

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения РАН,
академик РАН, профессор,
доктор технических наук


В.П. Матвеевко

15.10.2014 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

– Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук на диссертацию
КУЛЬКОВА АЛЕКСЕЯ СЕРГЕЕВИЧА

«Вариации физико-механических свойств оливина в дунитах в результате их неоднородного пластического деформирования», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, 01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Кулькова А.С. посвящена актуальной задаче установления взаимосвязи между механизмами деформирования особого типа горных пород — дунитов — с конфигурацией их тонкой кристаллической структуры. Определение физико-механических характеристик ультраосновных горных пород и связи с их кристаллическим строением необходимо для реконструкции условий их возникновения и сценариев происходящих геологических процессов, в ходе которых динамические нагрузки приводят к интенсивной неупругой деформации дунитов, что характерно для дунитов Тарлашкинского массива.

Актуальность данного исследования для решения ряда прикладных задач горной инженерии, геодинамики и тектоники обусловлена необходимостью определения связи различных типов дунитов, отличающихся типами структур, с их физико-механическими свойствами. Работу отличает комплексный подход к изучению особенностей строения дунитов, сочетающий различные физические методы (рентгеноструктурный, рентгенофазовый анализ, петрологический анализ, электронная микроскопия) для установления связи структурных характеристик дунитов с их деформационными и прочностными свойствами.

К **основным результатам** диссертации следует отнести:

- новые представления о механизмах формирования иерархических микроструктур в дунитах, обусловленных различиями их тонкой структуры, термодинамическими и механическими (степенью пластических деформаций) особенностями эволюции геологической среды;

- проведенную петроструктурную типизацию дунитов Тарлашкинского массива, обусловленную различной степенью пластических деформаций, и дополняющую имеющиеся в геологии представления о структуре ультраосновных пород;

- совокупность результатов исследования физико-механических свойств дунитов при активной деформации сжатием, позволивших установить связь структурной

неоднородности различных типов дунитов с механизмами пластического деформирования оливина при различных термодинамических условиях формирования;

- результаты анализа распределения главных петрогенных окислов, редких и редкоземельных элементов дунитов и оливинах, установивший слабое влияние степени деформации на перераспределение петрогенных и редких компонентов.

Концептуальные аспекты работы, обоснование актуальности темы, положения, выносимые на защиту, достоверность и практическая значимость полученных результатов изложены во **введении**.

В **первой (обзорной) главе** анализируются современные представления о пластической деформации и разрушении горных пород, обсуждаются работы по изучению механизмов деформирования, специфических для геологической среды: катакластические течения, обусловленные разрушением и дезинтеграцией горных пород в условиях неоднородного метаморфизма; хрупко-пластические переходы, дислокационная и диффузионная ползучесть в условиях естественного залегания и тектонических движений геосреды. Детально обсуждаются особенности катакластические течения, характерные для верхних частей земной коры в условиях низких температур и больших скоростей деформации. На основе проведенного обзора сделан вывод о неполноте имеющихся сведений о неупругой деформации горных пород и отсутствии взаимосвязи между механическими свойствами различных типов дунитов, особенностями их структуры и накопленной пластической деформации в геологических процессах.

Во **второй оригинальной главе** изложена постановка задачи, сформулированы задачи исследования, описаны материалы и методики исследований, используемых в работе. Обсуждаются признаки конвергентности механизмов развития структуры, отражающей напряженное состояние на различных уровнях верхней мантии и земной коры. Обоснована одна из основных целей работы – выявление особенностей пластической деформации дунитов Тарлашкинского массива, обусловленных разной степенью их напряженного состояния и связанных с иерархией развития зеренного и субзеренного ансамбля природно деформированного оливина.

Обоснован комплексный подход к оценке пластических деформаций оливина из дунитов с использованием методов *структурного картирования* для установления геологического залегания дунитов Тарлашкинского массива; *методов петроструктурного анализа* для классификации структур дунитов и количественной оценки их деформационных структур; *микроструктурного анализа* для выявления предпочтительной ориентировки оливина по внутреннему строению и морфологии с целью идентификации механизмов и термодинамики пластического деформирования; *рентгеноспектрального микронализа* для получения качественных изображений, отражающих конфигурацию минеральных фаз в различных деформационных типах дунитов, а также для определения химического состава минералов; *рентгенофазового и рентгеноструктурного метода* для получения данных о фазовом составе дунитов, соотношении фаз, параметров кристаллической решетки; данных *механических испытаний* для определения пределов пластичности и прочности в зависимости от кристаллографии зерен оливина с учетом анизотропии модулей упругости.

В **третьей оригинальной главе** изложено описание объекта исследования -, дунитов Тарлашкинского ультрамафитового массива, представляющего собой линзовидное тело субширотного (длиною 9 и шириной 2,5 км), выделяются два генетических типов ультрамафитов (метаморфический и метасоматический, приводится детальная петрографическая и петрогеохимическая характеристика пластически деформированных дунитов, дана петроструктурная типизация дунитов по степени увеличения их пластической деформации. Показано, что в результате

интенсивной пластической деформации дуниты приобретают характерные микроструктурные признаки, свойственные метаморфическим породам. Приводятся результаты химического состава минералов, слагающих дуниты, сделаны выводы о его связи со степенью их пластического деформирования. Петрографические исследования дунитов позволили установить их микроструктурную неоднородность, обусловленную возрастанием степени неоднородности пластического деформирования. Показано, что регрессивный характер пластических деформаций не способствовал активному перераспределению петрогенных и редких компонентов в оливине и дунитах.

В четвертой оригинальной главе обсуждаются особенности деформационных структур дунитов различной природы образования и проведен сравнительный анализ с параметрами тонкой структуры. Физико-механическая неоднородность дунитов при пластической деформации изучалась рентгеноструктурным и рентгенофазовыми методами, а также методами растровой электронной микроскопии. Отмечается, что выявленные закономерности свидетельствуют о деформационной природе переходов между структурными типами дунитов, сопровождающихся уменьшением размеров зерен оливина. Анализ изменения удельной протяженности границ позволил сделать вывод о различии термодинамических режимов формирования типов дунитов: высокотемпературный режим, близкий к условиям первичной рекристаллизации, и низкотемпературный, сопровождающийся увеличением абсолютной и удельной протяженности границ зерен при переходе к мозаичному типу. Установлена связь начальных стадий деформации с формированием субзеренной структуры при реализации трансляционного скольжения и влияние динамической рекристаллизации на завершающих стадиях пластической деформации, сопровождающихся диффузионной ползучестью при активном влиянии флуидов.

В пятой оригинальной главе изучены физико-механические свойства дунитов и устанавливается связь структурных характеристик с параметрами тонкой кристаллической структуры, пределом текучести, прочности, упругими модулями. Обнаружен принципиально различный характер разрушения крупно- и мелкокристаллических образцов. Отмечается, что формирование дунитов сопровождалось существенными структурными превращениями, изменением фазового состава, накоплением поврежденности. Установлено, что в крупнокристаллическом дуните происходит множественное, «объемное» разрушение по всем составляющим крупным фрагментам. Для мелкокристаллических образцов разрушение локализовано преимущественно в теле зерен и развивается от границ кристаллитов по направлениям, близким к максимальным касательным напряжениям. Анализ структурных и механических свойств дунитов выполнен на основе модели, учитывающей связь неупругих деформаций с эффектами внутреннего трения, компаксии и дилатансии. Проведенные детальные петроструктурные исследования различных типов оливинов с применением микроструктурного анализа в пластически деформированных дунитах позволили определить на основе изучения ориентировок зерен оливина их микроструктурную неоднородность и установить связь особенностей их эволюции с термодинамическими и механическими закономерностями деформирования.

Оригинальность работы обусловлена результатами комплексного исследования связи структурных особенностей дунитов, их петроструктурной неоднородности с различными условиями и механизмами пластического деформирования оливина, определением комплекса механических параметров (пределов текучести, прочности, упругих модулей).

К фундаментальным результатам работы следует отнести:

- вывод о различных механизмах пластического деформирования оливина, приводящих к структурной неоднородности типов дунитов и реализующихся в различных термодинамических условиях, и предложенные сценарии структурообразования;
- полученную совокупность данных о физико-механических параметрах четырех петроструктурных типов дунитов при активной деформации сжатием;
- классификацию зерен оливина по размерам и форме, отражающую возрастание степени их пластического деформирования, и рассчитанные температуры пластической деформации дунитов.

Полученные данные о закономерностях разрушения дунитов, а именно характера фрагментации крупнокристаллических и мелкокристаллических образцов, а также установленные механизмы неупругой деформации оливина представляют научную ценность работы и являются новыми.

По содержанию работы уместны следующие замечания:

- при вычислении размера кристаллитов (построение зависимости Холла-Вильямсона, рис. 4.4, стр.80) неясно, на основании каких соображений произведен выбор линейных функций, аппроксимирующих экспериментальные значения ширины линий и какова достоверность аппроксимации в каждом случае;

- на стр. 86 диссертации приведены графики распределения зерен по размерам для различных петроструктурных типов дунитов, однако, не обсуждается, какие физикомеханические процессы являются причиной бимодального характера распределения в случае протогранулярного и порфинокластового типов дунитов и унимодальном распределении для дунитов порфиroleйстового и мозаичного типов;

В целом, приведенные в диссертации результаты являются законченным исследованием в актуальной области современной физики конденсированных сред и механики деформируемого твердого тела. Актуальность и практическая значимость работы не вызывают сомнения, так как соответствуют основным тенденциям и исследованиям в данной области, проводимым лидирующими научными коллективами. Результаты опубликованы в известных научных изданиях, автореферат отражает содержание диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, комплексным подходом, сочетающим различные физические методы, применением статистических методов обработки полученных данных, достаточным для корректной оценки результатов, и согласием полученных результатов с данными других авторов.

Результаты, полученные в диссертации, имеют важное значение для науки и практики, и могут быть использованы при проведении фундаментальных и прикладных исследований в Институте механики сплошных сред УрО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Российских Федеральных Ядерных Центрах, ряде других научно-исследовательских организаций, а также при разработке учебных курсов по физике и механике деформируемого твердого тела.

Содержание диссертационной работы Кулькова А.С. и основные результаты, полученные в ней, полностью отражены в публикациях, перечисленных в автореферате диссертации, и достаточно апробированы. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

На основании вышесказанного можно заключить, что диссертант выполнил содержательное исследование, им получены новые актуальные научные результаты, ряд которых представляет интерес в современных приложениях, а Алексей Сергеевич Кульков,

несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела и 01.04.07 — Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на научном семинаре ИМСС УрО РАН (протокол № 18/14 от 14 ноября 2014 г.) и утвержден на заседании ученого совета (протокол № 10-14 от 25 ноября 2014 г.).

Заведующий лабораторией
физических основ прочности
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения
Российской академии наук
доктор физико-математических наук, профессор

Наймак Олег Борисович

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
(342) 237-84-61,
mvp@icmm.ru, www.icmm.ru
naimark@icmm.ru

