругости рассмотрены два вида приближенных решений, возникающих при произвольно больших величинах внешнего давления и считавшихся малыми деформациями, выбранных заданным положением дефектов.

Кристалл, подвергнутый высокому гидростатическому сжатию, проявляет нелинейные упругие свойства, что находит свое отражение в записи уравнений состояния, заменяющих закон Гука, и в записи условий равновесия. Однако при рассмотрении малых деформаций, вызванных дефектами кристаллической решетки в ГСК, обычно можно ограничиться линейным приближением. Это подразумевает линеаризацию уравнений равновесия по упругим листорессам, порожденным дефектами. Показано, что в таком приближении учет высокого и сверхвысокого давления сводится к перенормировке модулей упругости и замене геометрических параметров в дефектах (вектор Баргерса, объем вакансии и т.п.) их значениями в ГСК. Этот вывод позволяет в полной мере использовать результаты линейной теории упругости с дефектами, заменяя в соответствующих формулах модули упругости кри-

стали их новыми значениями. Зависимость упругих модулей ГСК от величины давления вносит нелинейный характер. При изучении так называемых эффектов второго порядка в ГСК, когда учитываются отклонения от линейности по упругим дисторсиям, созданным дефектами, показано, что и в этом приближении учет высокого и сверхвысокого давления сводится к перенормировке модулей не только второго порядка (рассмотренной в линейном приближении), но и к перенормировке модулей упругости третьего порядка. Этот вывод позволяет использовать в континуальной теории дислокаций в ГСК и решения нелинейных задач континуальной теории дислокаций, таких как, например, задача об объемных изменениях, вносящих дислокациями в кристалл, замены в соответствующих формулах модули упругости кристалла их новыми значениями, отметим, что, хотя описание дислокаций в ГСК не отличается от стандартного, следует помнить, что кристалл, подвергнутый высокому гидростатическому сжатию, безусловно проявляет нелинейные упругие свойства, приводящие к изменениям взаимодействия между дефектами, барьера Пайерлса и т. п., которые, как показывают оценки, приведенные в таблице I, могут быть экспериментально обнаружены уже при давлениях в несколько кбар.

В рамках плоской модели анизотропной теории упругости методами комплексных потенциалов Лехницкого, проведено исследование характера поля напряжений при внешнем равномерном всестороннем сжатии кристаллов, содержащих упругие неоднородности. Обнаружено возникновение сдвиговых напряжений при обратии анизотропных кристаллов симметрии ниже кубической, содержащих разориентированные области. Теоретически предсказана зависимость величины этих напряжений от величины внешнего давления и угла разориентации, которая впоследствии была экспериментально подтверждена на бикристаллах цинка. Поскольку порядок величины, возникающих сдвиговых напряжений такой же, что и у гидростатической компоненты, это обстоятельство должно учитываться при обсуждении свойств, связанных с дислокациями в ГСК

ТАБЛИЦА I. Влияние гидростатического давления на перенормированный модуль сдвига, собственную энергию и энергию взаимодействия винтовых дислокаций.

Элемент	Структура	$\frac{\partial \ln \bar{E}}{\partial P} [M^5]$			$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial P} [M^5]$	$\frac{\partial \ln W}{\partial P}$
		1	2	3		
Ag	ГЦК	4,70	4,05		Gd	ГЦУ
Al	ГЦК	6,90	6,02		Ge	АЛМАЗ
As	ТРИГ	0,51	-0,55		Hf	ГЦУ
Au	ГЦК	3,75	3,36		Ho	ГЦУ
Ba	ОЦК	23,6	16,7		Jn	ТЕТР
Be	ГЦУ	1,52	0,92		Jz	ГЦК
Bi	ТРИГ	15,8	13,9		K	ОЦК
Ca	ГЦК	16,2	12,2		La	ГЕКС
Cd	ГЦУ	8,75	7,49		Li	ОЦК
Ce	ГЦК	8,33	5,14		Lu	ГЦУ
Co	ГЦУ	2,19	1,84		Mg	ГЦУ
Cs	ОЦК	184	151		Mn	СЛЮВ
Cu	ГЦК	3,02	2,53		Mo	ОЦК
					Na	ОЦК

	I	2	3	4
N ^b	OЦК	1,41	1,02	
Nd	Гекс	1,03	-0,99	
Nt	ГЦК	1,63	1,27	
Os	ГПУ	0,95	0,79	
Pb	ГЦК	II,6	IO,I	
Pd	ГЦК	I,12	0,78	
P ₂	Гекс	0,07	-2,32	
Pt	ГЦК	2,51	2,28	
P ₆	OЦК	III,4	85	
Re	ГПУ	I,01	0,82	
Rh	ГЦК	93,6	64,6	
Ru	ГПУ	I,10	0,88	
Sb	ТРИГ	4,21	2,60	
Se	ГПУ	0,68	-0,005	
Si	АЛМАЗ	0,60	-0,08	
Sm	ТРИГ	5,50	3,66	
			5n	ТТТ
			S ₂	ГЦК
			T _a	ОЦК
			T _b	ГПУ
			T _e	A
			T _h	ГЦК
			T _i	ГПУ
			T _c	ГПУ
			T _m	ГПУ
			U	ОРТ
			V	ОЦК
			W	ОЦК
			Y	ГПУ
			Y _b	ГЦК
			Z ₁	ГПУ
			Z ₂	ГПУ

симметрии выше кубической.

Во второй главе "Ядра дислокаций в гидростатически сжатых кристаллах" с помощью методов континуальной теории дислокаций, учитывавших дискретность кристаллической решетки, проведен расчет параметров ядер подвижных и стопорных дислокаций, а также их изменений с давлением. Была выбрана модель расщепленной дислокации, в которой основным элементом структуры дислокационного ядра является дефект упаковки, определяющий анизотропию диссоциации. Дефект упаковки ограничен частичными дислокациями, упругие поля которых при этом рассматривается в рамках моделей, позволяющих снять расходимости полей на приложении, присущие классической континуальной теории дислокаций Вольтерра. Считаем, что собственные упругие поля частичных дислокаций не зависят от их взаимного расположения, а энергия дефекта упаковки, заключенного между ними, не зависит от дополнительных смещений в области дефекта. Такое приближение по аналогии с Бехерманом и Инденбомом, рассматривавших зарождение трещин, называем приближением "замороженных" ядер. Учет дискретности структуры кристалла приводит к ряду особенностей во взаимодействии дислокаций на близких расстояниях, по сравнению с классическим взаимодействием сингулярных дислокаций Вольтерра. Нами использовались: модифицированная модель Пайерса - Набарро, модель лебаевского квазиконтинуума, модель Стро, модель "полого ядра". Наряду с некоторыми особенностями каждой модели, что обуславливает их выбор для каждого конкретного материала, всем им присущи общие черты, ярко иллюстрирующие влияние гидростатического давления на ядро дислокации, поэтому в дальнейшем мы ограничимся приведением выражений и оценок, получаемых в рамках модели Пайерса - Набарро.

Важной характеристикой ядра дислокации является его равновесная ширина a , которая определяется из минимизации энталпии системы частичных дислокаций, связанных дефектом упаковки.

$$d = \frac{\Gamma_{kp}}{\Gamma} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{\Gamma^2}{\Gamma_{kp}^2}} \right] \theta(\Gamma_{kp} - \Gamma),$$

где: $\Gamma_{kp} = D/2\xi$; $D = \frac{M \bar{b}_1 \bar{b}_2}{2\pi K}$; $K=1$ для винтовой и i -й для краевой дислокации; M — переноумерованный модуль сдвига в ГСК (см. главу I) ξ — ширина частичных дислокаций, \bar{b}_i — вектор Боргера i -ой частичной дислокации; $\Gamma = f(P) + P \Delta V_{ay}$ — энталпия дефекта упаковки; $f(P)$ — энергия дефекта упаковки в ГСК, ΔV_{ay} — "погонные" на единицу площади дефекта, объемные изменения, вносимые в кристалл дефектом упаковки. Изменение с давлением равновесной ширины расщепления имеет вид

$$\frac{d \ln d / \xi}{dP} = \left(1 - \frac{\Gamma^2}{\Gamma_{kp}^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{d \ln \Gamma_{kp}}{dP} - \frac{d \ln \Gamma}{dP} \right] \theta(\Gamma_{kp} - \Gamma).$$

Важнейшим параметром ядра дислокации является его устойчивость, иными словами, высота энергетического барьера, разделяющего расщепленное состояние от нерасщепленного. Энергию, которую необходимо сообщить кристаллу для перевода единицы длины дислокации из расщепленного состояния в нерасщепленное, можно определить по формуле:

$$\Delta H_{py} = 2 \Gamma_{kp} \xi \left[\operatorname{arsh} \frac{\Gamma_{kp}}{\Gamma} - \sqrt{1 - \frac{\Gamma^2}{\Gamma_{kp}^2}} \right] \theta(\Gamma_{kp} - \Gamma)$$

Анализ выражений для равновесных параметров ядер показывает, что определяющим фактором является отношение энталпии дефекта упаковки к верхнему пределу сил упругого взаимодействия между дислокациями Γ / Γ_{kp} . В различных материалах это от-

ношение с ростом гидростатического давления изменяется, и можно ожидать существование давлений P_{kp} , при которых $\Gamma = \Gamma_{kp}$. Эти давления мы назовем критическими, поскольку при них происходит качественное изменение анизотропии ядра дислокации. Для нахождения изменений с давлением параметров ядер, используя принятую связь энергии дефекта упаковки с электронными свойствами кристалла, была предложена оценка изменения с величиной гидростатического давления $\Gamma(P)$ в ионных кристаллах, переходных и непереходных металлах по изменению с давлением параметров поверхности Ферми, а также по электронной теплоемкости, коэффициенту температурного расширения и склонности материала.

Оценки изменений с давлением энергии дефекта упаковки и основного параметра ΔH_{py} характеризующего устойчивость дислокационного ядра, а также величины критических давлений приведены в таблице 2. При оценках принималось $\xi = \sqrt{\bar{b}_1 \cdot \bar{b}_2}$. В таблице 2 приняты обозначения: ск. — скользящая, ст. — стоечная, к. — краевая, в. — винтовая. Цифры в колонке "тип дислокации" указывают направление вектора Боргера.

Предсказано изменение с давлением устойчивости расщепления дислокационного ядра данного типа, обусловленное изменением с давлением упругих свойств дислокаций, энергии дефекта упаковки, а также объемных изменений, вносимых дефектами в кристалл. Так в ионных кристаллах со структурой каменной соли, в ряде переходных неферромагнитных ГЦК и гексагональных, в переходных ОЦК металлах (с расщеплением в плоскостях {121} и {100}) устойчивость ядра уменьшается с ростом давления. А в простых и переходных ферромагнитных ГЦК и гексагональных в переходных ОЦК металлах (с расщеплением в плоскости {110}) устойчивость ядра повышается с увеличением давления, хотя ширина расщепления в некоторых металлах в последнем случае может уменьшаться. Наиболее сильно предсываемое явление изменения устойчивости расщепления ядра дислокации должно проявляться в ионных

ТАБЛИЦА 2

кислота	струка	типа	плос-		$\frac{\partial \ln \eta}{\partial p}$	ρ_{kp}	$\frac{\partial \ln \eta}{\partial p}$ [№5-1]	I	2	3	4	5	6	7
			окислока-	кость										
Ag	ГИК	СК.В. IIО	III	4,4	-0,229	4,04	Pd	СК.В. IIО	III	0,0	-0,059	23,8		
		СК.К. IIО			-0,229	4,04		СК.К. IIО			-0,070	19,5		
		СТ.К. IIО			-0,229	4,04		СТ.К. IIО			-0,065	21,3		
Al	СК. В. IIО		0,88	-0,074	18,9	Pt	СК.В. IIО		6,70	3,764	-3,14			
	СК.К. IIО			-0,103	13,2		СК.К. IIО			-5,158	-2,31			
	СК.К. IIО			-0,090	15,3		СТ.К. IIО			201,9	-2,68			
Au	СК. В. IIО		1,97	-0,260	4,36	Rh	СК.В. IIО		8,05	-0,951	-1,82			
	СК.К. IIО			-0,268	4,16		СК.К. IIО			-0,639	-0,92			
	СТ.К. IIО			-0,264	4,25		СТ.К. IIО			-0,744	-1,32			
Cu	СК. В. IIО		1,86	-0,371	2,75	Th	СК.В. IIО	I23	0,010	-196				
	СК.К. IIО			-0,377	2,68		СК.К. IIО			0,021	-120			
	СТ.К. IIО			-0,374	2,71		СТ.К. IIО			0,015	-150			
Ni	СК. В. IIО		1,19	-0,670	1,42	Yb	СК.В. IIО		20,7	-0,103	2,47			
	СК.К. IIО			-0,677	1,39		СК.К. IIО			-0,081	6,60			
	СТ.К. IIО			-0,674	1,41		СТ.К. IIО			-0,088	5,01			
						C ₂	ОИК	СК.К. III	I10	2,32	-0,645	2,15		

16

I	2	3	4	5	6	7	I	2	3	4	5	6	7		
							ОИК	СК.В. III	I21	2,32	0,819	-5,00	Nb	ОИК	
C ₂	СК.К. III			3,166	-3,50	Ta	СК.К. III		I10	4,47	20,434	4,07			
	СТ.К. IIО	I00		368	-12,7		СК.Б. III		I21		0,564	-9,49			
	СТ.В. III	II0		-0,495	2,88		СК.К. III			I,723	-7,31				
	СТ.В. III	I21		0,372	-7,31		СТ.К. IIО		I10		0,228	-26,9			
						V	СТ.В. III		I10		-0,345	5,06			
Fe	СК.К. III	I10	1,56	-0,288	6,04		СТ.В. III		I21		0,286	-12,4			
	СК.Б. III.	I21	5,320	4,79			СК.К. III		I10						
	СК.К. III.		-1,538	-3,32			СК.Б. III		I21						
	СТ.К. IIО	I00	0,371	-18,4			СК.К. III			I,942	-8,25				
	СТ.В. III	II0	-0,220	7,78			СТ.К. IIО		I00		0,164	-37,0			
	СТ.В. III	I21	0,694	-6,85			СТ.В. III		I21		-0,177	II,7			
Mn	СК.К. III	I10	5,50	-1,040	0,45		СК.К. III		I10		0,246	9,09			
	СК.Б. III.	I21	0,787	-6,65			СК.Б. III		I21		0,539	-10,7			
	СК.К. III.		2,835	-5,01			СК.К. III			I,942	-8,25				
	СТ.К. IIО	I00	0,418	-15,1			СТ.К. IIО		I00		0,164	-37,0			
	СТ.В. III	II0	-1,210	6,23			СТ.В. III		I21		0,265	-14,0			
	СТ.В. III	I21	0,382	-8,89			СК.К. III								
							СТ.Б. III		I21						
Nb	СК.К. III	I10	1,32	-0,243	8,63		СК.К. III		I10		0,01	-0,421	4,25		
	СК.Б. III	I21	0,237	-13,8			СК.Б. III		I21		-2,091	-I,36			
	СК.К. III		0,483	-10,2			СК.К. III			-I,243	-0,78				
	СТ.К. IIО	I00	0,106	-40,1			СТ.К. IIО		I00		1,066	-8,58			
	СТ.В. III	II0	-0,154	12,4			СТ.Б. III		I21		-0,318	5,49			

17

	I	II	III	IV	V	VI	VII	I	II	III	IV	V	VI	VII
Cd	ГЕМС	СК.В.I210	000II	2,04	-0,014	105		KBr	NaCl	CaK, K.II0	7,05	-0,001	HPC	
		СК.К.I210		-0,057	24,3					C.T.K.II0		-0,004	HPC	
Co	СК.В.I210	I,18	-0,428	2,65	KCl		СК.В.II0				5,75	-0,005	HPC	
	СК.К.I210		-0,453	2,43			СК.К.II0				0,001	-2780		
							СК.К.II0				-0,004	HPC		
La	СК.В.I210	16,5	0,040	-45,8		KJ		СК.В.II0			9,10	-0,004	HPC	
	СК.К.I210		0,082	-26,2			СК.К.II0				-0,000	HPC		
							СТ.К.II0				-0,003	HPC		
Mg	СК.В.I210	I,80	0,160	HPC			СК.В.II0							
	СК.К.I210		0,038	HPC			СК.К.II0							
							СТ.К.II0							
Re	СК.В.I210	II,3	0,632	-6,76			СК.В.II0							
	СК.К.I210		1,595	-5,08			СК.К.II0							
							СТ.К.II0							
Ti	СК.В.I210	4,65	0,189	-10,3			NaBr							
	СК.К.I210		0,537	-5,09			CaBr							
							CaCl							
Zn	СК.В.I210	I,36	0,009	HPC			CaK, K.II0							
	СК.К.I210		-0,068	20,5			CaK, K.II0							
							CaT.K.II0							
Zr	СК.В.I210	3,42	0,090	-18,6			NaF							
	СК.К.I210		0,257	-7,61				CaK, B.II0						
							CaK, K.II0							
KBr	NaCl	III	7,05	-0,005	HPC		CaT.K.II0							

криSTALLах, что обусловлено большими объемными изменениями, вносящими в эти кристаллы ядром дислокации. Предсказано обусловленное ограниченностью сверху силы упругого взаимодействия между дислокациями в кристалле, существование критического давления, при котором происходит качественное изменение дислокационного ядра.

Расщепленное в одной или нескольких плоскостях ядро при давлениях выше критического должно превратиться в нерасщепленное, или наоборот, нерасщепленное в натуральных условиях, ядро может перейти в расщепленное состояние (величина критического давления может лежать в области отрицательных давлений, т.е. в диапазоне всестороннего растяжения). Следствием предсказываемого явления может стать безактивационное превращение в условиях высокого всестороннего давления стопорных сидячих дислокаций в подвижные.

Предсказываемый в рамках континуальных моделей этот эффект нашел прямое подтверждение в более поздних машинных экспериментах Сельзнера и Гранзера основанных на расчетах атомной конфигурации диссоциации из краевой дислокации в NaCl при различных давлениях, методами ядерных потенциалов с помощью ЭВМ.

Косвенным подтверждением предсказываемых изменений с давлением ядер дислокаций могут служить эксперименты по подвижности дислокаций, изменению качественного состава дислокационной структуры при различных термодинамических условиях деформирования и других. Ряд затронутых процессов более подробно рассмотрен в следующих главах, в которых рассчитаны величины более доступные для измерения в экспериментах при высоких давлениях.

В третьей главе "Подвижность и превращения дислокаций и их ядер в гидростатически сжатых кристаллах" на основе методики, предложенной Стро в приближении линейного напряжения в рамках моделей континуальной теории дислокаций, учитывающих дискретную структуру кристалла, проведены расчеты термоактивационных параметров, а также рассмотрены особенности неконсервативного движения

дислокаций в условиях высокого давления, как обусловленные расщеплением дислокаций, так и некоторые другие, в частности, связанные с разысканием точечных дефектов при пластической деформации. Оценены изменения термодинамического потенциала (энталпии) кристалла при переходе дислокаций из сидячих стопорных состояний в подвижные (скользящие).

Рассчитана энталпия активации процесса рекомбинации частичных дислокаций + энталпия активации образования стяжки – важнейшей и неотъемлемой части процессов превращения дислокаций и их ядер, а также пересечения, поперечного скольжения и переползания расщепленных дислокаций.

Рассчитаны термоактивационные параметры (энергия активации и активацационный объем) процессов трансформации, ядра дислокаций из сидячих в скользящие конфигурации, поперечного и повторного поперечного скольжения, перемещения границ из расщепленных дислокаций, а также распада стопорных трещинообразующих дислокационных барьеров.

Предсказано, что в простых и переходных ферромагнитных ГЦК и гексагональных металлах, в переходных ОЦК металлах с расщеплением в плоскостях $\{110\}$ с ростом давления затрудняются процессы рекомбинации частичных дислокаций и, следовательно, процессы превращения сидячей конфигурации ядра типа "звезда" в скользящую, поперечного и повторного поперечного скольжения перемещения границ из расщепленных краевых дислокаций, распада барьеров Ломер-Коттрелла. Эти предсказания частично уже нашли подтверждение в экспериментах по исследованию дислокационной структуры монокристаллов молибдена проформированных при различных гидростатических давлениях, а также в экспериментах по ползучести и перемещению малоугловых границ в простых ГЦК металлах при высоком гидростатическом давлении.

В переходных неферромагнитных ГЦК и гексагональных металлах, в переходных ОЦК металлах с расщеплением в плоскостях $\{121\}$ и $\{100\}$, а также в ионных кристаллах со структурой каменной соли предсказано облегчение с ростом давления процессов рекомбинации частичных дислокаций и следовательно процессов превращения сидячей конфигурации ядра типа "крыша" в скользящую, поперечного и повторного поперечного скольжения, распада стопорных трещинообразующих дислокационных барьеров. Последний эффект был вскоре экспериментально обнаружен нами при исследовании дислокационной структуры монокристаллов молибдена, и более подробно рассмотрен в следующей главе. Некоторые предсказания подтверждаются более поздними исследованиями других авторов дефектной структуры щелочно-галоидных кристаллов, проформированных в условиях высокого давления. При давлениях, превышающих расчетанные критические в ОЦК металлах, должно произойти безактивационное превращение сидячего расщепления типа "крыша" в скользящее, а при достаточно высоких сдвиговых напряжениях и давлениях одновременно превышающих критические в ОЦК металлах, ионных кристаллах со структурой каменной соли, а также в ряде переходных ГЦК и гексагональных металлов предсказан безактивационный распад дислокационных барьеров – безактивационное превращение каждого стопорного барьера в пару скользящих дислокаций.

Исследованы некоторые особенности неконсервативного движения дислокаций – переползания в условиях отличной от нуля гидростатической компоненты напряжений, при учете уменьшения с ростом давления термодинамически равновесной концентрации точечных дефектов и их коэффициента диффузии. Предсказано изменение с давлением концентрации вакансий при деформировании кристалла так:

а) при деформировании гидростатически скатого тела сдвиговым напряжением, равным напряжению деформирования при атмосферном давлении, концентрация вакансий в кристалле должна уменьшаться с

ростом давления, при этом должна замедляться скорость неконсервативного движения дислокаций.

б) Деформация со скоростью, равной скорости деформирования при атмосферном давлении, должна приводить к увеличению с ростом давления пересыщения вакансий в кристалле, и как следствие, к возрастанию скорости неконсервативного движения дислокаций.

Теоретическое исследование ориентационной зависимости подвижности стеки из расщепленных дислокаций показало, что при движении дислокационных границ наряду с диффузионными процессами, ответственными за неконсервативное перемещение дислокаций, большое значение приобретают процессы, связанные с параметрами ядер дислокаций. Это позволило объяснить особенности деформирования и роста центров рекристаллизации в условиях гидростатического сжатия в меди и предсказать их в других металлах.

Здесь необходимо отметить, что большинство рассчитанных в данной главе термоактивационных параметров, прямым экспериментальными изменениями в условиях высокого давления в настоящее время определить пока очень трудно. Поэтому для экспериментального подтверждения, полученных в данной главе теоретических результатов, возрастают роль теорий следующего этапа - перехода от теоретического описания микропроцессов к теории макропроцессов, экспериментальные исследования которых сопряжены с меньшими трудностями. Однако в большинстве случаев создание адекватного реальности теоретического описания макропроцессов сталкивается с принципиальными трудностями, обусловленными слишком большим количеством переменных параметров. Такие вопросы как скорость деформационного упрочнения, напряжение течения, протяженность отдельных стадий пластической деформации, скорость ползучести и др. в условиях атмосферного давления к настоящему времени не имеют однозначного удовлетворительного теоретического описания. Механизмы, контролирующие эти процессы, не выяснены. И здесь свой вклад могут внести как оценки, проведенные

ные в данной главе, так и эксперименты по влиянию давления на эти макропроцессы. Попытки создания теорий некоторых таких макропроцессов, связанных с дислокациями в условиях высокого давления, предприняты в следующей главе.

В четвертой главе "Размножение дислокаций и изменение дислокационной структуры при деформации в условиях гидростатического давления" на основе результатов предыдущей главы предложены количественные теории изменения плотностей скользящих и стопорных дислокаций в зависимости от их начальных плотностей, времени, степени и скорости деформации, а также термодинамических условий (температуры и давления). В настоящей работе, также как и в работе Орлова, Перевезенцева и Смирнова, сделана попытка выразить скорость размножения дислокаций через вероятности атомных перестановок, однако в отличие от той работы, движение винтовой компоненты дислокаций в первичной плоскости скольжения не предполагается обязательным, а также скорость движения выброса в плоскости поперечного скольжения не предполагается бесконечной. Необходимо также наличие внешних по отношению к дислокациям препятствий в плоскости скольжения, поскольку уже сама тонкая структура дислокационного ядра винтовой дислокации, например, в ОЦК металлах делает эту дислокацию "сидячей". Следовательно, переход в "скользящую" конфигурацию требует взятия некоторого энергетического барьера. Иными словами, даже в высокочистых ОЦК металлах с очень малой плотностью дислокаций лежа, каждая винтовая дислокация имеет барьер при себе, из-за которого поперечное скольжение приобретает отличную от нуля вероятность. В ГЦК, ГПУ, ионных кристаллах при плоском расщеплении ядра винтовой дислокации, плоскость расщепления может не совпадать с плоскостью скольжения, что также приводит к отличной от нуля вероятности поперечного скольжения.

Получено интегро-дифференциальное уравнение, описывающее скорость изменения числа дислокационных петель со временем - основное

уравнение системы, описывающей размножение дислокаций по механизму двойного поперечного скольжения.

Получены точные решения системы в виде конечного ряда. В начальные моменты времени $t \leq \tau_0$ длина винтовой компоненты возрастает прямо пропорционально времени:

$$L_s(t) = L_0 + 4v_e N_0 t,$$

где: L_0 - начальная длина дислокационных линий, v_e - скорость краевой компоненты дислокации, τ_0 - минимальное время жизни выброса (в плоскости поперечного скольжения) способного превратиться в новую дислокационную петлю, а количество дислокационных петель N_0 сохраняется. Полученная зависимость позволяет предложить новую экспериментальную методику определения изменения скорости краевой компоненты дислокаций с давлением и температурой по изменениям в этих условиях скорости размножения винтовой компоненты дислокаций при $t \leq \tau_0$.

Указаны приближения, при которых интеграло-дифференциальное уравнение может быть заменено дифференциальным (приближение Видерзика). Решения приближенной системы по форме совпадают с известными решениями Видерзика, однако коэффициенты в уравнениях и решениях явно зависят от термодинамических условий при размножении дислокаций. Это позволило предсказать, что с ростом давления (понижением температуры) должна увеличиваться скорость размножения дислокаций в ОЦК металлах при деформировании с постоянной скоростью, что обусловлено увеличением с ростом давления (понижением температуры) в этих кристаллах отношения скоростей краевой и винтовой компонент дислокаций, вызванным различной анизотропией структур ядер этих дислокаций. Этот вывод подтверждается специально проведенными экспериментальными исследованиями по деформации монокристаллов молибдена при различном давлении и аналогичными исследованиями

Люфта с сотрудниками по деформации монокристаллов молибдена при различных температурах.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование зависимости плотности ступорных дислокаций и их доли в общей плотности от степени деформации и величины гидростатического давления, при учете исследованного выше размножения дислокаций, а также превращения дислокаций одного типа в другой, и влияния на эти процессы высокого давления.

Предсказано снижение с ростом давления (повышения температуры) доли ступорных, трещинообразующих дислокаций в общей плотности при деформации ОЦК и ионных (типа каменной соли) кристаллов. Разработан метод экспериментальной проверки полученной зависимости, позволяющий устранить влияние на точность электронномикроскопических исследований, таких важных факторов как форма, толщина фольги и неоднородность распределения дислокаций. Проведенная экспериментальная проверка полученного соотношения плотностей на монокристаллах молибдена проформированных при различных давлениях, обнаружила резкое уменьшение с ростом давления доли ступорных трещинообразующих дислокаций в общей плотности дислокаций.

Сравнивая влияние давления и температуры на качественный и количественный состав дислокационной структуры образующейся при деформации кристаллов сделан вывод, что высокое гидростатическое давление, изменяя скорость размножения, а также вероятности превращения дислокаций, является мощным самостоятельным (не эквивалентным какому либо изменению температуры) инструментом управления количественным и качественным составом структуры реального кристалла.

В пятой главе "Динамическое зарождение дислокаций" обобщая машинные расчеты Эшби и Джонсон по определению критерия зарождения дислокаций при распаде твердого раствора, проведены оценки

возможных критических давлений зарождения дислокаций на включениях (порах) при равномерном всестороннем сжатии материалов. При этом, подразумевается конечно, что размеры включения (поры) много меньше размеров тела. Зависимость критических давлений от размера поры и модуля сдвига материала представлена на рисунке. Следует отметить, что механизм преодоления дислокацией огромного энергетического барьера ($\sim 10^4 \text{ кДж}$), обусловленного дальнодействующим упругим взаимодействием дислокации с поверхностью — неясен.

Впервые проведенные теоретические исследования по динамическому зарождению дислокаций вошли в диссертацию. Другие работы посвященные теоретическому исследованию динамического зарождения дислокаций на поверхности нам неизвестны, хотя методически к ним близки, но не идентичны работы Напика с сотрудниками по анигилиации дислокаций. В рамках континуальной динамической теории дислокаций, разработанной Коссевичем, рассмотрено динамическое зарождение винтовой дислокации на поверхности. Получены точные аналитические выражения для полей смещений и их скоростей, а также полей напряжений, возникающих при зарождении и в дальнейшем движении с постоянной скоростью винтовой дислокации. Расчитано изменение полной упругой энергии кристалла при динамическом зарождении дислокаций. Получены аналитические выражения для силы упругого взаимодействия движущейся дислокации с поверхностью, а также тормозящей силы, обусловленной "чертковским" излучением, возникающим при движении винтовой дислокации со скоростью превышающей поперечную скорость звука. Следует отметить, что действие внешнего (по отношению к дислокации) поля напряжений не зависит от скорости движения дислокации.

Учет конечности ширины дислокации, а также дисперсии упругих свойств, снимает "релятивистскую" расходимость в силе, энергии взаимодействия, а также расходимость на фронтах распространения

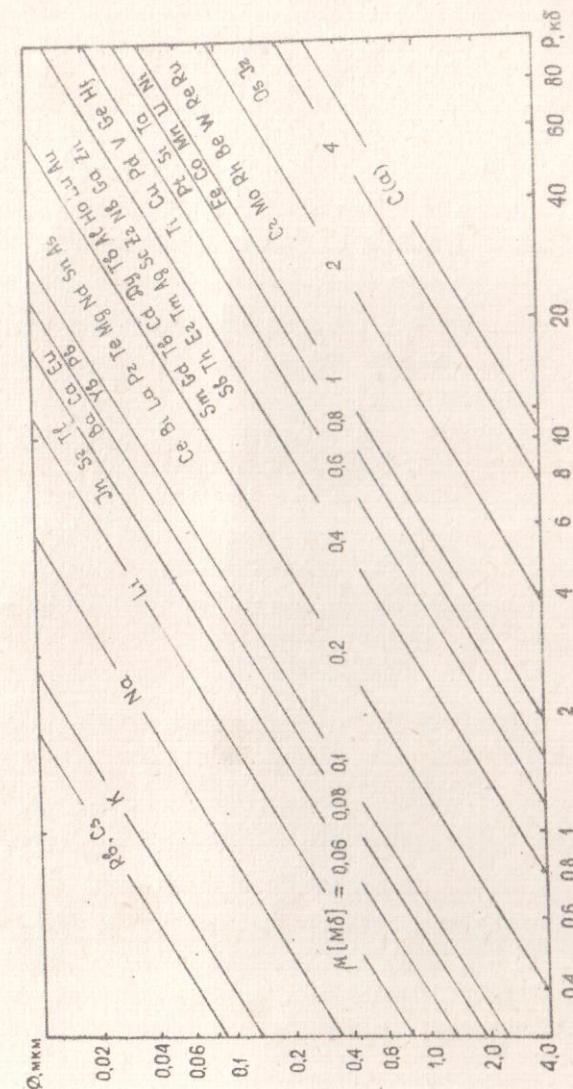


Рисунок. Зависимость критических давлений зарождения дислокаций от размера поры и модуля сдвига материала.

Полученные результаты представляют самостоятельный интерес, способствуя более глубокому акустическому анализу процессов пластической деформации интенсивно развивающейся в последнее время, не столько решая проблему зарождения дислокаций, сколько заостряют вопрос о необходимости дальнейших исследований в этой области.

В рамках континуальной динамической теории дислокаций доказана динамическая теорема взаимности для кристалла с дислокацией, которая позволяет при различных системах пробной нагрузки вычислять упругие поля, возникающие при зарождении и движении дислокаций, а также изменения объема тела или объема полости внутри тела при движении дислокации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Доказано, что учет высокого и сверхвысокого давления при определении упругих характеристик в континуальной теории дислокаций гидростатически скатого кристалла (ГСК) сводится к перенормировке модулей упругости и замене геометрических параметров дефектов их значениями в ГСК. Показано, что, хотя описание дислокаций в ГСК не отличается от стандартного, кристалл, подвергнутый высокому гидростатическому сжатию, безусловно проявляет нелинейные упругие свойства, которые приводят к изменениям собственной энергии дефектов, их взаимодействия, барьера Пайерлса и т.п., что может быть экспериментально обнаружено уже при давлениях в несколько килобар.

2. Предсказаны изменения с давлением ширины расщепления дислокационного ядра, изменения энергетических параметров, характеризующих устойчивость ядра данного типа в различных материалах, обусловленные увеличением с давлением упругого взаимодействия и энергии дефекта упаковки, а также объемными изменениями, вносимыми дефектами в кристалл. Предсказано, обусловленное ограниченностью

упругих полей.

При дозвуковых скоростях зарождения упругое взаимодействие дислокаций с поверхностью носит дальнодействующий характер (на больших расстояниях от поверхности сила обратно пропорциональна расстоянию) и возрастает с увеличением скорости. При сверхзвуковом движении дислокации, в отличие от дозвукового, сила взаимодействия с поверхностью становится короткодействующей и при $z \geq \frac{1}{2} V / V - c$, её величина обращается в нуль, что соответствует моменту выхода ядра дислокации из области зарождения. Наибольшее значение силы взаимодействия достигает при $V = c$.

При дальнейшем увеличении V уже в сверхзвуковом режиме, сила взаимодействия уменьшается. Это приводит к снижению с ростом скорости вклада упругого взаимодействия в энергетический барьер при сверхзвуковом зарождении.

Получены спектральные характеристики упругих полей, возникающих при зарождении дислокации.

Рассчитаны: - полная энергия излучаемая через полуцилиндрическую поверхность, ограничивающую линию зарождения; - энергия "черенковского" излучения; - полная работа внешней силы, поддерживающей постоянную скорость дислокации.

Поскольку расчеты проводились на основе теории упругости, можно ожидать, что полученные результаты окажутся правильными, по крайней мере для той части энергии зарождения, которая обусловлена взаимодействием атомов среды на расстояниях, превышающих размер параметра кристаллической решетки (упругим взаимодействием), и является преобразующей при квазистатическом зарождении дислокации.

Снижение упругого вклада, предсказываемое при сверхзвуковом зарождении дислокации, по-видимому, должно увеличить роль энергетических потерь, обусловленных атомной структурой кристалла.

сверху силы упругого взаимодействия между дислокациями в кристалле, существование критического давления, при котором происходит качественное изменение дислокационного ядра - расщепленное в одной или нескольких плоскостях оно (ядро) при критической величине давления может превратиться в нерасщепленное, или, наоборот, нерасщепленное при нормальном давлении ядро может перейти в расщепленное. Следствием предсказываемого явления может стать безактивационное превращение под действием всестороннего гидростатического давления стопорных сидячих дислокаций в подвижные (скользящие).

3. Рассчитаны термоактивационные параметры (энергия активации и активационный объем) позволяющие предсказать изменения с величиной гидростатического давления скорости процесса рекомбинации частичных дислокаций и, следовательно, процессов превращения сидячих конфигураций ядер в скользящие, поперечного и повторного поперечного скольжения, перемещения дислокационных границ, спада стопорных трещинобразующих дислокационных барьеров в ряде простых и переходных ГЦК и гексагональных металлах, в переходных ОЦК металлах, а также в ионных кристаллах со структурой каменной соли.

4. Предсказано изменение с давлением концентрации вакансий при деформировании гидростатически скатого тела, и как следствие изменение скорости неконсервативного движения дислокаций - переползания в условиях высокого давления.

5. Разработана количественная теория размножения дислокаций по механизму двойного поперечного скольжения, учитывающая влияние термодинамических условий (давления и температуры), и позволяющая получить как временную зависимость плотности дислокаций и их петель, так и её изменения с давлением и температурой. Теоретически и экспериментально доказано увеличение скорости размножения дислокаций с возрастанием величины гидростатического

давления при активной деформации с постоянной скоростью переходных ОЦК металлов.

6. Предсказано изменение с давлением и деформацией качественного состава дислокационной структуры, а именно, доли стопорных дислокационных барьеров в общей плотности дислокаций. Теоретически и экспериментально доказано уменьшение с ростом давления доли стопорных трещинобразующих дислокаций в переходных ОЦК металлах при деформации с постоянной скоростью. Предсказано, что при давлениях выше критического стопорные дислокации ГЦК в кристаллах перестают быть эффективными стопорами, что обусловлено рекомбинацией стопорного расщепления ядра.

7. Обобщив критерии условий образования дислокаций на частичах распада твердого раствора Эшби - Джонсона, проведены оценки критических давлений зарождения дислокаций на упругих неоднородностях в кристаллах, подвергнутых равномерному всестороннему сжатию.

8. В рамках континуальной динамической теории дислокаций рассмотрено динамическое зарождение винтовой дислокации на свободной поверхности. Получены точные аналитические выражения возникающих при этом полей смещений, и их скоростей, упругих деформаций, а также полей напряжений. Рассчитана зависимость силовых и энергетических параметров упругого взаимодействия дислокации с поверхностью от величины скорости зарождения. Предсказано возрастание упругого взаимодействия с увеличением скорости при дозвуковом режиме зарождения и переход к короткодействующему взаимодействию при сверхзвуковом режиме, уменьшающемуся с увеличением скорости зарождения, что должно привести к снижению вклада упругого взаимодействия в энергетический барьер при сверхзвуковом зарождении дислокаций.

9. Доказана динамическая теорема взаимности для кристалла с дислокацией, позволяющая облегчить вычисление упругих полей, воз-

никающих при зарождении и движении дислокаций, а также изменений объемов тела и полостей в нем при перемещении дислокаций.

Публикации: Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Токий В.В., Зайцев В.И. Влияние гидростатического давления на дислокации. Физ.твердого тела. - 1973, 15, №8, 2460-2467.
2. Токий В.В., Зайцев В.И., Филатов Б.П. О механизме формирования упорядоченной дислокационной структуры металлов, деформированных при высоком гидростатическом давлении. - Укр.физ.ж., 1973, 18, №7, с.1178-1181.
3. Dulin M.A., Tokii V.V. On the Splitting of Dislocations in the Debye Theory.- phys.stat.sol.(b), 1974, 64, K97-K101.
4. Токий В.В., Зайцев В.И., Дулин М.А. О расщепленных дислокациях в кристаллах, подвергнутых высокому давлению. - Металлофизика. 1975, вып.62, с.99-102.
5. Зайцев В.И., Ляфер Е.И., Токий В.В. Влияние высокого гидростатического давления на установившуюся ползучесть аммиака при растяжении. - Физ.твердого тела, 1975, 17, №6, с.1866-1867.
6. Токий В.В., Зайцев В.И. О неконсервативном движении дислокаций в гидростатически скатом кристалле. - в кн. Динамика дислокаций, Киев, Науковадумка, 1975, с.87-91.
7. Токий В.В., Зайцев В.И. О скорости передвижения дислокаций в кристаллах в условиях давления. - Металлофизика, 1975, 61, 55-58.
8. Галкин А.А., Дулин М.А., Зайцев В.И., Ляфер Е.И., Токий В.В. Подвижность дислокаций в гидростатически скатых кристаллах. Тезисы У Международной конференции по физике и технике высоких давлений. СССР Москва, 26-31 мая 1975, М., "Наука", 1975, с.173.
9. Галкин А.А., Рюминина Т.А., Савица Д.Л., Зайцев В.И., Токий В.В., Акимов Г.Я. Возникновение сдвиговых напряжений в гидростатически скатых г.п.у.-кристаллах. Докл.АН СССР, 1976, 226, №, 816-818.

10. Дулин М.А., Паниотов Ю.Н., Стрельцов В.А., Токий В.В. Зарождение микротрещин в ОЦК металлах в условиях высокого гидростатического давления. - в сб.: Физика хрупкого разрушения, ч.2, К., ИМД АН УССР, 1976, с.197-199; Дулин М.А., Паниотов Ю.Н., Стрельцов В.А., Токий В.В. Залечивание микротрещин в ОЦК металлах в условиях высокого гидростатического скатия, в сб.: Физика хрупкого разрушения, ч.1, к., ИМД АН УССР, 1976, с. 89-90.
- II. Дулин М.А., Токий В.В. Подвижность дислокаций в гидростатически скатых ОЦК кристаллах. Влияние высоких давлений на вещество, Киев, ИМД, 1976, с.69-72.
12. Дулин М.А., Зайцев В.И., Преснякова О.В., Токий В.В. Подвижность дислокационных границ в кристаллах с низкой энергией дефектов упаковки. - Физика твердого тела, 1976, 18, I, 33-37.
13. Галкин А.А., Дулин М.А., Токий В.В. Расщепление дислокаций в гидростатически скатых кристаллах, ФТ, 1976, 18, №1, с. 102-107.
14. Galkin A.A., Dulin M.A., Zaitsev V.I., Lyafer E.I., Tokii V.V. Dislocation mobility in crystals of high hydrostatic pressure.- High Temp.-High Press.. 1976, 8, 672-673.
15. Галкин А.А., Токий В.В., Дулин М.А., Паниотов Ю.Н., Филатов Б.П. Влияние высоких гидростатических давлений на устойчивость дислокаций IOO , ДАН СССР, 1977, 235, №2, с.327-330.
16. Tokii V.V. Dislocation multiplication. I.On theory of dislocation multiplication.-phys.stat.sol.(a) 1977,44, 767-770.
17. Galkin A.A., Tokii V.V., Filatov B.P.- Dislocation multiplication II. The effect of the initial defect structure and deformation conditions on the dislocation multiplication.- phys.stat. sol.(a) 1978, 45, 327-332.

18. Косевич А.М., Токий В.В. Дислокации в гидростатически сжатом кристалле, §13 в книге Косевича А.М. "Дислокации в теории упругости". Наукова думка, К., 1978, с.196-208
19. Косевич А.М., Токий В.В., Стрельцов В.А. Дислокации и точечные дефекты в гидростатически сжатом кристалле. Физика металлов и металловедение, 1978, 45, №6, 1135-1144.
20. Токий В.В., Паниотов Ю.Н. Устойчивость дислокаций $\text{I}00$ в металлах с ОЦК-решетками. I Влияние поля напряжений на устойчивость дислокаций $\text{I}00$ - Украинский физ.журнал, 1979, 24, №10, 1465-1471.
21. Галкин А.А., Токий В.В., Филатов Б.П., Паниотов Ю.Н. Устойчивость дислокаций $\text{I}00$ в металлах с ОЦК решетками II. Изменение плотности дислокаций $\text{I}00$ при деформации - Украинский физ.журнал, 1979, 24, №10, 1472-1479.
22. Токий В.В., Паниотов Ю.Н. Влияние напряжений на устойчивость краевых дислокаций $\text{I}00$ - Физика твердого тела, 1979, 21, №8, 2415-2422.
23. Токий В.В. Динамическое зарождение дислокаций. Доклады АН СССР, 1981, 258, №4, 861-864.
24. Токий В.В. Изменение объемов кристаллов и полостей в них при перемещении дислокаций. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции "Гидростатическая обработка материалов", Донецк, 1981, с.7-9.

Подписано к печати 19.05.82. БП 03009. Формат 34x108/16. Писчая № 1. Офсетная печать. Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 338. Ротапrint ИЭП АН УССР. Институт экономики промышленности АН УССР. Донецк 340048, Университетская, 77.