Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

XXI УРАЛЬСКАЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ДЕКАДА

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

КОНФЕРЕНЦИИ И ШКОЛЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ

«Разрушение горных пород и минералов»

4 - 7 апреля, 2023 года

Екатеринбург, Россия

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

XXI УРАЛЬСКАЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ДЕКАДА

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

Конференции и школы молодых ученых и студентов «Разрушение горных пород и минералов»
4 – 7 апреля, 2023 года
Екатеринбург, Россия

Екатеринбург 2023

УДК 539.4

Ответственный редактор:

Зайцев Дмитрий Викторович, д.ф.-м.н., зав. кафедрой физики УГГУ

Печатается по решению Учебно-методического совета
Уральского государственного горного университета.

Разрушение горных пород и минералов: Сборник материалов конференции и школы молодых ученых и студентов (г. Екатеринбург, 4 апреля 2023 г.) / отв. редактор Д.В. Зайцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2023. – 85 с.

В сборнике материалов приводятся результаты исследований, представленнных на конференции и школе молодых ученых и студентов специалистами в области геомеханики, физики пластичности и прочности горных пород, а также материалов различной природы. Особое внимание уделено взаимосвязи между структурой и прочностными свойствами горных пород и минералов. Рассмотрены проблемы построения континуальных моделей иерархически-блочных сред, параметрического обеспечения геомеханических расчетов и математических моделей горных пород, а также программное обеспечение для реализации данных моделей. Предложены критерий пластического деформирования и методика построения паспорта прочности горных пород. Обсуждаются компьютерные модели горных пород на основе метода дискретных элементов и модели с внутренними переменными (зернами, порами и т.д.), а также вопросы геодинамики, тектонофизики, гидроразрывва пластов, применения эффекта Кайзера и Ребиндера к вопросам прочности горных пород и их напряженно-деформированному состоянию.

Предназначен для специалистов в области прочности и разрушения горных пород и других материалов, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей. Статьи опубликованы в авторской редакции. Оргкомитет не несёт ответственности за содержание опубликованных материалов.

© Уральский государственный
горный университет, 2023
© Авторы, постатейно, 2023

ОРГАНИЗАТОРЫ

Уральский государственный горный университет (УГГУ), г. Екатеринбург

Уральский федеральный университет (УрФУ), г. Екатеринбург

Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Барях А.А., академик РАН (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

Заместитель председателя

Зайцев Д.В., д.ф-м.н. (УГГУ, Екатеринбург)

Состав

Жабко А.В., д.т.н. (УГГУ, Екатеринбург);

Майсурадзе М.В., к.т.н. (УрФУ, Екатеринбург);

Пантелеев И.А., д.ф-м.н. (ПФИЦ УрО РАН, Пермь);

Панфилов П.Е., д.ф-м.н. (УрФУ, Екатеринбург);

Симисинов Д.И., к.т.н. (УГГУ, Екатеринбург);

Стефанов Ю.П., д.ф-м.н. (ИФПМ СО РАН, Томск, ИНГГ СО РАН, Новосибирск)

Шагалов Е.С., к.г-м.н. (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург).

Хазин М.Ю., д.т.н. (УГГУ, Екатеринбург).

Учёный сектетарь

Куклина А.А., к.т.н. (УГГУ, Екатеринбург)

СОДЕРЖАНИЕ

И.А. Пантелеев 7
Эффект Кайзера в трещиновато-пористых горных породах при трехосном непропорциональном сжатии

И.А. Пантелеев, А.С. Соколов, А.А. Барях 9
Эволюция дефектной структуры красного сильвинита при ступенчатом одноосном сжатии по данным рентгеновской микротомографии

Д.Ф Акрамов, Н.В. Селезнева, Е.М. Шерокалова 11
Модификация свойств синтетического джайпурита $Co_{0.96}S$ путем замещения кобальта хромом

В.В. Васильевых 12
Методы обработки изображений при определении трещиностойкости горных пород

М.А. Гузев 14
Принципы построения континуальной модели иерархически-блочной геосреды

Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров 14
Моделирование разрушения горных пород методом дискретных элементов

М.О. Еремин, В.А. Зимина, А.С. Кульков, Ю.П. Стефанов 16
Моделирование деформации и разрушения мезообъемов лабораторных образцов искусственного материала при одноосном сжатии

А.М. Кучуков, В.Э. Вильдеман 18
Исследование закритического деформирования и разрушения горной породы в окрестности выработки

О.О. Лебедева 20
Применение комплекса геомеханического и геофизического подходов для моделирования НДС массива горных пород на участках ВКМКС

М.Е. Меженов, А.А. Куклина, Д.В. Зайцев, П.Е. Панфилов 21
Влияние водонасыщения на прочностные свойства горных пород магматического происхождения при сжатии и изгибе

С.Н. Мозговых, Н.В. Селезнева, Н.В. Баранов 22
Низкотемпературные фазовые превращения в соединениях со структурой пирротина, как индикатор их структурных особенностей и состава

А.А. Остапчук, К.Г.Морозова, Д.В. Павлов, Г.А. Гридин 24
Формирование динамического разрыва на гетерогенном контакте блоков скальных пород

П.Е. Панфилов 25
Особенности морфологии трещин в горных породах разного генезиса по сравнению с трещинами в металлах

Е.Ю. Радзивилов, А.С. Юдин 26
Разработка электродной системы для электроразрядных технологий

Ю.Л.Ребецкий 28
Тектонофизическое районирование разломов юго-восточной анатолии по степени их опасности

С.Н. Тагильцев 30
Паспорт прочности горных пород и описание напряжённо-деформированного состояния приповерхностной части земной коры

В.А. Коротаева, М.В. Майсурадзе 32
Влияние обработки холодом на микроструктуру и свойства высокопрочной стали D6AC

Е.В. Антаков, М.В. Майсурадзе, А.А. Куклина 34
Сравнительная оценка механических свойств литой и горячекатаной стали 40ХН2МА

Д.И. Лебедев, Е.В. Антаков, М.В. Майсурадзе, А.А. Куклина 36
Влияние химического состава стали на параметры превращений аустенита при охлаждении

В.В. Назарова, Д.И. Лебедев, М.В. Майсурадзе, А.А. Куклина 37
Применение дифференциального уравнения для анализа кинетики изотермического бейнитного превращения

В.В. Назарова, Д.И. Лебедев, М.В. Майсурадзе, А.А. Куклина 39
Влияние траектории охлаждения до температуры изотермической выдержки на кинетику бейнитного превращения в стали

Д.И. Лебедев, Куклина А.А., М.В. Майсурадзе, Ю.В. Юдин 41
Особенности структурообразования в стали 20Х2Г2СНМА при изотермической выдержке

Д.И. Лебедев, М.В. Майсурадзе, Ю.В. Юдин 42
Влияние температуры изотермической выдержки на ударной вязкость стали 20Х2Г2СНМА

В.А. Комарова, М.Д. Ключарев, Н.В. Селезнева, Н.В. Баранов 44
Изменение фазового состава, структуры и свойств при замещении в системе с грейгитом Fe_3Se_4 – Fe_3S_4

С.О. Барков, В.В. Химуля 45
Изучение физико-механических свойств пород-коллекторов подземных хранилищ газа при реализации метода направленной разгрузки пласта с применением средств рентгеновской компьютерной томографии

А.Н. Беседина 47
Геодинамические явления при подземной разработке коробковского железорудного месторождения

В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский 48
Самоорганизация структур локализации деформаций и разрушений при численном моделировании горной породы при взрывном воздействии

А.В. Жабко 52
Единый критерий пластичности, прочности и разрушения горных пород для условий трехосного сжатия

Д.В. Зайцев, А.А. Куклина, П.Е. Панфилов 55
Особенности деформационного поведения дентина человека в водной среде

К.И. Перескокова, В.П. Пилюгин, К.А. Постовалова, А.А.Куклина, Д.В. Зайцев, П.Е. Панфилов 56
Прочностные свойства монокристаллического вольфрама

И.В Фокин, Н.В. Дубиня 57
Организация геомеханических исследований в ифз ран, обзор основных результатов за 2015 – 2022 годы. Коммерческие и фундаментальные работы.

В.А. Начев, Д.А. Тауренис, С.Б. Турунтаев 58
Трехмерное численное моделирование процесса фильтрации жидкости и распространения трещин ГРП в породах-коллекторах со сложным минеральным составом на микромасштабе

Е.В. Новикова, М.А. Тримонова, Е.В. Зенченко, С.Б. Турунтаев 60
Прочность материала на одноосное растяжение в лабораторных экспериментах по гидроразрыву пласта: сравнение методов

А.Н. Кочанов, С.А.Кочанов 62
Оценка структурной неоднородности горных пород применительно к процессу разрушения

И.А. Гузеев 66
Прогнозирование структурных обрушений уступов карьера по данным комбинированной съемки трещиноватости

Б.Т. Ильясов 68
О необходимости эксплицитного моделирования разрушения горных пород в геомеханике на практических примерах

Н. Н. Ефремовцев, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский 70
Исследование действия взрыва с применением компьютерного моделирования в условиях внешнего давления.Триггерный эффект

Адас В.Е., Хазин М. Л. , Шайдуров Г.С. , Попов Н.А. 77
Влияние времени перемешивания на твердость алюмоматричных композитов, упрочненных карбидом титана

Шайдуров Г.С., Адас В.Е., Хазин М.Л., Попов Н.А 79
Взаимосвязь твёрдости и прочности алюмоматричного материала (Al-TiC)

Шайдуров Г.С., Адас В.Е., Хазин М.Л. 81
Износостойкость алюмоматричного материала (Al-TiC)

Голыгин А. М., Адас В. Е., Шайдуров Г. С., Хазин М. Л. 83
Влияние величины нагрузки на величину твердости цветных металлов

ЭФФЕКТ КАЙЗЕРА В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ТРЕХОСНОМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ СЖАТИИ

И.А. Пантелеев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь.

Email: pia@icmm.ru

Эволюция разномасштабной разноориентированной микротрещиноватости в горных породах является физическим механизмом эффекта памяти (эффект Кайзера), наблюдающегося при их циклическом нагружении. Несмотря на интенсивные исследования проявления этого эффекта в горных породах на протяжении последних тридцати-сорока лет, выполненные российскими и зарубежными научными школами вопрос о физических механизмах и параметрах, контролирующих проявление эффекта Кайзера, в особенности в случае многоосной нагрузки с переориентацией приложенных напряжений, является до сих пор открытым. Актуальность исследования этого эффекта при трехмерных конфигурациях приложенных напряжений объясняется возможностью его использования для оценки величины и ориентации природных напряжений в массиве горных пород в районах добычи полезных ископаемых, сложных геологических структур, разломных зон и вулканических построек.

В экспериментальной части доклада приведены результаты экспериментальных исследований проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном нагружении песчаника в условиях последовательного изменения формы, размеров и ориентации эллипсоида приложенных напряжений (эллипсоида Ламе), реализованных на базе лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва) [1]. Реализованы четыре программы испытаний: циклическое всестороннее сжатие, 6-и и 9-и цикловые трехосные испытания с вариацией ориентации, размеров и формы эллипсоида Ламе, циклическое трехосное сжатие с изменяющимся уровнем девиаторных напряжений от цикла к циклу.

В результате проведенных экспериментов показано, что циклическая смена ориентации и формы эллипсоида Ламе приводит к формированию анизотропной поврежденности: системы разноориентированных ансамблей дефектов и трещин различного масштаба, каждый из которых может демонстрировать независимый контролируемый эффект памяти повреждений (эффект Кайзера) [2]. Установлено, что превалирующим механизмом проявления эффекта памяти повреждений в каждом определенно ориентированном ансамбле трещин является развитие микротрещин нормального отрыва, ориентированных субнормально к направлению минимального главного напряжения. Проведенные эксперименты по циклическому деформированию песчаника при постоянном среднем напряжении с изменяющимся уровнем девиатора напряжений позволяют заключить, что на проявление эффекта Кайзера не влияет уровень интенсивности касательных напряжений, действующих на образец. Активизация акустической эмиссии наблюдалась в момент превышения ранее достигнутого уровня деформаций относительного растяжения в направлении действия минимального главного напряжения, который всегда предшествовал моменту начала превышения уровня касательных напряжений предыдущего цикла.

В теоретической части доклада для описания направленного характера проявления эффекта Кайзера представлено обобщение неклассической нелинейной упругой модели деформирования хрупких сред, предложенной академиком РАН В.П. Мясниковым и развитой впоследствии в работах его учеников, на случай тензорной поврежденности и

тензорного уплотнения. Тензор поврежденности второго ранга вводится в рамках устоявшихся представлений континуальной механики поврежденности, главные значения которого описывают сокращение площади поперечного сечения материала в трех ортогональных направлениях. Преимущество такого представления заключается в возможности определения компонент тензора для любого набора разноориентированных ансамблей микротрещин, полученного по томографическим или петрофизическим данным. Для описания неупругого уплотнения материала при сжатии, вызванного изменением его пористости, введен тензорный параметр уплотнения, являющийся обобщением закона Ати и учитывающий влияние девиатора напряжения на процесс уплотнения [3]. Треть следа тензора уплотнения описывает текущую среднюю пористость материала. Введённый тензорный параметр позволяет описывать уплотнение/разуплотнение материала при его циклическом трехосном сжатии.

Рассмотрение тензора уплотнения как независимого термодинамического параметра наряду с упругой деформацией и тензором поврежденности позволило получить определяющие соотношения для нелинейно пороупругой модели, учитывающей два тензорных механизма деформирования хрупкого пористого материала: микротрещинообразование и уплотнение пористого пространства. Предложенная экспоненциальная зависимость перекрестных кинетических коэффициентов уравнений для компонент тензора поврежденности и уплотнения от поврежденности, позволила описать замкнутую предельную поверхность для трещиновато-пористого хрупкого материала. Особенностью разработанной модели является сегрегированное описание эволюции предельной поверхности отдельно для каждого из главных направлений тензора деформации [4]. Модель позволяет описывать направленное упрочнение материала, связанное с определенно ориентированными ансамблями микротрещин.

На основе экспериментальных данных по циклическому трехосному сжатию песчаника Darley Dale с изменением формы и ориентации эллипсоида приложенных напряжений, проведена идентификация и верификация нелинейной модели деформирования хрупкого пористого материала с тензорными параметрами поврежденности и уплотнения. Показано, что разработанная модель позволяет описывать ориентационные особенности проявления эффекта Кайзера в хрупком трещиновато-пористом материале при его трехосном циклическом сжатии.

Автор выражает благодарность В.И. Кареву, Н.И. Шевцову, К.Б. Устинову, А.В. Зайцеву за инициирование и совместную реализацию экспериментальных исследований деформационного поведения песчаника Шешминской свиты при истинном трехосном сжатии. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-3008.

1. И.А. Пантелеев, В.А. Мубассарова, А.В. Зайцев, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов, Н.И. Шевцов, *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* 495, сс. 63-67 (2020).
2. И.А. Пантелеев, В.А. Мубассарова, А.В, Зайцев, Н.И. Шевцов, Ю.Ф. Коваленко, В.И. Карев, *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых* **3**, сс. 47-55 (2020).
3. И.А. Пантелеев, В. Ляховский, В.А. Мубассарова, В.И. Карев, Н.И. Шевцов, Э. Шалев, *Записки Горного института* **254**, сс. 234-243 (2022).
4. V. Lyakhovsky, I. Panteleev, E. Shalev, J. Browning, T.M. Mitchell, D. Healy, P.G. Meredith, *Geophysical Journal International* **230**, pp. 179-201 (2022).

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ КРАСНОГО СИЛЬВИНИТА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

И.А. Пантелеев[1], А.С. Соколов[2], А.А. Барях[2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*

[2]*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

Email: pia@icmm.ru

В результате многолетних экспериментальных исследований деформационного поведения соляных пород Верхнекамского месторождения при различных видах нагружения показано, что коэффициент вариации механических и прочностных свойств может превышать 30% даже для образцов, изготовленных из одного монолита [1]. Причины такого разброса значений многообразны: вариации объемного содержания различных минералов, вариация среднего размера зерен, наличие разномасштабных дефектов различной природы, содержание глинистого материала, влажность и т.д.

Петрологическое описание конкретных образцов, характеризация их внутренней структуры, как правило, базируются на описании шлифов и результатах сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ). Шлифы подходят для оценки истории образования и формирования породы, однако возможности детального описания строения с помощью этого метода весьма ограничены ввиду низкого разрешения (не выше толщины шлифа, около 5–40 мкм), присутствия минеральных зерен различной оптической плотности, которые не всегда позволяют с достаточной точностью провести интерпретацию изображения. С другой стороны, при исследовании шлифов есть возможность получения изображений в скрещенных и параллельных николях, что позволяет определять ориентацию кристаллов. РЭМ дает изображения высочайшего разрешения до единиц нм, но они являются двухмерными проекциями трехмерных поверхностей сколов. Основным недостатком вышеперечисленных методов является их двухмерность и возможное нарушение структуры. При этом для понимания и моделирования различных физико-механических процессов, происходящих в породах, необходимо иметь детальное представление о ее трехмерном строении, распределении по объему различных минеральных фаз, дефектов различного типа, включая поры и микротрещины.

Альтернативным неразрушающим методом, позволяющим получать трехмерные изображения внутреннего строения материала, является метод рентгеновской микротомографии. При разработке нефтегазовых или рудных месторождений томографическое исследование кернов фактически стало стандартом при оценке содержания полезных ископаемых и пористости горных пород. Данный метод в сочетании с другими методами неразрушающего контроля показал свою эффективность при изучении механизмов деформирования и разрушения ряда кристаллических и осадочных горных пород [2-4].

Данная работа посвящена сравнительному анализу данных деградации механических и прочностных свойств красного сильвинита в процессе его ступенчатого одноосного сжатия и данных эволюции его внутренней дефектной структуры, полученных методом рентгеновской микротомографии.

Для реализации экспериментальной программы были подготовлены призматические образцы красного сильвинита с характерным размером 20x18x21 мм.

Каждый из образцов подвергался последовательным циклам «нагрузка-разгрузка» с шагом по максимальному приложенному напряжению 2 МПа вплоть до разрушения. Томографическая съемка образцов в исходном состоянии и после каждого цикла осуществлялась на микротомографе SkiyScan 1272 Bruker со следующими параметрами: напряжение на рентгеновской трубке 100 кВ, ток 100 мкА, разрешение (размер ребра вокселя) 12 мкм, время экспозиции 3000 мкс, шаг вращения образца 0.3° со съемкой на 360°. Продолжительность съемки каждого образца составила 8 часов 12 минут. Для минимизации влияния граничных эффектов осуществлялась съемка объема материала в средней (по высоте) части образца. При заданном пространственном разрешении высота отснятой области образца составила 8.52 мм. Полученный стек из 750 теневых проекций был реконструирован в набор двумерных поперечных сечений с применением методики компенсации ошибки в определении положения образца, как правило, вызванной дрейфом эмиттера источника рентгеновского излучения, тепловым расширением объекта съемки внутри или случайными механическими вибрациями.

Для количественного морфологического анализа нарушений сплошности сильвинита в процессе деформирования была реализована процедура (ПО CTAn) выделения отдельных дефектов на 3D-изображении с последующей оценкой следующих параметров: объем, максимальный линейный размер, коэффициент сферичности [5]. В результате кластерного анализа многомерных данных параметров дефектов сплошности, определенных по томографическим данным, установлено, что все выявленные дефекты можно разделить на два кластера, соответствующих поро-подобным дефектам (малый объем, высокий коэффициент сферичности) и трещинно-подобным дефектам (большой объем, низкий коэффициент сферичности). Показано, что с ростом максимального приложенного напряжения наблюдается рост общего объема дефектов сплошности, с одной стороны, и рост объема и количества трещинно-подобных дефектов, относительно поро-подобных дефектов, с другой стороны.

Сравнительный анализ изменения механических свойств испытанных образцов (модуля упругости, максимальной деформации, остаточной деформации) и объема выявленных дефектов обоих типов позволил установить прямую корреляционную зависимость между этими характеристиками. Полученные результаты и найденные зависимости могут быть использованы для построения феноменологических моделей деформирования горных пород, учитывающих эволюцию их дефектной структуры путем явного или неявного введения внутренних переменных различного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-3008.

1. А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков, *Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие*. (ПГТУ, Пермь, 2008).
2. Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов, *Физика твердого тела* **60(7)**, сс. 1353-1357 (2018).
3. Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.В. Корост, К.А. Дамаскинский, *Физика твердого тела* **63(1)**, сс. 103-109 (2021).
4. Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, А.Г. Кадомцев, О.Б. Наймарк, *Физика твердого тела* **59(5)**, сс. 920-930 (2017).
5. И.А. Пантелеев, А.С. Соколов, А.А. Барях, Горное эхо **4(89)**, сс. 49-54 (2022).

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКОГО ДЖАЙПУРИТА $Co_{0.96}S$ ПУТЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ КОБАЛЬТА ХРОМОМ

Д.Ф Акрамов[1], Н.В. Селезнева[1], Е.М. Шерокалова[1]

[1]Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, ИЕНиМ, г. Екатеринбург

Email: Dmaster96@mail.ru

Джайпурит – редкий минерал, кристаллизация которого требует необычных условий [1]. Идеальный джайпурит (CoS) относится к халькогенидам переходных металлов (ХПМ) со структурным типом никелина NiAs и является антиферромагнетиком [2]. Среди ХПМ существует большая группа катион-дефицитных соединений типа $MCh_{1\pm\delta}$ (M = 3d переходный металл; Ch = S, Se, Te), обладающих слоистой структурой. Магнитные свойства таких соединений $MCh_{1\pm\delta}$ зависят как от сорта атомов металла и халькогена, так и от концентрации и упорядочения вакансий в катионной или анионной подрешетках. Например, в системах $CoCr_2Ch_4$, близких по составу к джайпуриту, наблюдается изменение типа магнитного упорядочения от антиферромагнитного в ферримагнитное состояние при переходе от моноклинного $CoCr_2Se_4$ к кубическому $CoCr_2S_4$ [3]. В $CoCr_2Se_4$ так же обнаружен фазовый переход, обусловленный изменением спинового состояния атомов кобальта в интервале температур ~ 200 К – 275 К [4]. В системе Cr-S существует большое концентрационное разнообразие в упорядочении атомов хрома, что приводит к различным типам магнитного упорядочения [5]. При переходе от Cr_2S_3 к Cr_7S_8 происходит усиление обменного взаимодействия между ионами хрома и увеличение температуры магнитного упорядочения вплоть до 450 К в фазе CrS. Состав $Cr_{0.96}S$ по данным рентгеновской дифракции однофазен и кристаллизуется в моноклинной сингонии. Однако, по данным магнитных измерений в зависимости от термообработки помимо основной фазы с температурой Нееля T_N = 450 К в образцах присутствует фаза Cr_7S_8 с T_N = 125 К.

В ходе работы нами было синтезировано катион-дефицитное соединение $Co_{0.56}Cr_{0.4}S$ и обнаружены его уникальные свойства. Поликристаллический образец $Co_{0.56}Cr_{0.4}S$ был получен методом твердофазного ампульного синтеза с закалкой от T = 1000°C. Рентгенографическая аттестация осуществлялась на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE. Измерения намагниченности осуществлялись на вибрационном магнитометре Lake Shore VSM 7407. Измерение теплового расширения проводилось на дилатометре DL-1500 RHP/DL-1500-H (UCVAC/SINKU).

Рентгеновская аттестация показала, что $Co_{0.56}Cr_{0.4}S$ однофазно и кристаллизуются в гексагональной сингонии с пространственной группой $P6_3/mmc$. Обнаружено аномальное поведение температурной зависимости намагниченности в интервале от 660 К до 900 К. В этом же температурном интервале происходит аномальное необратимое увеличение линейного размера образца ~ 6 %, а также резкое изменение магнитных характеристик. Установлено, что при T ~ 660 К происходит как структурный фазовый переход от гексагональной симметрии к кубической, так и выделение кобальта. Исходное структурное и магнитное состояние соединения возвращается после дополнительного отжига и последующей закалки от 1000°C. Полученные данные говорят о метастабильности структурного и магнитного состояния соединения $Co_{0.56}Cr_{0.4}S$.

Работа подготовлена при финансовой поддержке ППК 3.1.1.1.г-20.

1. Н.В. Сорохтина, Геохимия 66, сс. 407-424 (2021)
2. B. Morris, V. Johnson, A. Wold, Journal of Physics and Chemistry of Solids 28, pp. 1565- (2012)
3. P. Gibart, Journal of Physics and Chemistry of Solids 34, pp. 1363-1368 (1973)
4. V. Svitlyk, D. Chernyshov, Y. Mozharivskyj et al. Inorganic Chemistry 55, pp. 338-344 (2016)

5. T.J.A. Popma, C. F. Van Bruggen, Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry 31, pp. 73-80 (1969)

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

В.В. Васильевых

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Горный институт

Email: vova398777@gmail.com

Проводилась оценка коэффициента трещиностойкости горных пород K_{Ic} согласно рекомендациям ISRM. Образцы взяты с Новомосковского месторождения гипса. Размеры образцов 150 мм длина, 40 мм диаметр. Применялась трехточечная схема нагружения образца с V-образным вырезом, показанная на рис. 1.

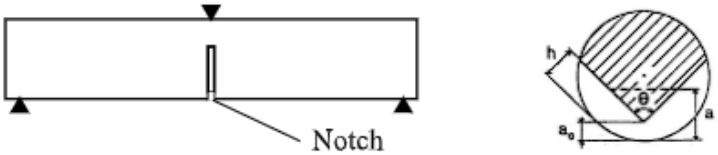
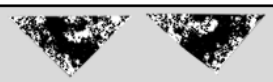
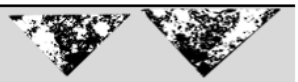
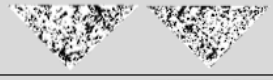
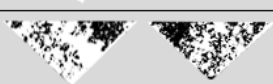


Рис. 1. Трехточечная схема нагружения и разрез концентратора напряжений (Notch)

Во время эксперимента образцы разрушались на две части. На сканере были получены изображения сечений V–образной области и были проведены расчеты площади включений углистых глин и произведена оценка их влияния на коэффициент трещиностойкости. Анализ был проведен в программе Matlab с помощью оценки уровня яркости в черно-белом спектре (включения углистых глин от 0 до 60, все остальные минералы от 60 до 255) (Таблица 1).

Таблица 1. Изображения сечений с включениями углистых глин

Образец, В	Изображение	Образец, В	Изображение
GG-1 0.664		GUK-2 0.505	
GG-2 0.160		GUK-3 0.162	
GG-3 0.267		GK-3 0.280	
UG-1 0.714		GK-5 0.332	
GUK-1 0.523		KK-2 0.049	
GG-4 0.339		KK-4 0.063	

В таблице 1 приняты обозначения границ: гипс–гипс GG; UG – углистые глины–гипс; GUK – гипс–кремень с видимыми прослойками углистых глин; GK – гипс–кремень; KK – кремень–кремень.

Получены значения коэффициентов трещиностойкости K_{Ic}, они представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения коэффициента трещиностойкости K_{Ic}

№	Образец	a0, мм	Fp, КН	KIc, МПа/м^0,5
1	GG-1	6,00	0,639	0,832
2	GG-2	3,00	0,985	0,995
3	GG-3	4,00	0,988	1,089
4	GG-4	4,00	0,817	0,901
5	UG-1	4,00	0,833	0,919
6	GUK-1	4,00	0,825	0,95
7	GUK-2	3,50	1,1	1,161
8	GUK-3	4,00	1,194	1,317
9	GK-3	6,00	1,147	1,495
10	GK-5	3,00	1,225	1,351
11	KK-1	2,00	–	–
12	KK-2	5,00	2,039	2,447
13	KK-3	6,10	–	–
14	KK-4	4,00	2,232	2,461

Было рассчитано уравнение регрессии K_{Ic} = 1.941 – 1.817B, где B – относительная площадь углистых глин в сечении (R = –0,714). Его график представлен на рис. 2.

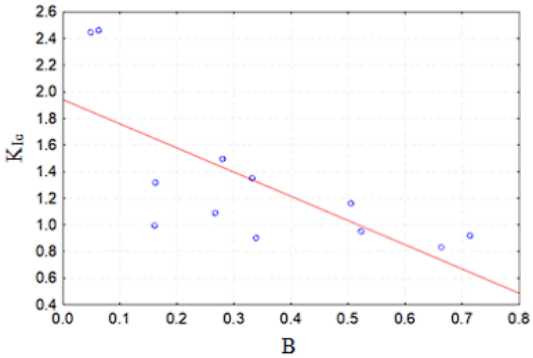


Рис. 2. Зависимость между коэффициентом трещиностойкости K_{Ic} и площадью углистых включений B

Выводы

1) Значения коэффициента трещиностойкости K_{Ic} лежат в пределах от 0,832 до 1,089 МПа√м для гипса и от 2,447 до 2,461 МПа√м для кремня.

2) Получено регрессионное уравнение связи между содержанием углистых глин и коэффициентов трещиностойкости границ между гипсом и кремнем.

Литература

1 Voznesenskii A.S., Osipov Yu.V., Ushakov E.I., Semyonov Ya.G., Vasilevykh V.V. Effect of weak inclusions on the fracture toughness of interfaces between various rocks // Engineering Failure Analysis 146 (2023) 107140. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107140.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИЕРАРХИЧЕСКИ-БЛОЧНОЙ ГЕОСРЕДЫ

М.А. Гузев

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Email:guzev@iam.dvo.ru

Рассмотрена проблема построения континуальной модели иерархически-блочной геосреды. Выделен базовый структурный элемент, обеспечивающий структуризацию геосреды и рассмотрен переход от иерархически-блочной к иерархически структурированной среде. Показано, что введение четырех структурных уровней достаточно для моделирования геосреды в пределах земной коры. Предлагается использовать неевклидову модель сплошной среды, учитывающая нарушения условий совместности деформаций, для описания трещиноватых структур. Указан алгоритм перехода к континуальному описанию таких структур и построены несингулярные решения для полей. Выполненный анализ показал, что данный подход приводит к необходимости использовать принцип иерархической неевклидовости и принцип монолитного блока.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-19-00447.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Email: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Предложена компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов (в том числе, горных пород), позволяющая исследовать эволюцию дефектной структуры (трещин) в процессе деформирования, основанная на методе дискретных элементов (DEM - Discrete element method [1]). Его преимущество перед традиционными континуальными методами расчета механических характеристик заключается в том, что он естественным образом учитывает несплошности материалов.

В работе была использована модель связанных частиц (bonded particle model – BPM [2]), различные модификации которой широко применяются для изучения поведения материалов при механическом разрушении. Материал представляется как совокупность сферических частиц (моделирующих зерна поликристалла), соединенных связями (моделирующими межзеренные границы) в местах контактов частиц. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а распространение - слиянием множества разорванных связей [3].

Моделировались образцы цилиндрической формы диаметром 10mm и высотой 20mm. Цилиндры заполнялись сферическими частицами одного или разных размеров и упаковывались до достижения пористости 0.35–0.37. В качестве материалов, из которых состояли сферические зерна и связи между ними (межзеренные границы), использовались материалы с механическими параметрами, соответствующими различным минералам и горным породам: гранит, кварц, ортоклаз, олигоклаз, стекло. Образец помещался в виртуальный пресс, в котором нижняя плита была неподвижна, а

верхняя перемещалась в направлении нижней с постоянной скоростью до тех пор, пока образец не разрушался.

Были проведены компьютерные эксперименты при различных параметрах материала (дисперсия зерен по механическим свойствам и размеру, различные свойства на границах зерен), с целью выявления их влияния на картину локальных напряжений, процесс образования дефектов и формирование очага разрушения. Модельные эксперименты выполнялись в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [4].

Расчет максимальных локальных напряжений показал, что гомогенность материала приводит к большей неоднородности локальных напряжений в пространстве, и наоборот, гетерогенность способствует большей их однородности. Подобное поведение локальных внутренних напряжений, рассчитанных на основании кинетической концепции С.Н. Журкова [5], наблюдалось в лабораторных экспериментах по деформированию цилиндрических (d=10mm, h=20mm) образцов гранита Westerly и песчаника Berea. [6]. Выбраны именно эти горные породы, поскольку песчаник Berea является более однородным материалом по сравнению с существенно гетерогенным гранитом Westerly.

Проведенный анализ распределений энергии сигналов акустической эмиссии по координате дает основания говорить о том, что более гетерогенному материалу присущ более однородный (многоочаговый) характер разрушения. Именно такую картину разрушения мы получили и в компьютерных экспериментах. Это говорит об адекватности построенной компьютерной модели.

Выполнен анализ фрактальной размерности центров разорванных связей («элементарных актов разрушения»), рассчитанной для последовательных выборок из 4096 событий. Такого рода выборки являются аналогом активности акустической эмиссии в натурных экспериментах. Изменение фрактальной размерности демонстрирует существенное уменьшение в момент образования очагов разрушения, что указывает на локализацию процесса.

Предложенная модель поликристаллических материалов реалистично описывает некоторые особенности их разрушения в тех случаях, когда основные процессы протекают по границам зерен. К таким особенностям относятся хрупкий характер разрушения гомогенных материалов и наличие пластичности для более гетерогенных, выявленные при помощи диаграммы напряжение–деформация, а также поведение во времени «акустической активности» – числа разорванных связей за единицу времени. Для гетерогенных материалов модель демонстрирует двухстадийный характер разрушения, когда на первой стадии происходит накопление дефектов однородно по образцу, а на второй стадии - формирование и рост очага разрушения.

1.P.A. Cundall. Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics, v.1, Nancy: France; Paper No. II-8 (1971)
2. D.O. Potyondy, P.A. Cundall. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41, 1329–1364 (2004)
3. A. Lisjak, G. Grasselli. J. of Rock Mech. and Geotechnical Engineering 6, 301 (2014)
4. M. Dosta, V. Skorych. SoftwareX 12, 100618 (2020)
5. S.N. Zhurkov. J. Fracture Mechanics 1, 311 (1965)
6. V.L. Hilarov, E.E. Damaskinskaya. Phys. Solid State, 63(6), p. 839 - 843 (2021)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕЗООБЪЕМОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИСКУССТВЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

М.О. Еремин[1], В.А. Зимина[1], А.С. Кульков[2], Ю.П. Стефанов[1]

[1] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск
[2] Независимый инженер

E-mail: eremin@ispms.ru

Алмазным диском из образца песчано-цементной смеси было вырезано 10 образцов в виде параллелограмма. Лабораторное нагружение образцов производилось на универсальной испытательной машине Instron 1185 в режиме контроля деформации со скоростью нагружения 0.05 мм/мин. Продольная деформация регистрируется с помощью встроенного программного обеспечения Instron, а поперечная деформация одновременно регистрируется датчиком, установленным вокруг образца.

Полученные полные диаграммы деформации шести образцов показаны на рис. 1а. Остальные образцы были отбракованы.

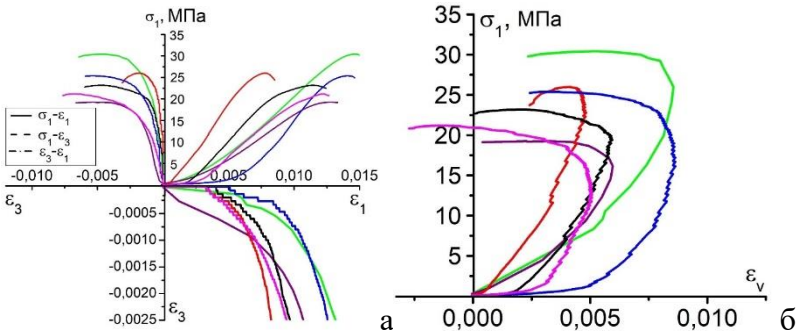


Рис. 1. Полная диаграмма деформирования нагруженных образцов: (а) зависимость $\sigma_1 - \varepsilon_1$, $\sigma_1 - \varepsilon_3$ и $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$; (б) зависимость $\sigma_1 - \varepsilon_V$.

Экспериментальные данные используются для валидации параметров модели. Более подробно постановка задачи моделирования деформации и разрушения образцов песчано-цементной смеси, а также детали математической модели представлены в работе [1].

Основной интерес представляют стадии деформации образцов, так как они определяются пороговыми напряжениями зарождения трещин, неустойчивого трещинообразования и пикового напряжения на диаграмме нагружения. Рисунок 2 иллюстрирует кривую напряжение-деформация нагруженного образца, совмещенную с импульсами АЭ. Серая кривая представляет собой общее накопленное количество импульсов, а красная кривая представляет приращение смоделированных импульсов АЭ.

Кривая напряжение-деформация, полученная посредством численного моделирования и смоделированные первые импульсы АЭ свидетельствуют об отклонении от линейности, когда уровень осевого напряжения, усредненного по мезообъему, достигает ≈12 МПа, что составляет ≈57% пикового напряжения σ_p. На рис. 3 показаны закономерности накопления повреждений в последовательные моменты времени а–г.

Результаты численного моделирования показывают, что мы не можем определить точное значение напряжения неустойчивого трещинообразования по диаграмме импульсов АЭ. На рис. 4 показана полная диаграмма деформирования, полученная с

помощью численного моделирования, которая использовалась для определения порогового напряжения неустойчивого трещинообразования. При изменении знака производной функции $\Delta V/V(\varepsilon_1)$ уровень осевого напряжения составляет ≈22 МПа, что составляет 0.89 от σ_p и хорошо соответствует экспериментальным данным, полученным в настоящей работе.

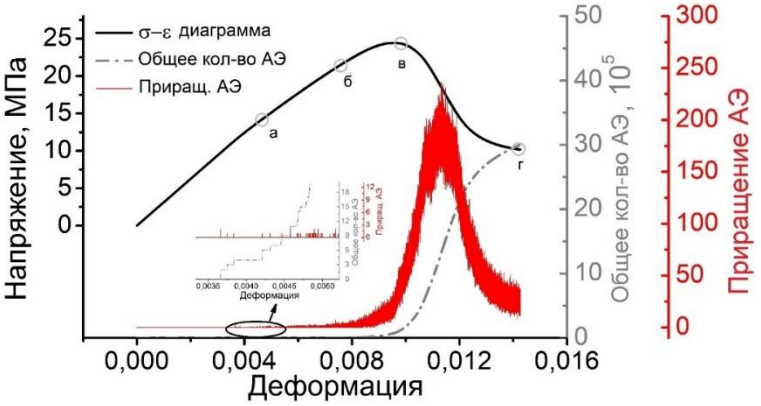


Рисунок 2. Диаграмма деформирования, совмещенная с моделируемыми импульсами акустической эмиссии.

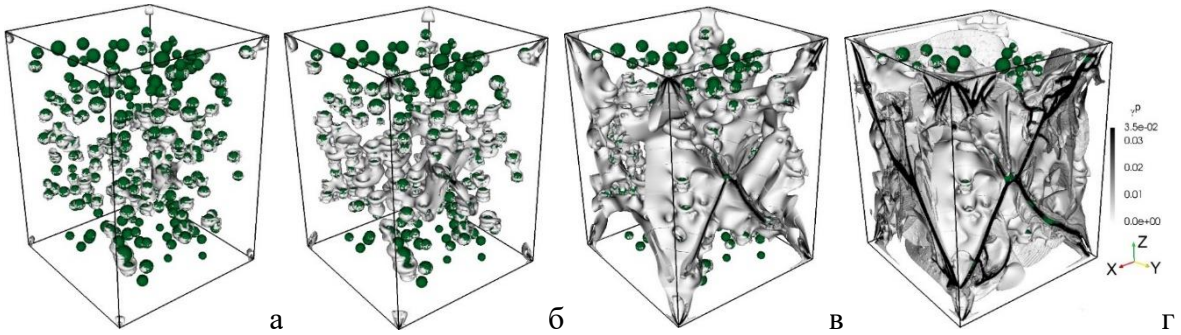


Рисунок 3. Стадии накопления неупругих. Накопленные повреждения представлены в объеме образца (серый и черный цвета) и сочетаются с пористой структурой (поры показаны темно-зеленым цветом).

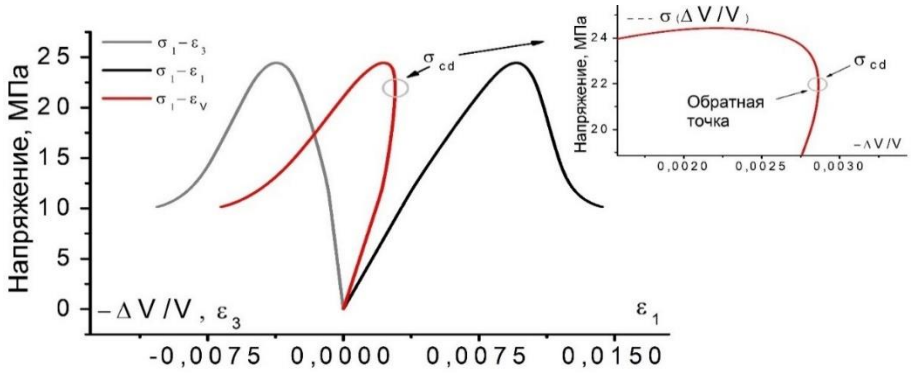


Рисунок 4. Полная диаграмма деформирования мезообъемов, полученная численным моделированием.

Работы выполнена при поддержке проекта РНФ №21-71-10079.

1. M.O. Eremin, V.A. Zimina, A.S. Kulkov, Y.P. Stefanov Microstructure-Based Computational Analysis of Deformation Stages of Rock-like Sandy-Cement Samples in Uniaxial Compression, Materials 16, pp. 1 – 24 (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ

А.М. Кучуков, В.Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Email: artur.kuchukov.59@mail.ru

В работе рассматривается напряженно-деформированное состояние горной породы в окрестности арочной выработки. Актуальность работы связана с проведением большого количества подземных работ, связанных с риском для жизни людей.

С целью изучения механического поведения целика была рассмотрена задача деформирования горной породы в окрестности арочной выработки. За материал были приняты упругие характеристики каменной соли. Проведено исследование влияния краевых эффектов на поля напряжений и деформаций. Рассмотрена сходимость численного решения. Исследовано напряженно-деформированное состояние неоднородной горной породы в окрестности выработки. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

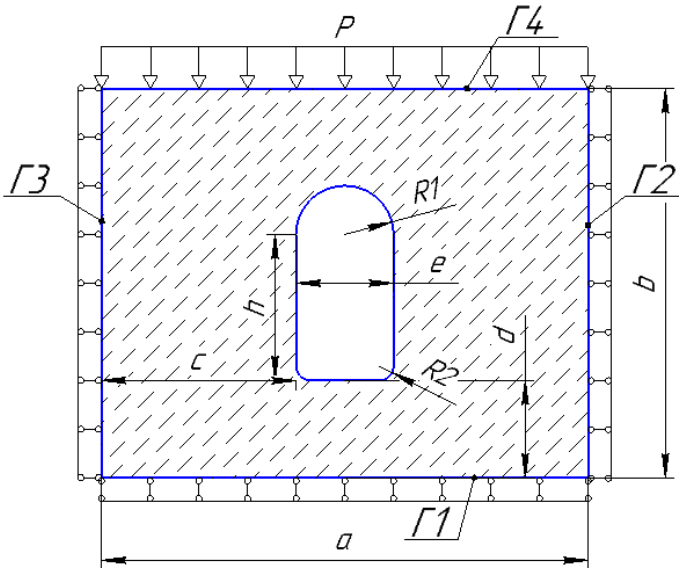


Рис 1. Расчетная схема

Далее в расчет была заложена модель, которая описывает поведение каменной соли при одноосном сжатии [1]. Учет закритической стадии позволяет выявить дополнительные прочностные и деформационные резервы [2]. В результате моделирования были получены следующие поля пластических деформаций (рис. 2).

$$\sigma = a + b\varepsilon \tag{1}$$

где

$$a = \begin{cases} 0 \\ \sigma_c\left(1 + \dfrac{M}{E}\right), \\ \sigma_* \end{cases} \tag{2}$$

$$b = \begin{cases} E, \text{ при } 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_c \\ -M, \text{ при } \varepsilon_c \le \varepsilon \le \varepsilon_* \\ 0, \text{ при } \varepsilon_* \le \varepsilon \end{cases}$$

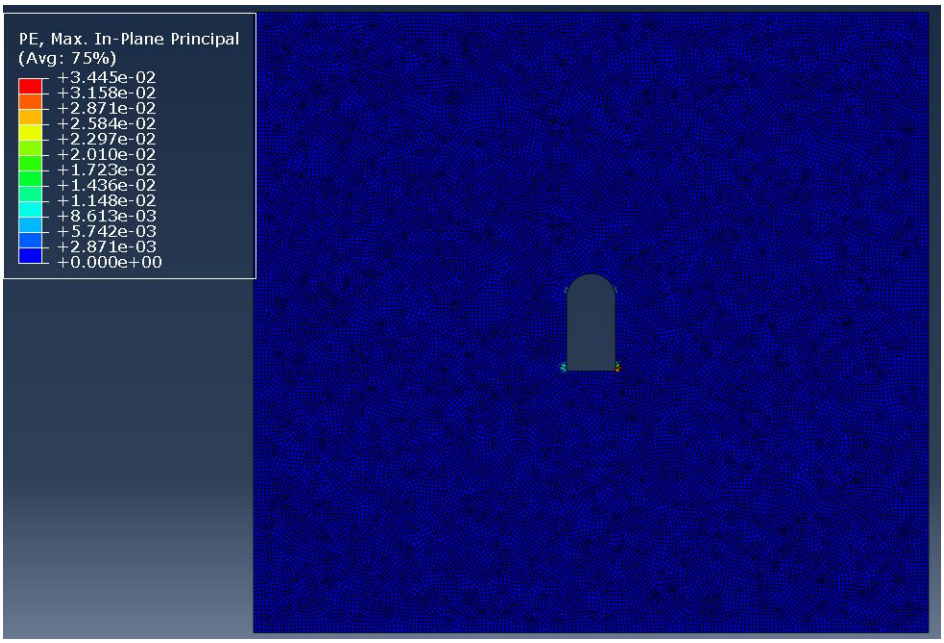


Рис 2. Поля полученных пластических деформаций

Пластические деформации сосредоточены в области скругленных углов выработки.

Для моделирования процесса разрушения горной породы был разработан алгоритм, который включает в себя редуцирование жесткости одного конечного элемента за цикл нагружения и пересчет НДС при неизменных граничных условиях. В результате работы алгоритма была получена следующая картина разрушения (рис.3).

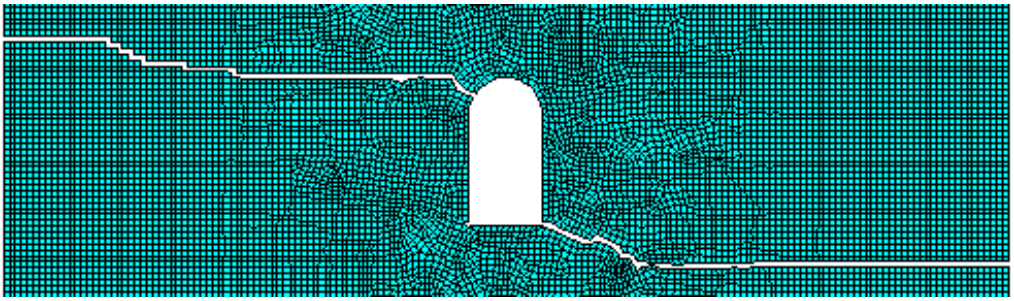


Рис.3. Картина разрушения горной породы

Инициирование трещины произошло в скругленных углах выработки.

1. Барях А.А. Деформирование соляных пород / А.А. Барях, С.А. Константинова, В.А. Асанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 203 с.

2. Вильдеман В.Э., Ильиных А.В. Моделирование процессов структурного разрушения и масштабных эффектов разупрочнения на закритической стадии деформирования неоднородных сред // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10. – № 4. – С. 23-29.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00765) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО И ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА УЧАСТКАХ ВКМКС

О.О. Лебедева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра Маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем

Email: lebedeva@pstu.ru

Для защиты рудников от затопления отработка шахтных полей осуществляется гидроизолированными участками с поддержанием налегающей толщи пород и охраной участков путём оставления предохранительных целиков. Состояние междушахтного целика главным образом определяет безопасность ведения горных работ на примыкающих участках, в данном случае, на смежных шахтных полях.

Учёт всех факторов и анализ состояния междушахтных целиков и массива горных пород над ними является нетривиальной задачей с точки зрения геомеханического моделирования. Важно отметить, что состояние массива горных пород в вышележащих слоях определяется деформационными процессами на уровне промышленных горизонтов.

Для понимания и анализа происходящих природных процессов в массиве горных пород на участках ВКМКС, обусловленных техногенным воздействием, применяется эффективный метод выделения ослабленных зон в ВЗТ, основанный на комбинированном использовании геомеханических и геофизических подходов. Суть метода заключается в получении корреляционных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами, корректировании полученных зависимостей по результатам геофизических исследований скважин, получении на основании обработки данных сейсмики 2D и 3D распределения скорости продольной волны и акустического импеданса и, наконец, выделении в массиве ВЗТ и калийных пластах зон с различной степенью уплотнения. Фактически возникает возможность получить в любой точке массива горных пород распределенные значения таких геомеханических параметров, как прочность на одноосное сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона и ряд других [1-3].

Последующее решение задачи геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ предполагает использование уже конкретных значений физико-механических свойств пород, слагающих массив, которые закладываются в геолого-геомеханическую модель.

1. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Шустов Д.В., Лебедева О.О. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей [Текст] // Маркшейдерский вестник. – 2019. – №1(128). – С. 39-45.

2. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Издательство «Горная книга», 2019. – 496 с.

3. Лебедева О.О. Моделирование оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей на основе геолого-геомеханической модели // Известие вузов. Горный журнал. №6, 2022. – С 104-113.

ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ И ИЗГИБЕ

М.Е. Меженов[1,2], А.А. Куклина[1,2], Д.В. Зайцев[1,2], П.Е. Панфилов[2]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург
[2] Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург

Email: *zaytsev@m.ursmu.ru*

Одной из частей процесса изучения прочностных свойств горных пород является изучение влияния воды на механические характеристики [1]. Важно определить не только то, как меняется деформационное поведение горных пород в водонасыщенном состоянии, но и то, когда воды в материале становится меньше (высушивание в печи). Детальное изучение прочностных свойств горных пород на разных масштабах возможно при использовании малогабаритных лабораторных образцов [2]. Влияние воды на прочностные свойства можно объяснить в рамках эффекта Ребиндера, который описывает механизм пластификации материалов при контакте с атомами внешней среды, находящейся в жидком состоянии [3]. Целью данной работы является изучение влияния водной среды и нагрева на прочностные свойства и разрушение горных пород.

В качестве материалов для исследований были выбраны сиенит и серый гранит. Образцы испытывались по схемам 3-х точечного изгиба и одноосного сжатия. Образцы для механических испытаний изготавливали из массивных частей материала следующим образом: при помощи отрезного станка вырезались бруски длиной 100 мм, шириной 10 мм и толщиной 6 мм, тогда как для испытаний на сжатие в виде кубоида с длинами сторон 8x8x13 мм. Было испытано по 15 образцов для каждой схемы нагружения: 5 образцов на воздухе, 5 в водонасыщенном состоянии и 5 после выдержки в печи при температуре 150^0C в течение 40 минут. Механические испытания по схеме 3-х точечного изгиба на воздухе, в воде и после сушки проводили при помощи испытательной машины Shimadzu AG-S 2KN (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин). Испытания по схеме одноосного сжатия проводили при помощи испытательной машины Shimadzu AG-X 50KN. Обработку результатов выполняли с помощью пакета программ Trapezium™. Характер роста трещин в материалах изучали на оптическом микроскопе. На электронном микроскопе были изучены изломы, возникшие после испытаний по схеме изгиба.

Полученные результаты показывают, как зависят прочностные свойства горных пород от водонасыщения. Первое, изменение типа деформационного поведения при выдержке в воде и после нагрева не происходит. Тип деформационного поведения горных пород на макроскопическом масштабе определяется уровнем растягивающих напряжений в схеме нагружения и меняется от хрупкого при изгибе до упруго-пластичного при одноосном сжатии. Второе, при изгибе и сжатии в воде наблюдается снижение предела прочности и значения упругого модуля. В случае с сиенитом: снижение предела прочности и упругого модуля с 9 до 6 МПа и с 5,5 до 4 ГПа при изгибе соответственно, при сжатии с 110 до 65 МПа и с 8,5 до 5,5 ГПа. При исследовании гранита: снижение предела прочности и упругого модуля с 13 до 11,5 МПа и с 11 до 9 ГПа при изгибе соответственно, при сжатии с 160 до 110 МПа и с 12,7 до 10 ГПа. Напротив, после сушки в печи данные значения растут.

На рисунке 1 приведены результаты исследования развития трещин в образцах из сиенита и серого гранита при изгибе на воздухе, в воде и после нагрева. Во всех случаях трещины росли в области приложения нагрузки, распространялись от одного края

образца до другого и имели сложный ломанный профиль. Также необходимо отметить, что после испытаний образцы не распадались на части, что не характерно для хрупких материалов. Данные особенности характерны для трещин в вязкоупругих материалах [4].

Рисунок 1. Развитие трещин в лабораторных образцах при изгибе: а – сиенит; б – серый гранит.

Механизм влияния воды на поведение горных пород можно объяснить в рамках эффекта Ребиндера, а именно пластификации материала в области трещины, где под влиянием атомов внешней среды протекание процессов аккомодации напряжений резко ускоряется, но смены типа деформационного поведения не происходит [3]. Исследование деформационного поведения малогабаритных лабораторных образцов горных пород позволило детально описать процесс аккомодации напряжений на макро- и микро- масштабах в сиените и сером грание, включая развитие трещин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-29-00268.

1 Hudson J. A., Harrison J. P. Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles, Amsterdam, Pergamon, 2000, 456 p.
2. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 5–13. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_5.
3. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. С. 203.
4. Hamza O., Stace R. Creep properties of intact and fractured muddy siltstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, V. 106. P. 109-116 (2018)

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ СО СТРУКТУРОЙ ПИРРОТИНА, КАК ИНДИКАТОР ИХ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СОСТАВА

С.Н. Мозговых[1], Н.В. Селезнева[1], Н.В. Баранов[1, 2]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ИЕНиМ, г. Екатеринбург, Россия
[2] Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

E-mail: Stepan.Mozgovykh@urfu.ru

Соединение Fe_7Se_8 изоструктурно природному минералу пирротину Fe_7S_8. В связи с особенностями магнитных обменов в Fe_7Se_8 наблюдается ферримагнитное упорядочение с точкой Кюри порядка 450 К. При понижении температуры до 110 К в

соединении наблюдается спин-переориентационный переход, природа которого до сих пор не выяснена. В зависимости от характера распределения вакансий этот переход может осуществляться как путём фазового перехода первого рода, так и путём фазового перехода второго рода. С одной стороны, исследование природы спиновой-переориентации необходимо для создания более полной теории спин-переориентационных явлений. С другой стороны, возможно использование спиновой переориентации, например, в геологии для аттестации руд. Так, в пирротине Fe_7S_8 наличие или отсутствие низкотемпературного перехода может служить индикатором реализации того или иного сверхструктурного упорядочения.

В данной работе были получены монокристаллы $Fe_{7\pm\delta}Se_8$ ($-0.25<\delta<0.05$) и исследованы их структурные и магнитные свойства для выявления качественных закономерностей при изменении состава.

Монокристаллы были получены модифицированным методом Бриджмена в двойных кварцевых ампулах, ориентировка проводилась методом Лауэ. Химический состав уточнялся с помощью сканирующего электронного микроскопа Auriga (Carl Zeiss, Германия) с рентгеновским детектором X-Max (Oxford, Великобритания). Для анализа наличия посторонних включений или зёрен разного состава проводилась металлографическая микроскопия на шлифах с разными способами освещения. Металлография проводилась на микроскопе МИМ-7 в диапазонах увеличения от 50 до 650 крат. Магнитные свойства в температурном интервале от 80 до 550 К в полях до 17 kOe изучались на вибромагнитометре VSM 7407 (Lake Shore, USA). Измерения в температурной области от 4 до 350 К проводились на СКВИД-магнетометре MPMS (Quantum Design) в диапазоне полей до 70 kOe.

Соединение Fe_7Se_8 кристаллизуется в гексагональной сингонии (пространственная группа $P3_121$) с упорядочением вакансий 3C относительно базовой ячейки NiAs, параметры решётки: $a = b = 7.231(1)$ Å, $c = 17.585(3)$ Å находятся в хорошем согласии с литературными данными [2, 3]. Установлено, что при малых отклонениях от стехиометрии ($|\delta| \leq 0.15$) соединения изоструктурны исходному Fe_7Se_8, изменение параметров не превышает 1%. Состав $Fe_{6.75}Se_8$ не обладает сверхструктурными упорядочениями. Наблюдается немонотонное изменение объёма элементарной ячейки при изменении концентрации атомов железа. Обнаружено, что температура магнитного упорядочения слабо зависит от отклонения от стехиометрии и составляет $T_c \sim 450$ K для всех соединений. Показано, что при любом отклонении от стехиометрии изменяется не только температура спиновой переориентации, но и её характер, что возможно связано с изменением локального беспорядка и может быть использована как индикатор особенностей структуры и химического состава.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00158).

1. W.R.M. Volk1, E. McCalla, B. Voigt, M. Manno, C. Leighton and J.M. Feinberg, American Mineralogist, v. 103 p. 1674–1689 (2018).
2. A.F. Andersen, J. Leciejewicz, Le Journal de Physique, v. 25 p. 574 – 578 (1964).
3. Y. Konopelnyk et al, J. Magn. Magn, v. 543. p. 168626 (2022).

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА НА ГЕТЕРОГЕННОМ КОНТАКТЕ БЛОКОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

А.А. Остапчук, К.Г.Морозова, Д.В. Павлов, Г.А. Гридин

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва

E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Многие деформационные процессы в массиве горных пород представляют собой динамический разрыв или скольжение по уже сформированным разломам, трещинам и литологическим границам. К событиям подобного рода относятся как тектонические землетрясения, так и обрушение склонов, и горно-тектонические удары [1]. При сдвиге деформационный процесс сильно локализована и на контакте блоков горных пород выделяются локальные зоны взаимодействия неровностей поверхностей блоков – асперити [2]. В зависимости от структурных и фрикционных свойств асперити могут быть реализованы как быстрые, так и медленные деформационные события. Задача поиска физических механизмов, определяющих закономерности формирования различных типов событий и объясняющих нелинейные процессы эволюции на разных масштабных уровнях, в настоящее время до конца не решена.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию процесса развития динамического разрыва на контакте блоков скальных пород, содержащей области повышенной прочности со свойством скоростного разупрочнения – асперити. Реализована упрощенная модель эволюции деформационного процесса, поэтому лабораторные эксперименты стоит рассматривать не как форму масштабного моделирования, а как исследование отдельных составляющих процессов, гипотетически происходящих в природе.

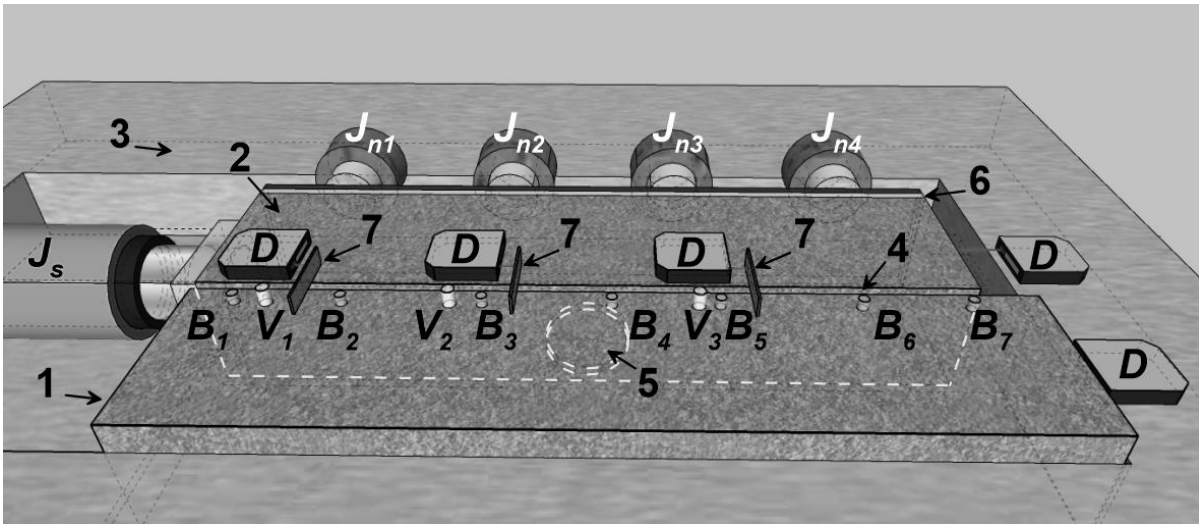


Рис. 1. Схема установки «RAMA» в эксперименте с одним асперити.
1, 2 – неподвижный и подвижный блоки; 3 – стальная рама; 4 – слой фторопласта; 5 – асперити; 6 – интерфейс низкого трения; 7 – мишени датчиков перемещения; Jn, Js – домкраты, создающие нормальное и сдвиговое усилие; D – лазерные датчики перемещения; B – акселерометры (< 10 кГц); V – датчики АЭ (20-80 кГц).

Экспериментальный стенд представляет собой установку двухосного нагружения, состоящую из стальной несущей рамы, гидравлической системы нагружения и двух контактирующих блоков. Нормальные напряжения на контакте блоков могут достигать 10 МПа, а минимальная скорость сдвигового нагружения – 0.1 мкм/с. На контакте блоков были сформированы 1, 2 или 3 асперити, представляющие собой области круглой формы, выполненные из песчано-цементной смеси и имеющие прочный контакт с поверхностями блоков. Расстояние между асперити варьировалось. Схема установки представлена на рис. 1.

Наличие асперити обуславливает особенности накопления межблоковых перемещений. В окрестности асперити смещение берегов происходит с существенно более низкой скоростью, чем до и после него – формируется «запертый участок», на котором накапливается дефицит сдвиговых перемещений. На заключительном этапе (стадия предразрушения) скорость смещения в окрестности асперити начинает резко возрастать. К этому времени дефицит перемещений достигает максимума. В экспериментах с несколькими асперити, отчетливо проявляются особенности, связанные с их взаимодействием и последовательным разрушением. При реализации быстрых динамических разрывов, которые стартуют в зоне максимального дефицита межблокового смещения, происходит разрыв тех областей разлома, эффективная прочность которых снижена предыдущими деформационными событиями. При этом эти, более ранние, события могут быть «медленными» подвижками. При быстрых событиях упругие колебания излучаются в частотном диапазоне от 100 Гц до 10 кГц, в то время как при медленных упругие колебания излучаются только в частотной области более 20кГц.

1. Г.Г.Кочарян, Физика Земли, № 4, с. 3–41 (2021).
2. H. Kanamori, G.S. Stewart, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 83, no.B7, p.3427–3434 (1978).

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА ПО СРАВНЕНИЮ С ТРЕЩИНАМИ В МЕТАЛЛАХ

П.Е. Панфилов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

E-mail: peter.panfilov@urfu.ru

Трещины - почти идеальные объекты для экспериментального изучения процесса разрушения материалов, так как (1) их можно наблюдать в широком диапазоне масштабов от решеточного до мегаскопического; (2) они возникают во всех твердых телах независимо от природы межатомных связей и типа деформационного поведения. При этом математические модели трещин корректно работают только в случае хрупкого недеформируемого твердого тела. Поэтому задача анализа морфологии трещин в материалах разной природы и генезиса, в частности в горных породах, а именно, сравнение с трещинами в хрупких и вязких твердых телах, представляется актуальной как для материаловедения, так и механики.

Горные породы – недеформируемые материалы, демонстрирующие на макроскопическом уровне хрупкое поведение, чья морфология поверхности изломов сводится к комбинации внутри и межзеренного хрупкого разрушения. Изучена морфология трещин на микроскопическом масштабе в магматических, осадочных

горных породах и некоторых биоминералах, возникших под действием растягивающих нагрузок, включая взрыв. Сравнение проводили с трещинами в металлах, разрушающихся внутризеренным сколом (иридии и покрытом галлием алюминии) и в ковалентных кристаллах, принятых за эталон хрупкого разрушения.

Показано, что опасные трещины в граните, серпентините, антраците, песчанике и яичной скорлупе, независимо от схемы нагружения, состоят из слившихся порообразных трещин, как это имеет место в металлах. В ряде случаев такие трещины удается подращивать. Это указывает на наличие в данных горных породах дополнительного канала аккомодации упругой энергии, а именно деформации. В яшме и некоторых минералах трещины, возникшие при взрыве, оказались по морфологии близки к трещинам в хрупких ковалентных кристаллах. Можно предположить, что в этом случае разрушение является доминирующим каналом аккомодации упругой энергии.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-29-00253)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.Ю. Радзивилов, А.С. Юдин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Email: evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Существует множество достоинств электроразрядных технологий, таких как отсутствие выделения вредных веществ, разрушительных акустических и сейсмических ударных волн, наличие контроля над процессом вложения энергии давно привлекают внимание специалистов строительной индустрии [1, 2]. В последнее время этот интерес заметно усилился из-за резкого обострения экологических проблем и усиления внимания к разработке новых экологически чистых технологий. По этим причинам работы по использованию электроразрядных технологий ведутся сейчас рядом крупных лабораторий США и других развитых стран [3].

Электроразрядные технологии также нашли широкое применение в технологиях очистки и обеззараживания воды [4, 5], угнетения радиации, ремонта судов [6], борьбы с оползнями [7], в медицине для дробления почечных камней [8], в сельском хозяйстве для подготовки зерна и удобрений [9, 10] и во многих других отраслях.

В горном деле технико-экономические показатели определяются, прежде всего, эффективностью процесса разрушения пород. С переходом горных работ на большие глубины, как при подземной добычи полезных ископаемых, так и при открытой разработке, заметно увеличиваются прочностные характеристики природной среды, а проблема ее разрушения становится еще более актуальной [11].

Исследования показывают высокую эффективность применения электроразрядных технологий для разрушения крепких горных пород. Тем не менее внедрение в промышленное использование сдерживается несовершенством технических решений доступных в лабораторных условиях, а именно низкой надежностью оборудования, в частности изоляции. В этой связи необходимо уделять внимание электродной системе, для решения таких проблем, как: срок эксплуатации, улучшение эксплуатационных характеристик электроразрядных технологий, улучшение условий развития электрического разряда и других.

Наиболее предпочтительно в качестве высоковольтной изоляции электродов использовать различные варианты керамических покрытий в связи с их оптимальной по сравнению со стеклом и кварцем величиной диэлектрической проницаемости и одновременно высокой устойчивостью по отношению к химическим реакциям. Оксид алюминия (Al2O3) является наиболее широко используемым материалом в семействе керамических изделий. Он изготовлен из доступного сырья и относительно дешев, что дает хорошие возможности для его промышленного применения [12]. Однако надежной технологии нанесения достаточно толстых слоев керамики на металлические криволинейные поверхности сейчас нет.

Компромиссным решением в данной ситуации может быть использование полисилоксановых композиций и эластомерных материалов с возможностью изменять диэлектрическую проницаемость [13], поскольку такую изоляцию намного легче нанести на электроды.

Разработка новых конфигураций электродов с покрытием изоляцией максимально возможной площади нерабочих поверхностей электродов позволит повысить импеданс всей электродной системы, что даст возможность использовать техническую воду, например, в технологии бурения. Применение диэлектрической вставки улучшит условия развития электрического разряда с конца электрода, что повысит вероятность его внедрения в горную породу. Применение новых изоляционных материалов и их комбинации приведет к увеличению времени эксплуатации оборудования. В целом предлагаемые подходы нацелены на улучшение эксплуатационных характеристик электроразрядных технологий для дальнейшего их применения как в области геологии, строительства, добычи природных ресурсов, так и в лабораторных условиях.

1. Блазин Б.С. «Обработка природного камня электрическими разрядами» / Б.С. Блазин,И.А. Щеголев, Л.И. Лозин // Электрон. обраб. материалов. - 1983. - № 1(109). - С. 5-7.

2. Плотников И. «Разрушение бетона и железобетона при разрушении промышленных предприятий» / И. Плотников, Д. Александров // «Строительство металлургических и химических предприятий». – М. : ЦБНТМ. –1981. – Сер. 1. – Вып. 1. – С.6-8.

3. Еремин В.Я. «Разрядно-импульсные технологии на стройках России» / В.Я. Еремин //Стройклуб. – 2002. – № 1-2 (9-10). – С. 11-15.

4. Жук Е.Г. «Бактерицидные факторы импульсного электрического разряда при обеззараживании воды» / Е.Г. Жук // Электрон. обраб. материалов. – 1978. – № 4. – С. 80-83.

5. Перевязкина Е.Н. «Природа обеззараживающего действия импульсного электрического разряда в воде» / Е.Н. Перевязкина, Н.Д. Рязанов // «Электроимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах» : Тез. Всес. науч. совещания. – Томск, 1982.– С.98-99.

6. Гаврилов Г.Н. «Использование электрогидравлического эффекта в судоремонте» /Г.Н.Гаврилов, В.В. Петухов, Н.М. Ромащенко // «Судоремонт флота рыбной промышленности». 1984. – Вып. 56. – С.32-34.

7. Патент Украины № 37412А, МКИ E02D 27/26. «Способ борьбы с оползнями» /Б.М. Рогачевський, С.Ю. Макеев, В.И. Емельяненко, С.И. Зигало. – № 98095092; заявл.29.09.1998; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4 (ч. II). – 6 с.

8. «Методы удаления почечных камней» // БИНТИ ТАСС. – 1984. – № 15(2156). – С. 55.

9. Писаревский В.Н. «Электроимпульсное стимулирование семян кукурузы» / В.Н. Писаревский, В.Н. Пономаренко, А.А. Залевский // Электрон. обраб. материалов. – 1985. – № 4(124). –С. 68-69.

10. А.с.477151 СССР, МКИ C02G 1/00. «Способ электрогидравлического получения удобрений» / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1983. – № 1. – С. 272.

11. С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, В.И. Емельяненко – «Экологически чистые электроразрядные методы разрушения горных пород». [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/324569541_The_ecologically_clean_electricdischarged_methods_of_rock_destruction_Ekologiceski_cistye_elektrorazradnye_metody_razrusenia_gornyh_porod.

12. С. Гасанова – «Электрические разряды в водной фазе: генерация, исследование и применение для очистки воды от органики». [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://d-nb.info/1045839418/34.

13. А.Н. Тарасенков – «Полисилоксановые композиции и эластомерные материалы с высокой диэлектрической проницаемостью на их основе». [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2767650C1_20220318.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РАЗЛОМОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АНАТОЛИИ ПО СТЕПЕНИ ИХ ОПАСНОСТИ

Ю.Л.Ребецкий

ИФЗ РАН, г. Москва

Email: reb@ifz.ru

Современные представления на обеспечение безопасного проведения горных работ помимо изучения упругих и прочностных свойств пород (геотехника и геомеханика) требуют знания напряженного состояния породного массива, а также возможности выделения в шахтном поле или карьере опасных разрывов. В докладе будет показано, как эти задачи решаются в тектонофизике при оценке сейсмических и геологических опасностей коровых разломов на примере Газиантепского землетрясения, произошедшего на юго-востоке Турции 06.02.2023 (*Mw* = 7.8). Напряженное состояние коры этой территории было получено по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений на основе катакластического метода Ю.Л.Ребецкого, позволяющего определить не только ориентацию осей главных напряжений и форму эллипсоида напряжений, но также получить данные о максимальных касательных напряжениях и эффективном давлении, нормированных на прочность сцепления. На основе этих данных имеется возможность оценивать опасность разломов расчитав кулоновы напряжения на плоскостях отдельных участков разломов, для которых геологическими, геофизическими или сейсмологическими методами получены данные о направлении и угле их погружения. Исследования опасных разломов юго-восточной Турции были проведены сразу после Газиантепского землетрясения. Для реконструкции природных напряжений были использованы глобальные и региональные каталоги механизмов очагов землетрясений (Global CMT, ISC, ESMC и др.), которые произошли до февраля 2023 года. Для расчета кулоновых напряжений была использована база данных активных разломов Евразии (http://neotec.ginras.ru/database.html).

Реконструкция напряжений по этим данным выполнялась с помощью программы STRESSseism, алгоритм которой основан на методе катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 1999, 2003]. По результатам расчетов были получены данные об ориентации главных осей тензора напряжений (рис. 1а), значении коэффициента Лоде-Надаи, определяющем форму эллипсоида напряжений, а также о максимальных касательных напряжениях τ и эффективном всестороннем давлении p^*, нормированных на прочность сцепления массива τ_f. В представляемой работе данные о напряжениях в коре исследуемого региона являются исходными для расчета кулоновых напряжений τ_{C}, которые согласно геомеханическим критериям хрупкого разрушения горных пород отвечают за близость разломов к критическому состоянию:

$$\tau_{\mathrm{C}} = \tau_{\mathrm{n}} + k_f \sigma_{nn}^* \leq \tau_{\mathrm{f}}, \quad \sigma_{nn}^* = \sigma_{nn} + p_{fl} < 0 \,. \qquad (1)$$

Здесь τ_{n} и σ_{nn}^* соответственно касательное и эффективное нормальное напряжения (на участке разлома, p_{fl} – давление флюида в трещинно-поровом пространстве породы, а τ_{f} и k_f соответственно прочность сцепления и коэффициент трения, определяющие хрупкую прочность разлома. Нормальные напряжения являются положительными для растяжения, так как это принято в континуальной механике среды.

Районирование разломов по степени их опасности выполнялось путем разбиения положительных значений кулоновых напряжений на четыре диапазона: 1) $0.7 < \frac{\tau_{\mathrm{C}}}{\tau_{\mathrm{f}}} \leq 1$; 2) $0.4 < \frac{\tau_{\mathrm{C}}}{\tau_{\mathrm{f}}} \leq 7$; 3) $0.1 < \frac{\tau_{\mathrm{C}}}{\tau_{\mathrm{f}}} \leq 0.4$; 4) $-0.2 < \frac{\tau_{\mathrm{C}}}{\tau_{\mathrm{f}}} \leq 0.1$, которые нами именуются как высшей опасности, опасный, тревожный и нейтральный. Как видно из рисунка 1б большая часть разломов (более 75%), для которых имеются данные о напряжениях, находятся в

безопасном состоянии. При этом для юго-западного сегмента Восточно Анатолийского разлома (ВАР) и его ответвлений в северном побережье Восточного Средиземноморья и Сирии соотношение опасных и безопасных разломов приближается к 1:1.

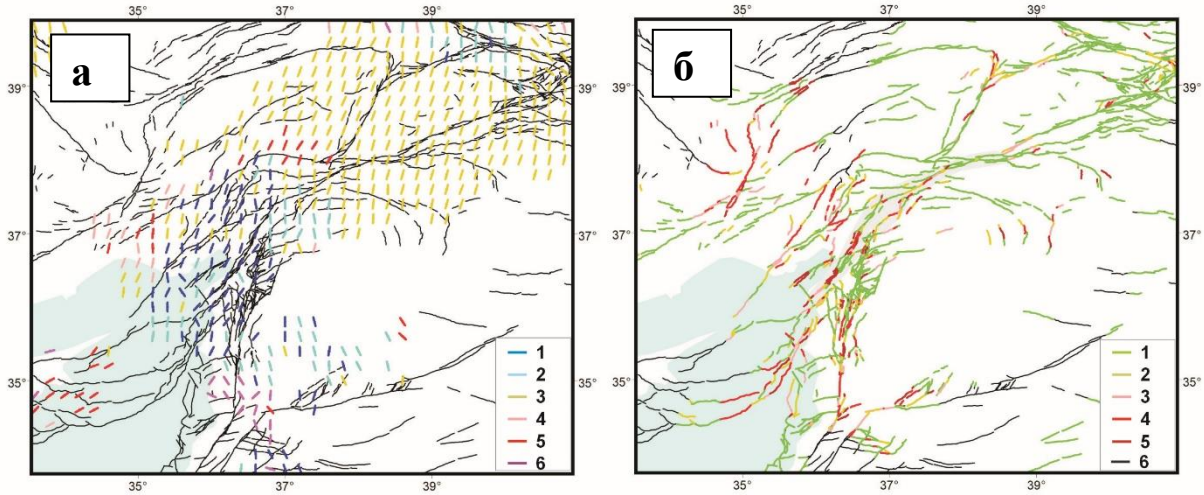


Рис. 1. *Параметры напряженного состояния коры Восточной Анатолии: а) Ориентация осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия и геодинамический тип напряженного состояния (1 – гор. растяжение, 2 – транстенсия, 3 – гор. сдвиг, 4 – транспрессия, 5 – гор. сжатие, 6 – верт. сдвиг); б) Районирование для двух стадий расчета напряженного состояния участков активных разломов по уровню кулоновых напряжений (1 – безопасный, 2 – тревожный, 3 – начальная опасность, 4 – опасный, 5 – высшая опасность, 6 – участки разломов, для которых отсутствовали данные о напряжениях) Светло-серым цветом выделена зона очага Газиантепского катастрофического землетрясения Mw=7.8. Показано положение разломов согласно базе данных активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017]*

Расположения очага Газиантепского землетрясения хорошо согласуется с данными о положении опасных участков разломов ВАР. Отметим также, что эпицентр этого землетрясения был расположен на боковой ветви к юго-востоку от ВАР (Османский и Туркоглы). При этом эти ветви ВАР являлись крайне опасными в результатах районирования по кулоновым напряжениям. Результаты анализ сотрясаемости поверхности (neic) показывает, что юго-западный сегмент его очага, выглядевший более опасным в кулоновых напряжений, также имеет большую интенсивность. Афрешоковая последовательность этого землетрясения охватила более широкий спектр разломов, выйдя на севере далеко за пределы его очага (разлом Елбистан). Согласно данным о распределении кулоновых напряжений можно ожидать повышенного уровня сейсмичности на левандийской ветви ВАР, где в южной части (разлом Мертвого моря) может произойти достаточно сильное землетрясения. Также имеются разломы с опасным уровнем кулоновых напряжений к западу от очага Газиантепского землетрясения. К ним относятся группы разломов Есеми, Каусери и Гоксун, Мисис.

1. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711-736.
2. Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Доклады РАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392-395
3. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. 2003. Т 400, № 3. С. 237-241

ПАСПОРТ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ОПИСАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

С.Н. Тагильцев

Уральский государственный горный университет

Email: tagiltsev@k66.ru

Скальные массивы в большинстве регионов находятся в геодинамическом напряженно-деформированном состоянии (НДС) [1-3]. Отличительная особенность этого состояния заключается в том, что в приповерхностной части литосферы главное максимальное сжимающее напряжение (σ_1) ориентировано горизонтально, а минимальное напряжение (σ_3), в пределах определенного приповерхностного слоя, имеет вертикальную ориентировку. Рассматривая закономерности напряженно-деформированного состояния скальных массивов, очень важно установить количественные зависимости, описывающие изменение значений главных напряжений по глубине.

Ряд авторов считает [3], что распределение главных максимальных напряжений (ГМН) в верхней части земной коры должно описываться паспортом прочности горных пород, который широко применяется при обработки данных лабораторных испытаний. Несмотря на обоснованность этих предположений, практическая реализация применения паспорта прочности для описания НДС не получила широкого распространения. Следует полагать, что данная ситуация связана с особенностями и недостатками применяемой методики построения паспорта прочности, в которой допущен ряд отклонений от строгой трактовки основополагающих законов геомеханики [4].

При развитии исследований, посвящённых прочности материалов, закон Кулона был признан основным для описания процессов разрушения скальных пород [1-3]. При решении задач прочности, закон Кулона рассматривается как критерий предельного (перед разрушением) состояния. Немецкий исследователь Мор математически обосновал, что линейную зависимость Кулона, определяющую связь касательных и нормальных напряжений на площадке разрушения, можно рассматривать как касательную линию к окружностям, построенным по значениям главных нормальных напряжений (минимального и максимального). Использование кругов Мора в качестве критерия прочности показало, что в большинстве случаев касательная - огибающая кругов, построенных по предельным значениям главных напряжений, существенно отличается от прямой линии [1,3]. Признание этих фактов привело к использованию в качестве критерия прочности криволинейной огибающей кругов Мора. Для огибающей предельных кругов Мора обычно применяется название «паспорт прочности» горной породы.

В связи с тем, что критерий прочности обычно рассматривается в качестве эмпирической зависимости (как криволинейная огибающая кругов Мора), при построении паспортов прочности игнорируются теоретические ограничения, которые накладываются законами Амонтона, Кулона и Гука [4]. Главное теоретическое нарушение связано с тем, что при построении паспорта прочности (огибающей кругов Мора) круг напряжения, представляющего минимальное главное напряжение (круг растяжения, разрыва) строится отдельно от круга, описывающего главное максимальное напряжение. Такая методика является серьёзным нарушением следствий, вытекающих

из закона Гука для условий плоской деформации. Кроме того, игнорируется, что линию предельного состояния нельзя выводить в зону растягивающих нормальных напряжений на площадке сдвига (выводить левее оси касательных напряжений), т.к. закон Кулона базируется на законе Амонтона (законе трения). Минимальное главное нормальное напряжение (σ_3) может быть растягивающим, но нормальное напряжение на площадке сдвига должно быть только сжимающим. Устранение этих теоретических нарушений позволяет получить линейную зависимость, т.е. добиться совпадения кругов Мора с линейным законом Кулона.

На основании критерия Мора – Кулона были выведены математические зависимости, определяющие связь главных нормальных напряжений с характеристиками породы (предел прочности при одноосном сжатии - R_{oc}, угол внутреннего трения - φ), при разрушающей нагрузке [6]:

$$\sigma_1 = R_{oc} + \sigma_3 \, tg^2(45° + \varphi/2) = R_{oc} + \sigma_3 / tg^2(45° - \varphi/2). \qquad (1)$$

Угол внутреннего трения в условиях плоской деформации связан с коэффициентом бокового отпора (λ) следующей зависимостью [7,8]:

$$\lambda = tg^2(45° - \varphi/2) . \qquad (2)$$

С учётом зависимости (2), уравнение (1) можно представить в виде:

$$\sigma_1 = R_{oc} + \sigma_3/\lambda . \qquad (3)$$

Последнюю зависимость можно использовать для описания распределения главных нормальных напряжений в зоне хрупкой деформации земной коры, заменяя σ_3 на величину веса горных пород (γH):

$$\sigma_1 = R_{oc} + \gamma H/\lambda , \qquad (4)$$

На основании фактических данных по распределению значений главных нормальных напряжений по глубине [2,9], можно сделать вывод, что уравнение (4) достаточно хорошо описывает НДС в приповерхностной зоне земной коры (зоне хрупкой деформации) на глубину до 300 м и более (до 1000 м). Глубина зоны хрупкой деформации в условиях предельно-напряжённого состояния определяется литологическим составом горных пород. Помимо распределения напряжений по глубине, аналитические зависимости описывают деформационные и гидрогеологические эффекты по геологическому разрезу, и позволяют рассчитывать геомеханические характеристики массивов горных пород [9].

1. Латышев О.Г., Казак О.О. Физика горных пород. – Екатеринбург: УГГУ, 2013. – 277с.
2. Влох И.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. - М.: Недра, 1994. - 208с.
3. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. - М.: Недра, 1996. - 217 с.
4. Тагильцев С. Н. Трение, деформация и сила тяжести как базовые понятия геомеханики. // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 85–93.
5. Тагильцев С. Н. Границы применимости линейного критерия предельно напряженного состояния горных пород. //Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 24–30.
6. Гудман Р. Механика скальных пород. - М.: Стройиздат, 1987. - 232 с.
7. Машанов А.Ж., Машанов А.А. Основы геомеханики скально-трещиноватых пород. - Алма-Ата: Наука, 1985. - 200 с.
8. Тагильцев С. Н. Обоснование взаимосвязи между углом внутреннего трения и показателями деформации горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 7. С. 56–60.
9. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. - М.: Недра, 1989. - 270 с.
10. Тагильцев С.Н. Определение геомеханических характеристик на основе изучения трещинной и фильтрационной стратификации скальных массивов. // Изв. Вузов. Горный журнал. 2016. №7. С. 49-56.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ХОЛОДОМ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ D6AC

В.А. Коротаева, М.В. Майсурадзе

ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России, Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Email: m.v.maisuradze@urfu.ru

Обработка холодом применяется, как правило, для превращения в мартенсит остаточного аустенита, сохранившегося в стали после закалки [1]. В результате такой обработки повышается твердость и износостойкость стали, а также стабилизируются геометрические размеры готовой детали [2, 3]. Это обусловлено тем, что остаточный аустенит, во-первых, обладает невысокой твердостью, а, во-вторых, склонен к самопроизвольному распаду как в процессе вылеживания, так и при незначительной нагрузке. Обработка холодом важна для ответственных деталей, для которых основным требованием является точность геометрических размеров и высокая износостойкость: детали шарикоподшипников, измерительный, режущий инструмент и т.п. [4, 5].

Проведено дилатометрическое исследование превращений, протекающих в высокопрочной стали D6AC в результате термической обработки с применением охлаждения до криогенных температур. Перед проведением обработки холодом образцы исследуемой стали охлаждали в дилатометре от температуры 920 °С с постоянными скоростями 0,2 и 1 °С/с для получения бейнито-мартенситной структуры. При скорости охлаждения 0,2 °С/с количество бейнита в структуре составляет 80…85 %, а при скорости охлаждения 1 °С/с формируется до 50 % бейнита (рис. 1).

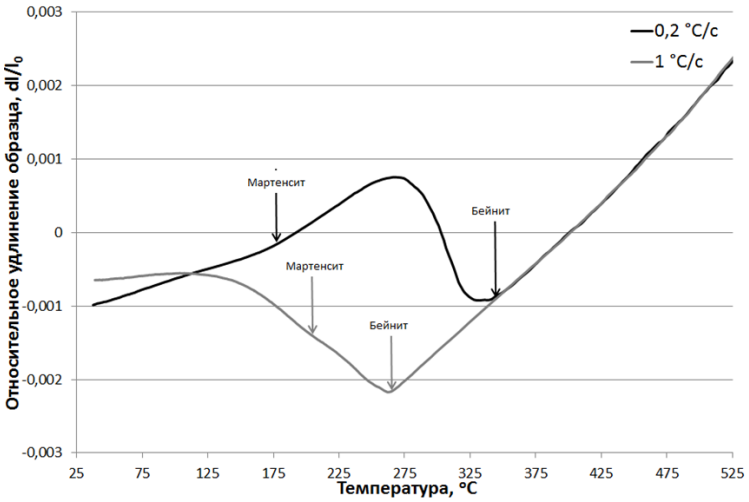


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения (dl/l_0) от температуры при охлаждении стали D6AC от температуры 920 °С со скоростью 0,2 и 1 °С/с

Как видно из результатов дилатометрических экспериментов, конечный размер образцов на 0,05…0,10 % меньше начального (до термообработки). Это свидетельствует о наличии в структуре исследуемой стали (после термообработки) непревращенного остаточного аустенита, кристаллическая решетка которого обладает меньшим удельным объемом по сравнению с решеткой α-фазы бейнита и мартенсита.

После охлаждения до комнатной температуры дилатометрические образцы были помещены в криогенную камеру, где производилось охлаждение в среде паров жидкого азота до температуры -140 °С. Во время охлаждения производилась регистрация изменения длины образцов (рис. 2). Установлено, что после обработки холодом размер

образцов увеличивается на 0,07…0,09 % по сравнению с закаленным состоянием. То есть суммарно после полного цикла термической обработки (аустенитизация, закалка, обработка холодом) размер образцов практически возвращается в исходное состояние (уменьшение на 0,05…0,10 % после закалки, увеличение на 0,07…0,09 % после обработки холодом), что свидетельствует о значительном уменьшении количества остаточного аустенита при криогенной обработке.

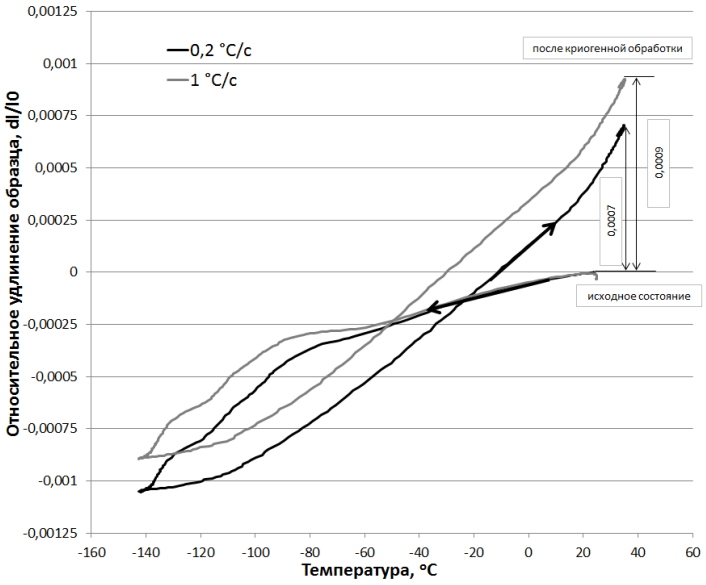


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения (dl/l_0) от температуры при криогенной обработке образцов стали D6AC, охлажденных ранее от температуры аустенитизации со скоростью 0,2 и 1 °C/c (рис. 1)

Установлено, что проведение криогенной обработки привело к повышению прочностных свойств закаленной стали D6AC на 5…10 % (предел текучести увеличился от 1930 до 2100 МПа) и снижению пластических свойств на 15…25 % (относительное удлинение уменьшилось от 8,5 до 6,5 %, относительное сужение – от 35 до 30 %). Ударная вязкость стали при этом практически не изменяется и составляет KCV = 0,17…0,20 МДж/м^2. Наблюдаемые изменения механических свойств связаны с уменьшением в структуре стали количества остаточного аустенита вследствие его превращения в мартенсит. Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что после закалки в исследуемой стали содержится 4…5% остаточного аустенита, а после обработки холодом его количество сокращается в 2…3 раза.

1. T. Sonar, S. Lomte, C. Gogte, Materials Today: Proc. 5(11), PP. 25219-25228 (2018)
2. H. Zhang, X. Yan, Q. Hou, Z. Chen, Advances in Materials Science and Engineering 2021, Article ID 8870282 (2021)
3. D.G. Fantineli, C.T. Parcianello, T.S. Rosendo, A. Reguly, M.D. Tier, Journal of Materials Research and Technology 9(6), PP. 12354-12363 (2020)
4. S. Kumar, N.K. Khedkar, B. Jagtap, T.P. Singh, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 225, Article ID 012104 (2017)
5. A. Idayan, A. Gnanavelbabu, K. Rajkumar, Procedia Engineering 97, PP. 1683-1691 (2014)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОЙ И ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 40ХН2МА

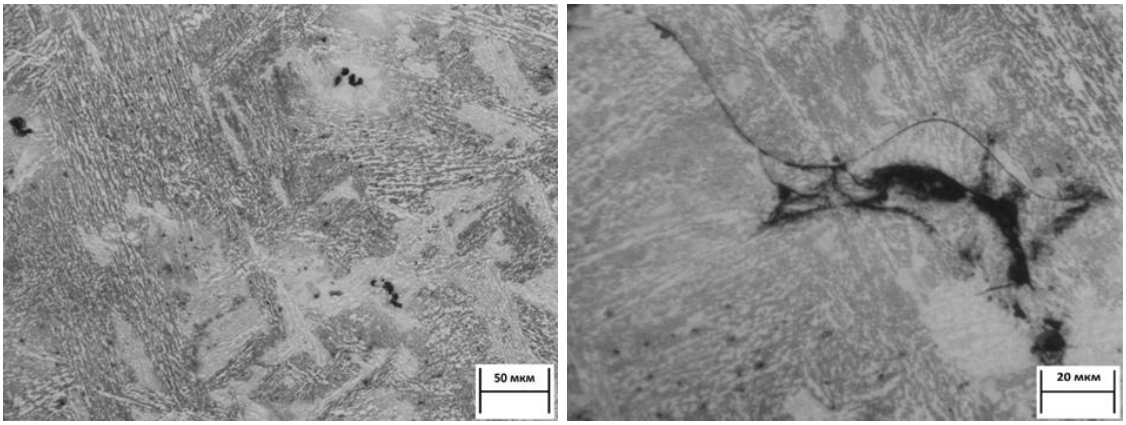
Е.В. Антаков[1], М.В. Майсурадзе[1], А.А. Куклина[1,2]

[1] ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России, Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2] ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Email: m.v.maisuradze@urfu.ru

Для массового производства однотипных металлических деталей широко применяются методы литья, такие как литье в кокиль, литье под давлением, центробежное литье, литье по выплавляемым моделям и т.п. [1, 2]. В настоящее время литье по выплавляемым моделям позволяет получить точные геометрические параметры отливки, близкие к чистовым размерам готовой детали, при относительно невысоких производственных затратах. Это обусловило распространение данного метода изготовления отливок в различных отраслях промышленности: авиастроении, атомной промышленности, машиностроении и др. [3, 4].

Проведено исследование деталей из стали 40ХН2МА, изготовленных методом литья по выплавляемым моделям и механической обработкой горячекатаного проката. Металлографическое исследование литого корпуса из стали 40ХН2МА показало, что в исходном состоянии наблюдается весьма крупнозернистая микроструктура игольчатого типа (рис. 1, а). Размер зерен достигает 0,2…0,5 мм. Это связано с тем, что отливка после кристаллизации не подвергалась исправительной термической обработке (нормализации и высокотемпературному отпуску). Кроме того, в металле отливки выявлены многочисленные несплошности в виде пор, расслоений, трещин (рис. 1, б), а на поверхности корпуса имеется значительное обезуглероживание, подкорковые пузыри и трещины.

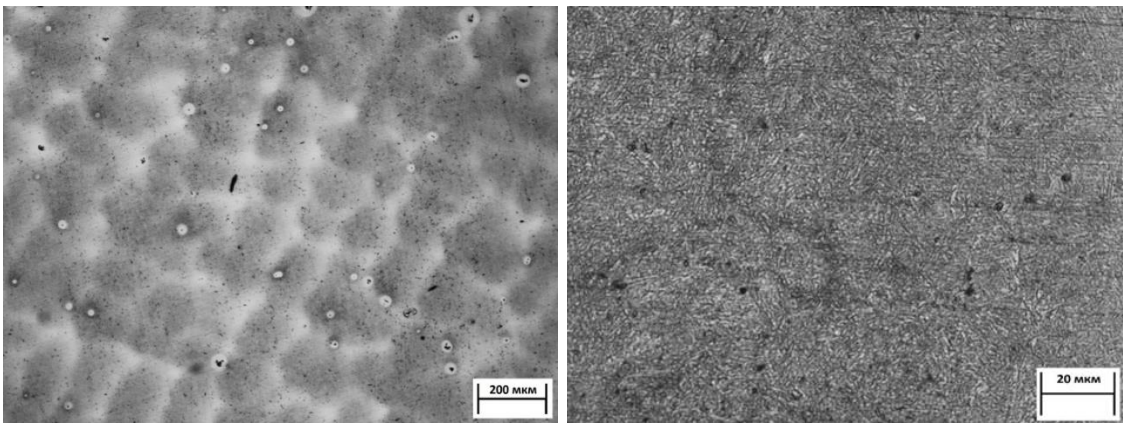


а *б*

Рис. 1. Микроструктура литой детали из стали 40ХН2МА в исходном состоянии

Для сравнительной оценки механических свойств детали подвергались термической обработке: нагрев под закалку до 860 °С, выдержка 1,5 ч, охлаждение в масле, отпуск при температуре 400 °С, выдержка 3 ч, охлаждение в масле. После термической обработки на поверхности литого корпуса имеется обезуглероженный слой глубиной более 1 мм с пониженной твердостью 20…30 HRC. В микроструктуре обезуглероженного слоя наблюдается преимущественно феррит и отдельные частицы карбидной фазы. В сердцевине литого корпуса наблюдается отпущенная ферритокарбидная смесь с твердостью 45 HRC. В макроструктуре хорошо наблюдается дендритная ликвация (рис. 2, а), являющаяся причиной значительного разброса

твердости по сечению корпуса (±3 HRC). После закалки и отпуска корпус из горячекатаного проката обладает более однородной ферритокарбидной структурой (рис. 2, б), твердость которой составила 45 HRC при разбросе значений ±1,5 HRC.



а *б*

Рис. 2. Микроструктура детали из стали 40ХН2МА после термической обработки: а) отливка; б) прокат

В табл. 2 приведены значения механических свойств термически обработанных деталей из стали 40ХН2МА. Установлено, что при практически одинаковом уровне прочности (отличие не более 5 %) литая сталь по сравнению с прокатом обладает существенно меньшей пластичностью (относительное удлинение и сужение меньше в 2,0…2,5 раза) и вязкостью (ударная вязкость ниже в 4 раза).

Табл. 2. Механические свойства деталей из стали 40ХН2МА

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ, %	ψ, %	KCV, МДж/м^2
Отливка	1265	1365	5,5	22	0,1
Прокат	1340	1420	11,5	55	0,4

Применение литья по выплавляемым моделям для изготовления ответственных деталей сопряжено с опасностью снижения качества металла и вязкостно-пластических свойств. Для деталей, работающих в условиях износа, и не подвергающихся знакопеременным нагрузкам, использование литья может быть целесообразно, особенно если детали обладают сложной формой, и весьма трудоемки в изготовлении.

1. Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, Технология литейного производства. Специальные виды литья. М.: Академия, 2005. 352 с.
2. C. Bharambe, M.D. Jaybhaye, A. Dalmiya, C. Daund, D. Shinde, Materials Today: Proceedings 72(3), PP. 1079-1083 (2023)
3. Introduction to Aerospace Materials, Oxford: Woodhead Publishing Ltd, 2012. 621 p.
4. H. Najafi, J. Rassizadehghani, S. Norouzi, Materials and Design 32(2), PP. 656-663 (2011)

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

Д.И. Лебедев[1,2], Е.В. Антаков[1], М.В. Майсурадзе[1], А.А. Куклина[1,3]

[1] ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России, Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2] Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
[3] ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Email: m.v.maisuradze@urfu.ru

Термокинетические диаграммы превращений переохлажденного аустенита в сталях традиционно имеют широкое практическое применение, как при конструкторской разработке новых деталей, так и при обосновании технологических процессов термической обработки [1]. Наиболее широко для исследования превращений аустенита при непрерывном охлаждении применяется дилатометрический метод [2]. Он имеет высокую точность, обеспечивает хорошую повторяемость результатов, а также позволяет производить непрерывную запись результатов измерений.

Проведено дилатометрическое исследование превращений переохлажденного аустенита в легированных сталях промышленной и лабораторной выплавки (26 марок разных систем легирования). Диапазон варьирования содержания химических элементов в исследуемых сталях, масс. %: C – 0,15…0,57; Cr – 0,34…2,55; Mn – 0,33…2,02; Si – 0,01…1,55; Ni – 0,01…4,14; Mo – 0,02…0,93; V – 0,00…0,13; S – 0,001…0,035.

Выполнен статистический анализ результатов дилатометрических исследований сталей, который позволил получить аналитические уравнения, связывающие химический состав с характеристиками превращений переохлажденного аустенита: температурой начала образования мартенсита, $M_н$; температурой начала бейнитного превращения при охлаждении со скоростью 0,1…0,3 °C/c, $t_Б^{макс}$; степенью устойчивости переохлажденного аустенита, выраженной в виде отношения твердости после замедленного охлаждения (0,3 °C/c) к твердости мартенсита, $HRC_{0,3/М}$:

$$M_н = 472 – 384×C – 26×Si – 14×Ni; \quad (1)$$

$$HRC_{0,3/М} = –0,28 + 0,86×C + 0,16×Cr + 0,22×Mn + 0,09×Si + 0,14×Ni + 0,21×Mo + 7,02×S; \quad (2)$$

$$t_Б^{макс} = 1235 – 889×C – 93×Cr – 93×Mn – 69×Ni – 137×Mo – 3029×S + 926×V. \quad (3)$$

Проверка полученных зависимостей по критерию Фишера показала, что данные модели обладают удовлетворительной адекватностью: отношение табличного значения критерия Фишера к расчетному составляет 20…50, множественный коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальным значениями R = 0,95…0,98.

Полученные уравнения, связывающие химический состав стали и температуру начала образования мартенсита и бейнита, хорошо согласуются с известными зависимостями [3…6], однако имеются и дополнительные особенности. В частности, установлено, что в исследуемом диапазоне химического состава сталей на положение температуры $M_н$ оказывает значимое влияние только содержание углерода, кремния и

никеля. При этом углерод в наибольшей степени снижает температуру начала образования как мартенсита, так и бейнита (уравнения (1) и (3)).

Повышение содержания ванадия приводит к увеличению температуры начала бейнитного превращения, что обусловлено связыванием части углерода в специальные карбиды, в результате чего устойчивость переохлажденного аустенита снижается. Увеличение содержания серы в стали приводит к снижению температуры начала образования бейнита, однако механизм такого влияния на данный момент не известен. Возможно, сера связывает в сульфиды наряду с марганцем и определенную часть примесей, снижающих устойчивость переохлажденного аустенита.

Показано, что все рассматриваемые легирующие элементы повышают устойчивость переохлажденного аустенита (уравнение (2)). Также установлено статистически значимое положительное влияние содержания серы на величину твердости стали после замедленного охлаждения, что может быть обусловлено химической и структурной неоднородностью стали, загрязненной сульфидными включениями, которая обычно проявляется наличием отдельных полос с повышенной твердостью.

Таким образом, полученные уравнения можно использовать для оптимизации химического состава стали в целях одновременного повышения устойчивости переохлажденного аустенита (максимизировать параметр $HRC_{0,3/М}$), снижения температуры начала бейнитного превращения при непрерывном охлаждении, чтобы избежать формирования верхнего бейнита, обладающего низкими вязко-пластическими свойствами (минимизировать параметр $t_Б^{макс}$), а также снижения температуры начала мартенситного превращения, чтобы обеспечить лучшую стабилизацию непревращенного аустенита (минимизировать параметр $М_н$).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00106.

1. Steel and its Heat Treatment: a Handbook / ed. by T. Holm, P. Olsson, E. Troell. Sweden: Swerewa IVF, 2012. 832 p.
2. J. Moravec, M. Mician, M. Málek, M. Švec, Materials 15, Article ID 4637 (2022)
3. Z. Zhao, C. Liu, Y. Liu, D. O. Northwood, Journal of Materials Science 36, PP. 5045-5056 (2001)
4. W. Steven, A. G. Haynes, Journal of the Iron and Steel Institute 183(8), PP. 349-359 (1956)
5. K.W. Andrews, Journal of the Iron and Steel Institute 203(7), PP. 721-727 (1965)
6. A.V. Sverdlin, A.R. Ness, Steel Heat Treatment Handbook. New York: Marcel Dekker, 1997, PP. 45-91.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

В.В. Назарова[1], Д.И. Лебедев[1,2], М.В. Майсурадзе[1], А.А. Куклина[1,3]

[1] ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России, Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2] Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
[3] ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Email: m.v.maisuradze@urfu.ru

Для количественного анализа процесса бейнитного превращения, протекающего при постоянной температуре, широко применяется математическое описание экспериментальной кинетики при помощи различных аналитических уравнений:

Остина-Риккета (ОР) [1], Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами (КДМА) [2, 3], Вейбулла [4], Ферхюльста [5] и др. Несмотря на то, что практически для всех сталей экспериментальная кинетика изотермического бейнитного превращения достаточно удовлетворительно описывается уравнением ОР (1), в некоторых случаях более адекватный результат дает уравнение КДМА (2). Для решения данной проблемы была предложена методика, в основе которой лежит производная по времени от функций ОР (1) и КДМА (2):

$$1/(1 - P) = 1 + k[\tau^n]; \quad (1)$$

$$1/(1 - P) = \exp(k[\tau^n]). \quad (2)$$

Выполнив замену $z = 1/(1 - P)$ и взяв производную $dz/d\tau$, получим, соответственно, для уравнений ОР и КДМА:

$$dz/d\tau = k \times n \times \tau^{n-1}; \quad (3)$$

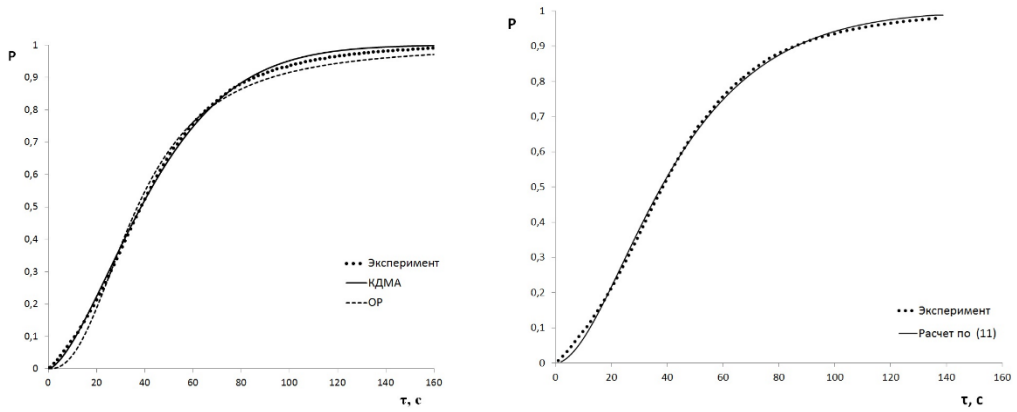
$$dz/d\tau = k \times n \times \tau^{n-1} \times \exp(k[\tau^n]). \quad (4)$$

Таким образом, полученные дифференциальные уравнения отличаются друг от друга только наличием множителя $\exp(k[\tau^n])$. Введя показатель степени *c* для множителя $\exp(k[\tau^n])$, получим:

$$dz/d\tau = k \times n \times \tau^{n-1} \times \exp(k[\tau^n])^c, \quad (5)$$

т.е. при $c = 1$ процесс превращения будет соответствовать кинетике, описываемой уравнением КДМА, при $c = 0$ – уравнением ОР, а при $0 < c < 1$ будет наблюдаться переходный процесс. Объединив два уравнения, и введя поправочный коэффициент *c*, можно получить истинные значения параметров n и k, определяющие характер превращения переохлажденного аустенита.

Например, в случае изотермической закалки стали 50ХГМА при температуре 425 °С (рис. 1) применение уравнения (5) привело к более точному описанию кинетики превращения, чем это обеспечивали уравнения (1) и (2). При этом были получены следующие значения параметров: $n = 1{,}82$; $\ln(k) = -6{,}80$; $c = 0{,}43$. Анализ устойчивости найденного решения показал, что полученное значение коэффициента c – единственное, которое обеспечивает наименьшее расхождение между экспериментальной и расчетной кинетикой бейнитного превращения.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальная и расчетная кинетика изотермического бейнитного превращения при температуре 425 °С в стали 50ХГМА при использовании уравнений ОР и КДМА (а) и дифференциального уравнения (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00106.

1. M.J. Starink, Journal of Materials Science 32, PP. 4061-4070 (1997)
2. J.G. Zhu, X. Sun, G.C. Barber, X. Han, H. Qin, Metals 10(2), Article ID 236 (2020)
3. M. Avrami, Journal of Chemical Physics 7(12), PP. 1103-1132 (1939)
4. J. Cai, R. Liu, Journal of Physical Chemistry B 111(36), PP. 10681-10686 (2007)
5. Yu.V. Yudin, M.V. Maisuradze, A.A. Kuklina, Steel in Translation 47(3), PP. 213-218 (2017)

ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА КИНЕТИКУ БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ

В.В. Назарова[1], Д.И. Лебедев[1,2], М.В. Майсурадзе[1], А.А. Куклина[1,3]

[1] ФГАОУ ВО УрФУ им. первого Президента России, Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2] Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
[3] ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Email: m.v.maisuradze@urfu.ru

Изотермическая закалка стальных изделий в температурном интервале бейнитного превращения применяется для повышения вязкостно-пластических свойств и износостойкости деталей [1…4]. Однако реализация изотермической закалки сопряжена с некоторыми особенностями, к которым, в частности, относится тепловая инерционность, характеризующаяся тем, что в момент погружения детали в ванну с расплавом требуемая температура достигается не сразу. Экспериментально показано (рис. 1), что при охлаждении в расплаве соли (50% KNO_3 + 50% $NaNO_3$) даже небольшого стального образца сечением 9×9 мм достижение требуемой температуры изотермической выдержки (в рассматриваемом случае – 350 °С) происходит в течение 80 с после попадания в интервал бейнитного превращения. С увеличением сечения детали время достижения требуемой температуры изотермической выдержки кратно возрастает.

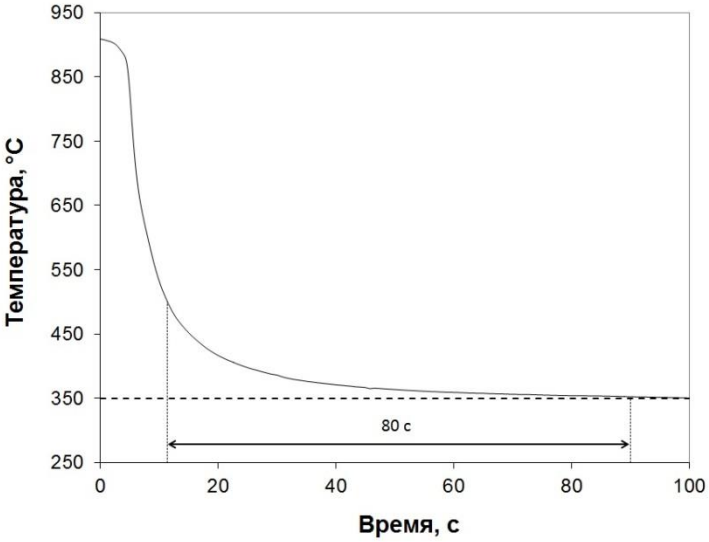
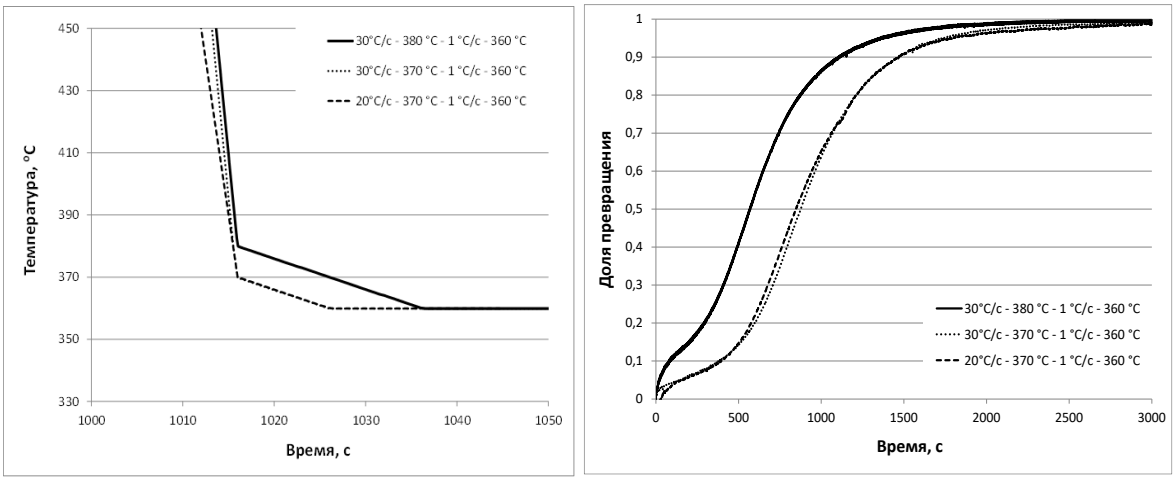


Рис. 1. Экспериментальная траектория охлаждения в расплаве соли стального образца сечением 9×9 мм

Для оценки влияния термической траектории до момента достижения температуры изотермической выдержки на последующую кинетику образования бейнита, образцы стали 20Х2Г2СНМА охлаждались от температуры аустенитизации 900 °С со скоростью 20 и 30 °С/с до температуры на 10 и 20 °С выше требуемой температуры выдержки (360 °С), после чего скорость охлаждения понижалась (1 °С/с) до достижения нужной температуры (рис. 2, а). Установлено, что продолжительность стадии пониженной скорости охлаждения оказывает более значительное влияние на кинетику последующего изотермического превращения, чем скорость охлаждения от температуры аустенитизации (рис. 2, б). Видно, что охлаждение со скоростью 1 °С/с в широком интервале 380…360 °С способствует уменьшению инкубационного периода и превращение начинается и заканчивается раньше, чем в случае замедленного охлаждения в более узком интервале 370…360 °С. При этом изменение скорости охлаждения от температуры аустенитизации до 370 °С (20 или 30 °С/с) не влияет на дальнейший процесс образования бейнита. Это связано с тем, что при замедленном охлаждении в области относительной устойчивости переохлажденного аустенита (при охлаждении со скоростью 1 °С/с дилатометрически не регистрируется превращений при температуре выше 360 °С) в стали протекают процессы, связанные с образованием зародышей новой фазы. То есть, чем дольше длится замедленное охлаждение до температуры изотермической выдержки, тем больше центров зарождения бейнита формируется, вследствие чего превращение протекает быстрее.



а *б*

Рис. 2. Термические траектории охлаждения дилатометрических образцов стали 20Х2Г2СНМА (а) и их влияние на последующую кинетику изотермического бейнитного превращения (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00106.

1. Y. Wang [et al.], Crystals 12, Article ID 1001 (2022)

2. M. V. Maisuradze, M.A. Ryzhkov, AIP Conference Proceedings 2053, Article ID 040054 (2018)

3. M. V. Maisuradze, M. A. Ryzhkov, Metallurgist 62, PP. 337-347 (2018)

4. M. N. Georgiev, T. V. Simeonova, Metal Science and Heat Treatment 60, PP. 464-470 (2018)

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СТАЛИ 20Х2Г2СНМА ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКЕ

Д.И. Лебедев[1, 2], Куклина А.А.[1,3], М.В. Майсурадзе[1] ,Ю.В. Юдин[1]

[1]ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2]Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, г. Екатеринбург
[3]ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

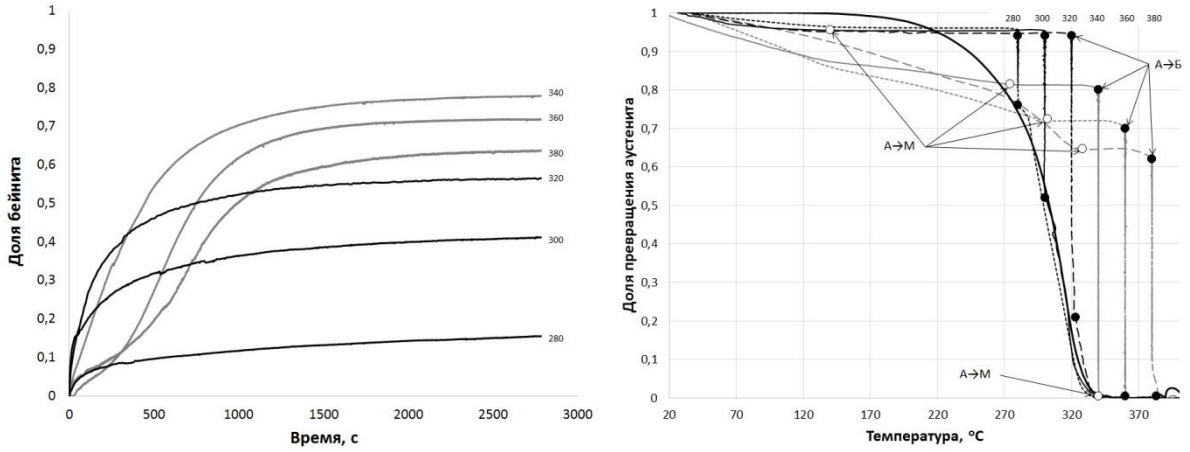
Email: lebedev_di@imp.uran.ru

Исследована сталь 20Х2Г2СНМА промышленной выплавки. Химический состав стали, определенный при помощи атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-100», мас. %: C – 0,24; Cr – 1,99; Mn – 1,76; Si – 1,12; Ni – 1,04; Mo – 0,32; S – 0,008; P – 0,014; Cu – 0,07.

Дилатометрические исследования проводили при помощи прибора «LINSEIS L78 R.I.T.A.». Образцы в форме цилиндра (диаметр 4 мм, длина 10 мм) помещались в камеру дилатометра, после чего создавался вакуум и проводился индукционный нагрев до температуры аустенитизации 900 °С. Продолжительность выдержки при температуре аустенитизации – 15 мин. Исследование превращений переохлажденного аустенита проводилось при изотермической выдержке в температурном интервале 280…380 °С. Кинетику изотермического бейнитного превращения описывали при помощи уравнения Остина-Риккета [1, 2].

На рис. 1, а приведены зависимости доли бейнита от времени изотермической выдержки при различных температурах. Максимальная доля бейнита, соответствующая выходу превращения на плато, оценивалась по исходной дилатограмме с учетом образования мартенсита до и после изотермической выдержки. На рис. 1, б приведена зависимость доли превращения переохлажденного аустенита от температуры при проведении эксперимента. За 100 % было условно принято суммарное количество α-фазы мартенсита и бейнита, образовавшееся в образцах во время охлаждения до температуры выдержки, во время изотермической выдержки (вертикальные линии на графике) и при охлаждении после выдержки.

В результате было установлено, что при изотермической выдержке выше температуры начала образования мартенсита ($M_н$ = 335 ± 5 °С) наблюдается выраженная неполнота бейнитного превращения: оно не протекает до полного исчерпания непревращенного аустенита, и при охлаждении после выдержки образуется до 40 % мартенсита. При этом с понижением температуры выдержки максимально возможное (равновесное) количество бейнита, образующееся в исследуемой стали, увеличивается. В случае экспериментов с изотермической выдержкой ниже $M_н$ изотермическому образованию бейнита предшествует формирование при охлаждении до температуры выдержки некоторого количества мартенсита (тем большее, чем ниже температура изотермической выдержки). При этом бейнитное превращение протекает практически до полного исчерпания непревращенного аустенита, и после изотермической выдержки образуется порядка 5 % обогащенного углеродом мартенсита. Количество стабилизированного при комнатной температуре остаточного аустенита составляет 8…10 % при реализации бейнитного превращения в температурном интервале 280…360 °С (как ниже, так и выше $M_н$).



а *б*

Рисунок 1. Результаты дилатометрического исследования превращения переохлажденного аустенита в стали 20Х2Г2СНМА при наличии изотермической выдержки: а - кинетика образования изотермического бейнита; б - зависимость доли превращения переохлажденного аустенита от температуры во время проведения эксперимента (● – начало и конец образования изотермического бейнита; ○ – начало образования атермического мартенсита; сплошная черная линия – кинетика образования атермического мартенсита)

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006, в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект №11.1465.2014/К, а также в рамках государственного задания ИФМ УрО РАН, тема «Структура».

1. J. B. Austin, R. L. Rickett, Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 964, PP. 1–20 (1939)

2. M. J. Starink, Journal of Materials Science 32, PP. 4061-4070 (1997)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА УДАРНОЙ ВЯЗКОСТЬ СТАЛИ 20Х2Г2СНМА

Д.И. Лебедев[1, 2], М.В. Майсурадзе[1], Ю.В. Юдин[1]

[1]ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
[2]Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, г. Екатеринбург

Email. lebedev_di@imp.uran.ru

Химический состав исследуемой стали 20Х2Г2СНМА определяли при помощи атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-100», масс. %: C – 0,24; Cr – 1,99; Mn – 1,76; Si – 1,12; Ni – 1,04; Mo – 0,32; S – 0,008; P – 0,014; Cu – 0,07. Образцы исследуемой стали подвергали изотермической закалке в температурном интервале 280…380 °С в течение 2 ч. Испытания на ударный изгиб производились при помощи маятникового копра по ГОСТ 9454 при комнатной температуре на стандартных образцах с V-образным концентратором.

Значительнее всего условия изотермической закалки влияют на ударную вязкость (рис. 1). Наибольшее значение ударной вязкости (0,72 МДж/м^2) было получено при температуре изотермической выдержки 280 °С, когда в структуре исследуемой стали формируется минимальное количество бейнита (20 %), а остаточный аустенит максимально обогащен углеродом (0,80…0,85 масс. %). Стоит отметить, что бейнитная структура в исследуемой стали обладает меньшим уровнем ударной вязкости по сравнению с мартенситом, независимо от температуры выдержки при изотермической закалке: ударная вязкость мартенситной структуры после непрерывной закалки в масле и низкотемпературного отпуска составила 0,90 МДж/м^2 [1].

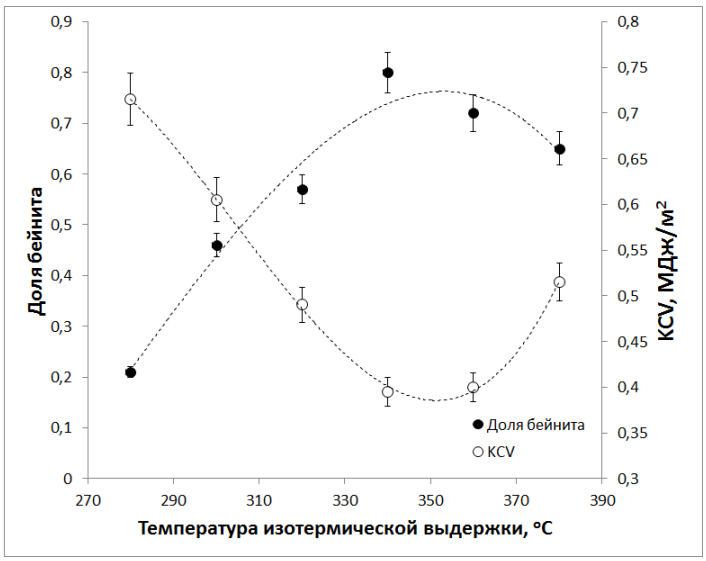
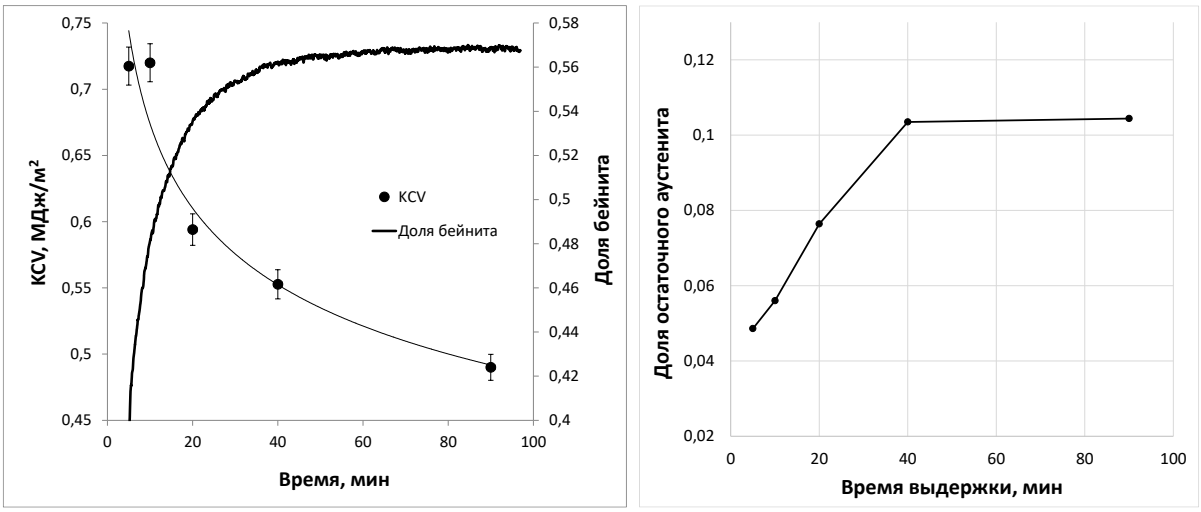


Рисунок 1. Зависимость ударной вязкости и доли бейнита в структуре стали 20Х2Г2СНМА от температуры изотермической выдержки

Таким образом, для исследуемой стали 20Х2Г2СНМА существует явная корреляция между ударной вязкостью, количеством бейнита, остаточного аустенита и содержанием углерода в последнем. Для подтверждения был проведен эксперимент при температуре изотермической выдержки 320 °С и продолжительности выдержки от 5 до 90 мин (рис. 2). На термически обработанных образцах определяли ударную вязкость, а также количество остаточного аустенита и его параметры. Установлено, что наибольшее значение ударной вязкости (0,70…0,75 МДж/м^2) достигается только на начальном этапе превращения (выдержка в течение 5…10 мин, рис. 2, а), после чего наблюдается ее снижение до 0,50 МДж/м^2, пропорциональное количеству образующегося бейнита. Рентгеноструктурный анализ показал, что в процессе изотермической выдержки доля остаточного аустенита также увеличивается от 0,05 в начале выдержки до 0,10 после 40 мин. выдержки, после чего не изменяется (рис. 2, б).



а *б*

Рисунок 2. Изменение ударной вязкости и доли бейнита (а) и доли остаточного аустенита (б) с увеличением продолжительности изотермической выдержки стали 20Х2Г2СНМА при температуре 320 °С

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006, в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект №11.1465.2014/К, а также в рамках государственного задания ИФМ УрО РАН, тема «Структура».

1. M.V. Maisuradze, M.A. Ryzhkov, D.I. Lebedev, Metallurgist 64(7-8), PP. 640-651 (2020)

ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ В СИСТЕМЕ С ГРЕЙГИТОМ Fe_3Se_4 – Fe_3S_4

В.А. Комарова[1], М.Д. Ключарев[1], Н.В. Селезнева[1], Н.В. Баранов[1, 2]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ИЕНиМ, г. Екатеринбург, Россия
[2] Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

E-mail: V.A.Komarova@urfu.ru

Минерал грейгит (Fe_3S_4) имеет структуру обратной шпинели, как и его оксидный аналог магнетит (Fe_3O_4). Пространственная группа грейгита *Fd*-3*m*, атомы серы образуют гранецентрированную кубическую решетку, в которой тетраэдрические *A*-позиции занимают атомы Fe^{3+}, а октаэдрические *B*-позиции − атомы Fe^{3+} и Fe^{2+} [1]. Несмотря на схожую структуру соединений Fe_3S_4 и Fe_3O_4, их магнитные свойства во многом различаются, хотя оба соединения являются ферримагнетиками. Намагниченность насыщения при комнатной температуре для грейгита составляет $3.13\mu_Б$ на формульную единицу, в то время как для магнетита − $4.0\mu_Б$; кроме того, магнетит обладает более высокой температурой магнитного упорядочения (около 850 К) по сравнению с грейгитом (~ 680 К). Причина различия магнитных свойств этих соединений, по-прежнему, до конца не выяснена. Селенидное соединение Fe_3Se_4 не встречается в природе, оно обладает слоистой структурой типа NiAs (пространственная группа *I*2/*m*), в которой все атомы железа занимают октаэдрические позиции.

Соединение Fe_3Se_4 является ферримагнетиком с намагниченностью насыщения при комнатной температуре около $0.7\mu_Б$ на формульную единицу, температура магнитного упорядочения около 320 К [2]. Целью данной работы является анализ изменения фазового состава, структуры и магнитных свойств в системе Fe_3Se_4 – Fe_3S_4 при замещении по анионной подрешетке.

Все соединения были получены методом твердофазного синтеза в вакуумированных кварцевых ампулах. Аттестация кристаллической структуры проведена на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции. Полевые и температурные зависимости намагниченности измерены в интервале 80 К – 1000 К с помощью вибромагнетометра Lake Shore VSM 7407.

Из данных рентгеноструктурного анализа установлено отсутствие полного ряда твердых растворов замещения в системе Fe_3Se_4 – Fe_3S_4. Концентрационные переходы от соединений с моноклинной структурой на основе Fe_3Se_4 к соединениям с кубической решеткой на основе Fe_3S_4 происходят через двухфазное состояние. Из данных измерений температурных зависимостей намагниченности установлено наличие в образцах оксида Fe_3O_4 (~2 %). Остаточная намагниченность при увеличении содержания серы увеличивается с 7.5 emu/g до 8.5 emu/g для соединения Fe_3Se_3S. Выявлено немонотонное изменение температуры магнитного упорядочения в однофазных соединениях от концентрации замещающего аниона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00158).

1. Chang L., Rainford B.D., Stewart J.R., Ritter C., Roberts A.P., Tang Y., & Chen Q. Magnetic structure of greigite (Fe_3S_4) probed by neutron powder diffraction and polarized neutron diffraction. Journal of Geophysical Research, 114(B7) (2009).
2. Adachi K. Magnetic Anisotropy Energy in Nickel Arsenide Type Crystals. Journal of the Physical Society of Japan, 16(11), 2187–2206 (1961).

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

С.О. Барков, В.В. Химуля

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Email: barkov.sviat@yandex.ru

Подземное хранение газа, как одна из подотраслей газовой промышленности, быстро развивается по всему миру, поскольку является безальтернативным решением в сглаживании сезонных потреблений газа. На сегодняшний день особую актуальность подземные хранилища газа (ПХГ) приобретают в Российской Федерации, где в связи с санкционным давлением наблюдается переориентация экспорта энергоресурсов из Европы в Азию. К тому же нормальное функционирование уникальной Единой системы газоснабжения в России было бы невозможно без использования ПХГ, ввиду климатических особенностей и большой протяженности территории страны.

Наибольшее количество ПХГ создается в водоносных пластах и в истощенных газовых, газонефтяных или газоконденсатных месторождениях. Перспективными также являются ПХГ в соляных отложениях. Главной проблемой при эксплуатации ПХГ в истощенных месторождениях [1] является изменение фильтрационно-емкостных свойств резервуара при периодических циклах закачки и отбора газа, т. е. при периодических изменениях давления в скважине и пласте. Данный режим работы неизбежно вызывает изменения в напряженно-деформированном состоянии породы пласта-коллектора. Происходит возникновение остаточных деформаций, что сказывается на емкостных и фильтрационных характеристиках пород массива - пористости и проницаемости. Высокие значения этих характеристик являются необходимым условием для создания ПХГ на базе истощенных месторождений. Однако, при циклической эксплуатации ПХГ часто наблюдается закупорка пор и фильтрующих каналов призабойной зоны скважины глинистой и мелкодисперсной составляющей скелета пласта, что оказывает негативное влияние на фильтрационные характеристики околоскважинной зоны. [2, 3]. Следует также отметить, что безопасное и эффективное функционирование любого типа ПХГ зависит от правильного выбора режима его эксплуатации [4].

Одним из перспективных способов решения проблемы снижения проницаемости в окрестности скважин в ходе эксплуатации является разработанный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта (НРП). Идея данного подхода заключается в том, чтобы за счет создания необходимого напряженного состояния вызвать появление системы микро- и макротрещин в окрестности скважины, которые увеличивают проницаемость породы [5]. Растрескивание, разрыхление породы можно вызвать, используя упругую энергию, запасенную в массиве горных пород. В виду циклического изменения пластового давления на ПХГ в ходе эксплуатации реализация метода НРП имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с применением на обычных месторождениях.

В данной работе представлены результаты комплексных исследований горных пород Арбузовского ПХГ, включающих физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в породах в условиях реально возникающих напряженных состояний на стенках скважины при реализации метода направленной разгрузки пласта, а также изучение изменений внутренней структуры образцов средствами рентгеновской компьютерной томографии. Геомеханические часть исследований была проведена на уникальной Испытательной системе трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Для этого были составлены программы нагружения образцов на основе методов теории упругости. Получены кривые деформирования и кривые ползучести пород в условиях неравнокомпонентного трехосного нагружения. Исследованы деформационные, фильтрационные и реологические характеристики пород взависимости от напряжений.

Исследование изменений внутренней структуры образцов выполнено с использованием высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon CT-MINI. По результатам проведенного сканирования образцов созданы 3D-структуры исследуемых пород (см. Рис. 1).

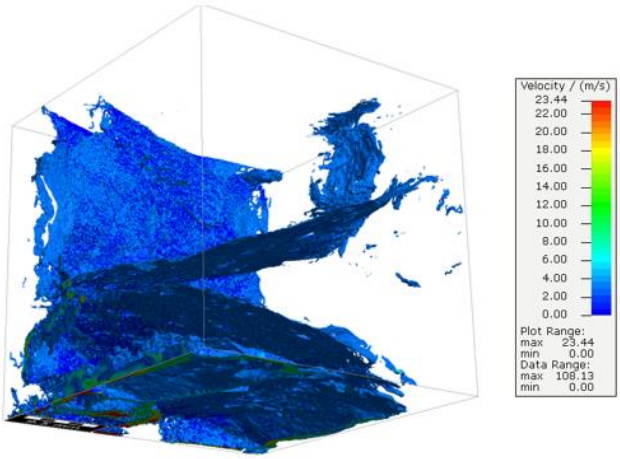


Рисунок 1. Внутренняя 3D-структура системы трещин и распределение поля скоростей потока вдоль путей фильтрации.

Выполнен порометрический анализ породы по результатам томографии. Проведен количественный и качественный анализ образовавшейся в образцах системы макротрещин. С помощью модуля FlowDict проведено численное моделирование потока фильтрации на полученных по результатам съемки структурах для оценки изменения трещинной проницаемости образцов. Полученные результаты указывают на то, что метод направленной разгрузки пласта может быть успешно применен с целью увеличения проницаемости в окрестности скважин ПХГ за счет создания необходимого уровня напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект № 22-11-00273.

1. В.И. Попков, В.А. Соловьев, Л.П. Соловьева, *Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии* **8**, сс. 361–373 (2006).
2. В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, В.В. Химуля, Н.И. Шевцов, *Газовая промышленность* **7**, сс. 66–73 (2021).
3. С. А. Басов, *Бурение и нефть* **10**, сс. 26-29 (2008).
4. С. Л. Орловский, *Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: Сборник науч-ных трудов,* сс. 324-330 (2016).
5. V. Karev, Yu. Kovalenko, K. Ustinov, *Geomechanics of Oil and Gas Wells. Springer Nature Switzerland AG*, 166 p. (2020).

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ КОРОБКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Н. Беседина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук

Email: besedina.a@gmail.com

Исследование масштабных соотношений слабой сейсмичности, сопровождающей разработку месторождений, и попытка определить характерную для данного участка горного массива эффективность микросейсмических событий является актуальной задачей с точки зрения оценки удароопасности конкретного массива горных пород.

Оценка влияния минералогического состава вмещающего массива и заполнителя трещин на масштабные соотношения и скорость распространения разрыва использовалась при разработке методики диагностики состояния участка разломной зоны с точки зрения его сейсмогенности. Исследование выполнялось путем анализа сейсмических событий, индуцированных взрывами, проводимыми при разработке прочных кварцитов Коробковского железорудного месторождения в тектонически стабильном районе Восточно-Европейской платформы. Месторождение характеризуется относительно небольшой глубиной выработки, а также существенным превышением величины горизонтальных напряжений над вертикальными. Регистрация сейсмических событий выполнялась сейсмической группой, размещенной на глубине 300 м, оснащенной акселерометрами.

Исследуемые события были зарегистрированы после массовых взрывов в период прекращения горных и строительно-монтажных работ. Анализ сейсмических данных позволил определить основные характеристики слабых сейсмических сигналов, которые были индуцированы взрывными работами. Оценка полученных параметров сейсмических событий в совокупности с исследованием масштабных соотношений позволила достаточно детально изучить процессы, происходящие в очаге. Удалось показать закономерности возникновения слабых сейсмических событий, индуцированных горными работами. Для зарегистрированных событий были определены очаговые параметры и установлены эмпирические корреляционные зависимости между скалярным сейсмическим моментом и излученной энергией. Крайне низкие значения величины приведенной сейсмической энергии и, соответственно, скорости распространения разрыва позволяют предполагать, что промышленный взрыв индуцировал рой медленных микроземлетрясений.

Более низкие медианные значения скорости распространения разрыва отмечены для событий, приуроченных к зоне разлома, в отличие от событий, источники которых располагались на удалении от разлома, что свидетельствует о влиянии минералогического состава разломной зоны и заполнителя трещин на сейсмогенность участка разломной зоны.

Несомненно, данные о параметрах и масштабе геодинамических событий, зафиксированных в области ведения горных работ, следует учитывать при принятии решения об удароопасности или склонности к горным ударам горного массива шахты.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5.

САМООРГАНИЗАЦИЯ СТРУКТУР ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРУШЕНИЙ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский

ФГБУ науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва

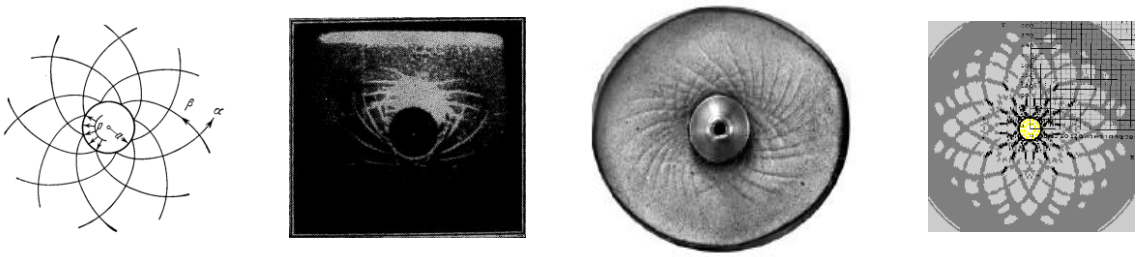
Email: iv_ev@mail.ru

Определение *самоорганизации* предусматривает установление в диссипативной неравновесной среде пространственных паттернов - природных закономерностей или шаблонов. Элементы шаблона повторяются предсказуемым образом,

эволюционирующим во времени. Параметры определяются свойствами самой среды и слабо зависят от пространственной структуры источника неравновесности, начального состояния среды и условий на границах. Классическими примерами самоорганизации, например, в гидродинамике являются конвекция Рэлея – Бенара, течение Тейлора – Куэтта, вихри, которые образуются при обтекании жидкостью или газом движущихся объектов, так называемая дорожка Кармана. В математике, которую иногда называют «наукой о моделях» в смысле правил, которые можно применять везде, где это необходимо, любая последовательность чисел, которая может быть смоделирована математической функцией, может считаться шаблоном. Математику можно рассматривать как набор шаблонов. Некоторые математические шаблоны можно визуализировать, и среди них есть те, которые объясняют шаблоны в природе, включая математику симметрии, волн, меандров и фракталов.

Многие процессы деформирования геоматериалов сопровождаются наблюдаемой локализацией деформаций. Локализация происходит при сдвижениях горных пород в откосах, вокруг скважин, выработок, при формировании мульд проседания, в закладочных материалах и т. д. Локализация деформации является одним из ключевых явлений, широко изучаемых в геоматериалах и других видах материалов. Это хорошо известное явление возникает, когда материалы близки к разрушению и носит универсальный характер, что также отмечается в металлах и других пластических материалах [1, 2]. Локализация оказывает существенное влияние на все параметры напряженно-деформированного состояния среды. Без ее учета невозможно провести адекватный расчет ни кинематики деформирования, ни предельных нагрузок. Формирование и развитие зон локализации аналогичны образованию трещин в твердых телах. В обоих случаях речь идет о поверхностях разрыва перемещений. При этом специфика деформирования геосреды связана с наличием больших сжимающих напряжений. Поэтому несущая способность среды после локализации не исчерпывается, а наступает новая стадия деформирования.

В теориях пластичности [1] механизм пластической деформации связывается с наличием сетки линий скольжения. Считается, что в этом случае расстояния между ними бесконечно малы и линии из различных семейств (в классическом варианте теории) функционируют симметрично. Рассмотрим поле скольжения вокруг кругового отверстия радиуса a, нагруженного равномерным давлением p. Пусть r, φ - полярные координаты. Поскольку на контуре отверстия касательное напряжение отсутствует, то по условию равновесия $\tau_{\rho\varphi}= 0$. Тогда в каждой точке поля главные площадки имеют радиальное и окружное направления. Линия скольжения будет кривой, пересекающей в каждой своей точке луч, выходящий из центра, под углом $\pm\frac{\pi}{4}$. Но таким свойством обладают лишь



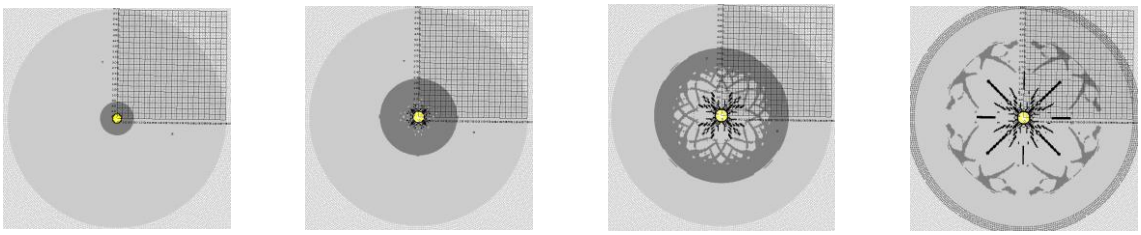
а б в г

Рис. 1. Линии локализации деформаций вокруг отверстии, возникающие под действием большого внутреннего давления.

логарифмические спирали $\varphi - ln\frac{r}{a} = \beta, \varphi + ln\frac{r}{a} = \alpha,$ которые и образуют два ортогональных семейства. Найденные аналитически линии скольжения показаны на рисунке 1 а. Эти линии хорошо наблюдаются в опытах (рис.1 б, в) [1,2].

Интерес представляет реализация регулярных систем линий скольжения при численном моделировании, возможность чего не является очевидным фактом. В настоящей работе представлены результаты по обнаружению локализации деформации в численном моделировании взрывного нагружения образца горной породы при подрыве скважинного заряда. В численном аспекте локализация деформации внутри горных пород изучена в литературе недостаточно. В представленной работе исследуется возникновение и развитие локализации деформаций в горной породе с помощью численного метода сглаженных частиц [3]. Нагружаемый материал разбивается на двумерные частицы на совокупности которых производится интерполяция полей параметров напряженно-деформированного состояния геосреды согласно поставленной краевой задаче.

Процессы микромеханического растрескивания в горных породах непосредственно контролируют макромеханические реакции на сжимающие напряжения. Понимание этих наблюдений в микромасштабе имеет первостепенное значение для прогнозирования проблем макрополей, возникающих при разработке горных пород. На модельных образцах проводилась серия численных экспериментов [4] для выявления характеристик зон повреждения на фоне рассчитанных полей деформации. Эти результаты помогают объяснить многие важные аспекты анализа поля



0,3 мс 0,9 мс 1,8 мс 2,5мс

а б в г

Рис.2. Развитие области разрушения пород во времени (моделирование методом SPH)

деформаций в механике горных пород, где на практике степень разрушений редко возможно достаточно точно количественно оценить.

Монолитные скальные горные массивы разрушаются в основном за счет действия волн напряжения (рис.2).

В момент взрыва удар газов взрыва мгновенно разрушает и полностью вытесняет некоторый слой породы, прилегающий к заряду, образуя полость, называемую зоной вытеснения, или зоной сжатия, или котлом (рис. 1 а). Возникшая в полости в момент взрыва ударная волна переходит в волну напряжения, которая далее перемещается радиально за пределы котла в массив породы, вызывая смещение частиц породы в радиальном направлении. Раздавленная и вытесненная порода вдавливается в стенки котла, которые вследствие этого представляют собой слой раздавленной и уплотненной породы (рис. 2 б). При этом в ближней области, непосредственно примыкающей к заряду, горная порода находится в условиях неравномерного объемного сжатия. В плоскостях, ориентированных преимущественно под углом 45° к радиальному направлению от оси заряда, возникают наибольшие по величине касательные напряжения, за счет чего образуется система спиральных линий локализации

деформаций (рис. 2 в), разбивающих породу на блоки. За пределами этой зоны под действием сферической волны напряжений в ее фронте в радиальном направлении возникают сжимающие напряжения, действие которых уже не может произвести разрушение в условиях всестороннего сжатия. В результате действия волн напряжения происходит расширение массива и в тангенциальном направлении возникают растягивающие напряжения, которые вызывают появление радиальных трещин в породе (рис. 2 г), распространяющихся до тех пор, пока напряжение на фронте волны будет больше или равно прочности предела пород на разрыв, поскольку предел прочности породы на растяжение, как правило, в 5-10 раз меньше, чем на сжатие. Газообразные продукты взрыва, распространяющиеся по радиальным трещинам, возникшим за счет действия волн напряжения, способствуют развитию данных трещин на определенное расстояние, зависящее от величины давления газообразных продуктов взрыва и прочностных характеристик горной породы. Далее за счет теплообмена с породой продукты взрыва охлаждаются и уже не могут совершить дальнейшей механической работы по разрушению породы. Происходит разгрузка и смещение пород в сторону зарядной камеры, в результате чего могут образоваться концентрические (кольцевые) трещины, за счет обратного сдвижения среды в сторону заряда после прохождения волны сжатия и падения давления в скважине. Данные трещины могут располагаться только в промежутке между ранее образованными радиальными трещинами. Дальнейшее распространение волны напряжений, не приводящее к разрушению породы, определяет зону упругих деформаций или сотрясения.

Формирование полей локализации деформаций и разрушения при численном моделировании [4], приобретающих в процессе эволюции во времени физически закономерную структуру (рис. 1 г, 2) является не очевидным фактом и является следствием математической формулировки описания физико-механических явлений при помощи аппарата дифференциального исчисления. Решаемая численно система квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных, выведенных на основании законов сохранения массы, количества движения и энергии, в которых физические соотношения имеют форму произвольных перекрёстных зависимостей между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций, адекватно описывает поведение геосреды при динамических нагружениях. Проявление при этом самоорганизации структур локализации деформаций и разрушений (рис. 1 г, 2), достаточно точно воспроизводящих экспериментальные наблюдения (рис. 1 б, в) и аналитические решения (рис. 1 а) наглядно свидетельствуют в пользу достоверности получаемых численных результатов.

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.- 420 с.
2. Бобряков А.П., Ревуженко А.Ф. Экспериментальное моделирование спиральных линий скольжения в сыпучих материалах //ФТПРПИ. - №2. - 2009.- с. 3-9.
3. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ - НГУ. - Днепр, - Вып. 1(145). - 2015. - С. 76-82.
4. Одинцев В.Н., Закалинский В.М., Шиповский И.Е., Мингазов Р.Я. Оценка влияния магистральных радиальных трещин, образующихся при камуфлетном взрыве, на условия дегазации пласта // Взрывное Дело. 2023, 138/95, С. 3–12.

ЕДИНЫЙ КРИТЕРИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ, ПРОЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ УСЛОВИЙ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

А.В. Жабко

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,

Email: zhabkoav@mail.ru

В работе [1] приведен и проанализирован критерий, определяющий начало пластических деформаций (предел упругости) и предел прочности, с подробным выводом которого можно ознакомиться в докторской диссертации автора. Если быть точнее, то он определяет всю ветвь пластического деформирования на стадии деформационного упрочнения (от предела упругости до предела прочности) для всех, без исключения горных пород [1].

Исходя из того, что все время пластического деформирования, происходит разрушение горной породы, но на различных иерархических уровнях (накопление микродефектов и их дальнейшее укрупнение вплоть до разрушения), логично предположить, что существует единый обобщенный критерий пластического состояния горной породы, описывающий все неупругие стадии ее деформирования, включая частные значения: предел упругости (начало пластической деформации), предел прочности, предел пластичности и вплоть до остаточной прочности.

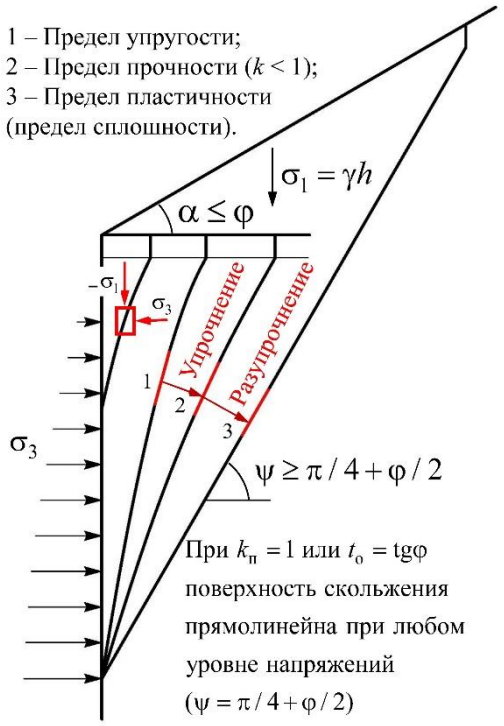


Рисунок 1. Поверхность скольжения в вертикальном откосе с наклонной бермой

Рассматривая устойчивость вертикального откоса с наклонной бермой (рис. 1), с отысканием наиболее опасной поверхности скольжения, общий функционал, определяющий горизонтальную силу, которую необходимо приложить для обеспечения предельного равновесия призмы смещения, определится следующей зависимостью[1]:

$$E_0 = \int_{x_1}^{x_2} \gamma\left(tx + H - y\right)\left(y' - f\right) - k\sigma_3 f y'^2 - C\left(1 + y'^2\right)dx \to \max, \qquad (1)$$

где k − параметр упрочнения, $0 \le k \le 1$; $t = \mathrm{tg}\alpha$ − параметр разупрочнения (α − угол наклона бермы вертикального откоса), $0 \le t \le \mathrm{tg}\varphi$; H − высота вертикального откоса;

[1] Подробнее с выводом функционала (1) и отысканием на его основе наиболее опасных поверхностей скольжения можно ознакомиться в докторской диссертации автора: “Исследование закономерностей процесса дезинтеграции горных пород на основе теории устойчивости откосов горнотехнических сооружений”, Екатеринбург, 2019.

x, y, y' − соответственно независимая переменная, функция и производная функции поверхности скольжения; γ − объемный вес горных пород.

Наклонная берма с изменяющимся углом, от нуля до угла внутреннего трения, будет моделировать приращение нагрузки на образцы (додавливание образцов), находящихся в различных напряженных состояниях (от одноосного сжатия и до бесконечности), после перехода их через предел прочности.

Наиболее опасная поверхность скольжения посредством решения вариационного уравнения (1) (уравнения Л. Эйлера), выразится зависимостью:

$$h = tx + H - y = \frac{kf\sigma_3\left(p^2 - 2tp\right) - C\left(1 + 2tp - p^2\right)}{\gamma\left(f - t\right)}, \qquad (2)$$

где $p \equiv y'$.

Подставим зависимость (2) в уравнение (1):

$$E_0 = \frac{2\left(C + kf\sigma_3\right)^2}{\gamma\left(f - t\right)^2} \int\limits_{f+\sqrt{1+f^2}}^{t+\sqrt{t^2+\frac{C+(f-t)\gamma h}{C+kf\sigma_3}}} \left[p^3 - \left(t + 2f\right)p^2 + \left(2ft - \frac{C}{C + kf\sigma_3}\right)p + \frac{Ct}{C + kf\sigma_3}\right]dp. \qquad (3)$$

Учитывая, что $\sigma_3 = \partial E_0 / \partial h$ и $\sigma_1 = \gamma h$ (σ_1, σ_3 − главные напряжения), продифференцировав уравнение (3) получим обобщенный критерий пластичности, прочности и разрушения для участков упрочнения и разупрочнения:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - 2\left(C + kf\sigma_3\right)\left[t + \sqrt{t^2 + \frac{C + \left(f - t\right)\sigma_1}{C + kf\sigma_3}}\right] = \sigma_1 - 2\left(C + kf\sigma_3\right)\mathrm{tg}\psi, \qquad (4)$$

где ψ − угол наклона наиболее слабой площадки к направлению минимального главного напряжения.

Уравнение (4) является обобщенным критерием пластичности и прочности горных пород, его параметры k и t определяют интенсивность (скорость) упрочнения и разупрочнения, а их частные значения – критерий пластичности (предел упругости), при $k = k_{\text{у}}$, предел прочности, при $k = k_{\text{п}}$, предел пластичности, при $t = t_{\text{о}}$, определяющий окончание пластических деформаций и начало формирования генерального разлома в образце (начало потери сплошности образца).

Частные значения параметров упрочнения и разупрочнения на пределе упругости, пределе прочности и пределе пластичности необходимо определять экспериментально. На стадии деформационного упрочнения в уравнении (4) необходимо положить $t = 0$. На стадии деформационного разупрочнения в критерий (4) подставляется значение параметра k на пределе прочности $k = k_{\text{п}}$, а параметр разупрочнения t является переменным, принимая свое конечное значение на пределе пластичности $t = t_{\text{о}}$. Уравнение (4) при $t = f = \mathrm{tg}\varphi$ определяет точную нижнюю грань предела пластичности для любой горной породы.

Критерий (4) получен из решения задачи плоского напряжения и не учитывает промежуточного главного напряжения σ_2. Используя результаты работы [2], при

незначительной корректировке выражений (1) – (4), обобщенный критерий пластичности, прочности и разрушения для условий объемного неравнокомпонентного сжатия будет иметь вид:

$$\sigma_3 = \sigma_1 - 2\left(C + f\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_2 + kf\sigma_3\right)\left[t + \sqrt{t^2 + \frac{C + f\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_2 + (f-t)\sigma_1}{C + f\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_2 + kf\sigma_3}}\right], \quad (5)$$

где ν − коэффициент Пуассона.

Используя единый обобщенный критерий (5), и положив в нем $t = 0$, критерий прочности для условия объемного неравнокомпонентного сжатия будет иметь вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2\sqrt{\left(C + \mathrm{tg}\varphi(\lambda\sigma_2 + \sigma_1)\right)\left(C + \mathrm{tg}\varphi(\lambda\sigma_2 + k\sigma_3)\right)}, \quad (6)$$

где $\lambda = \nu/(1-\nu)$ − коэффициент бокового распора.

Можно также обобщить критерий прочности (6) на случай двухфазных сред:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2\sqrt{\left(C + \mathrm{tg}\varphi(\lambda\sigma_2 + \sigma_1 - u)\right)\left(C + \mathrm{tg}\varphi(\lambda\sigma_2 + k\sigma_3 - u)\right)}, \quad (7)$$

где u − поровое давление жидкости.

Таким образом, уравнениями (4) и (5) (плоское и объемное напряжение) описывается вся ветвь пластической деформации от предела упругости до предела пластичности (от точки 1 до точки 3, рис. 2), включая предел прочности (точка 2, рис. 2).

Таким образом, у упругопластических пород на пределе прочности начинают объединяться (укрупняться) сдвиговые трещины, с чем и связывается падение напряжений (то есть накопившейся в образце энергии достаточно для укрупнения трещин и ее частичной диссипации), но они пока также не приводят к срезу всего образца, так как идет процесс их разворота и по ним сохраняется условие специального предельного равновесия. Формирование генерального разлома начинается на пределе пластичности (точка 3).

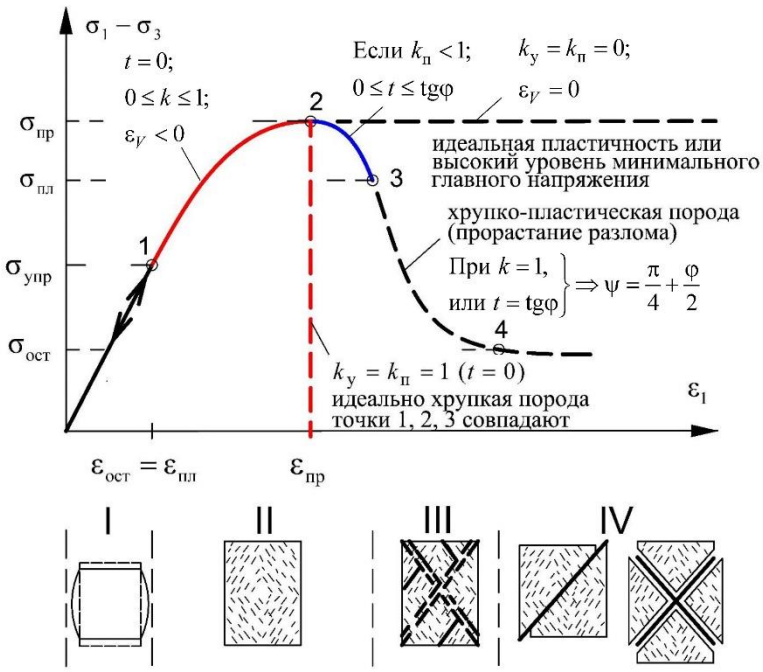


Рисунок 2. Диаграмма деформирования горной породы и стадии ее разрушения

При $k_у = k_п = 1$ (идеально хрупкая порода) порода накопит в себе максимум энергии деформации, однако следует различать способность накапливать в себе энергию и способность ее реализации в динамической форме, то есть ее склонность к динамическим проявлениям. Склонность к динамическим проявлениям определяется способностью породы к активной дилатансии в условиях объемного сжатия.

Точки 2 и 3 (рис. 2) являются точками перехода процесса разрушения на следующий иерархический уровень.

Предлагаемый единый аналитический критерий пластичности, прочности и разрушения горных пород (5), (6), (7) для условий объемного неравнокомпонентного сжатия, в том числе для двухфазных сред, не имеет аналогов (даже эмпирических) и подтверждается экспериментально.

1. А.В. Жабко, Критерии прочности горных пород, *Горный информационно-аналитический бюллетень* 11-1, сс. 27–45 (2021).
2. А.В. Жабко, Н.В. Волкоморова, О механизме и степени влияния промежуточного главного напряжения на прочность горных пород, *Проблемы недропользования* 2 (21), сс. 88–92 (2019).

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЕНТИНА ЧЕЛОВЕКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Д.В. Зайцев[1,2], А.А. Куклина[1,2], П.Е. Панфилов[2]

[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
[2] Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург

Email: zaytsev@m.ursmu.ru

Свойства материалов биологического происхождения в том числе и такие сложнооргазиванные, как дентин зубов человека, завися от концентрации содержания в них воды. Принято считать, что в нормальном состоянии в дентине содержится примерно 25%. Вода роспалагается, как внутри дентинных канало, так и в межтрубочковом дентине. Проведенные данные показывают, что при выдержке дентина в воде, его прочность немного снижается, а деформируемость увеличивается.

Целью данной работы является уточнения этих данных и оценка влияния глубины проникновения воды в дентин человека на его механические свойства. Для этого были испытаны по схеме сдвиг обрацы разной толщины при нормальных условиях и образцы, выдержанные в течении суток в воде.

Было показано, что прочность на сдвиг не зависит от толщины образца и условий испытания, в то время как деформация на сдвиг зависела как от толщины, так и от окружающей среды. Модуль сдвига не зависел от толщины образцов, испытанных в комнатных условиях, и уменьшался с уменьшением толщины образцов, пропитанных водой. При испытании образцов, пропитанных водой, наблюдается увеличение деформации сдвига с ~18% до ~79% при уменьшении толщины образца с 1,5 мм до 0,25 мм. Значительные изменения модуля упругости при сдвиге и деформации при сдвиге дентина в результате насыщения водой заметны в образцах, начиная с толщины 0,75 мм и ниже. Оптимальным образцом для изучения влияния воды на механические свойства дентина будет образец, имеющий толщину в одном направлении, лежащую в диапазоне 0,75 мм - 0,1 мм. Роль воды в механических свойствах дентина будет возрастать с уменьшением размера образца.

Работа выполнена при поддежке гранта РНФ №22-29-00268

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛЬФРАМА

К.И. Перескокова[1], В.П. Пилюгин[2], К.А. Постовалова[2], А.А. Куклина[1,3], Д.В. Зайцев[1,3], П.Е. Панфилов[3]

[1] *Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*
[2] *Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева*, Екатеринбург, Россия
[3] *Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург*

Email: zaytsev@m.ursmu.ru

Благодаря своим характеристикам: высокой температуре плавления, теплопроводности, механической прочности, - вольфрам является основой твердых и жаропрочных сплавов. Целью настоящей работы являлось определение прочностных свойств монокриаталлического вольфрама и сравнению его со свойствами вольфрама, подвергнутого интенсивной пластической деформации.

Образцы для исследований были изготовлены из монокристаллического стержня вольфрама, полученного методом электро-лучевого переплава, с помощью прецизионного 2-х осевого электроэрозионного проволочно-вырезного станка АРТА 123 ПРО. Для механических испытаний изготавливали образцы правильной прямоугольной формы: длина – 12 мм, ширина – 1,5 мм, высота – 1 мм. Механические испытания по схемам 3-х точечного изгиба и сдвига/среза проводили при комнатной температуре на испытательных двухколонных машинах AGS-2kNX и AGX-50kN, соответственно. Обработку полученных данных, включающую в себя построение деформационных кривых и определение основных механических характеристик образцов, проводили при помощи программ Trapezium ™, входящего в комплект установки. Также 4 образца вольфрама подвергали сдвигу под давлением 10ГПа и температуре 300°С на углы: 45°, 90°, 180° и 360°. Микроструктуру и трещины в лабораторных образцах изучали на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS (TESCAN). Испытания на микротвердость выполняли на ПМТ-3.

Перед испытаниями была проведена аттестация микроструктуры исходного состояния образцов после резки на электроэрозионном станке. Было выявлено, что на поверхности образца присутствуют оплавленные частицы и трещины, образующие сетчатую структуру с прямоугольными элементами. Появление трещин вызвано термоударом при резке образца. Глубина трещин небольшая и при условии предварительной механической полировки образцов, их можно не учитывать. Разрушение при трехточечном изгибе происходило в области максимального напряжения – линии приложения нагрузки. Трещин на поверхности не наблюдается. Испытания на срез проводили одновременно по двум плоскостям. Разрушения происодило по одной из плоскостей в области близкой к линии нагружения. В данном случае видны трещины, начинающиеся от края образца. Трещины растут не характерным способом для разрушения хрупких материалов: наблюдаются мосты, искривления трещины и сателлитые трещины перед вершиной основной трещины. Поверхности лабораторных образцов при изгибе и срезе демонстрируют хрупкое поведение. Измерение микротвердости исходного образца и образцов после сдвига под давлением показало, что наблюдается её небольшое увеличение под действием деформации от 5,4ГПа до 7,6ГПа. Отклонение от равномерного увеличения твердости у образца, повернутого на 180°, возможно связано с проскальзыванием образца. Появление дефектов около отпечатка не наблюдается.

ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИФЗ РАН, ОБЗОР ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗА 2015 – 2022 ГОДЫ. КОММЕРЧЕСКИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ.

И.В Фокин[1] , Н.В. Дубиня[1,2]

[1] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Российская федерация
[2] Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

Email: fokin@ifz.ru

В докладе представлен краткий обзор истории организации экспериментальных работ в области петрофизики и геомеханики, проводимых в ИФЗ РАН с 2014 года.

В первую очередь, рассмотрены проблемы и вызовы, связанные с организацией современных лабораторных исследований, нацеленных на нужды нефтегазовой отрасли, в институте академии наук: проблемы отсутствия материалов для экспериментальных исследований; отсутствие материальных и подготовленных кадровых ресурсов; невозможность быстрого получения результатов, обладающих существенной научной новизной и фундаментальной значимостью; отсутствие отечественной нормативно-методической базы, адаптированной под возможности современного экспериментального оборудования; отсутствие полного понимания возможностей оборудования и потребностей нефтегазовой отрасли в геомеханических исследований – как со стороны академической науки, так и со стороны потенциальных заказчиков, – связанное с молодостью геомеханики месторождений нефти и газа как самостоятельной дисциплины. Представлено описание решений, которые были приняты для преодоления этих и других трудностей.

Далее представлено описание лаборатории в современном состоянии: за прошедшие 8 лет типовые лабораторные операции были отработаны до автоматизма, оборудование испытанно во всех допустимых режимах работы; была разработана внутренняя документация лабораторных экспериментальных процедур и представления полученных результатов; был разработан пакет программного обеспечения для обработки результатов испытаний с высоким уровнем автоматизации; была сформирована команда, способная обеспечить работу лаборатории 24/7. Также описаны изменения, внесенные коллективом лаборатории в закупленное изначально оборудование, что позволило создать экспериментальный комплекс, обладающий уникальными возможностями проведения специальных исследований. Отдельное внимание уделено специфике проведения геомеханических исследований для нефтегазовой отрасли: спецификой является малое количество кернового материала, фактическая невозможность проведения измерений на образцах, обладающих близкими механическими свойствами, отсутствие методов достоверного определения напряженно-деформированного состояния пород в ненарушенном состоянии.

В заключительной части доклада представлен краткий обзор основных фундаментальных и прикладных результатов, полученных в лаборатории. Описаны комплексные работы, выполненные в рамках договорных работ с компаниями нефтегазового сектора, нацеленные на решение прикладных задач геомеханики месторождений – расчета устойчивости ствола скважины, дизайна гидроразрыва пласта, прогноза выноса твердой фазы, построения модели трещиноватости среды. Также уделено внимание полученным фундаментальным результатам, связанным с вопросами хрупкого разрушения пород-коллекторов углеводородов [1], определения взаимосвязей между внутренней структурой среды и определяющими соотношениями [2], между

механическими и фильтрационно-емкостными свойствами [3] пород, построения модели трещиноватости среды по комплексу разномасштабных исследований [4] и другими вопросами.

На сегодняшний день лаборатория входит в состав Центра коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» [5].

1. Гарагаш И.А., Дубиня Н.В., Русина О.А., Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Определение прочностных свойств горных пород по данным трехосных испытаний // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. No. 3. С. 57–72.
2. Дубиня Н.В., Белобородов Д.Е., Краснова М.А., Леонова А.М., Тихоцкий С.А. Предварительные исследования возможности предсказания изменений внутренней структуры горных пород, вызванных псевдотрехосным сжатием, на основании зависимости деформаций от напряжений // Процессы в геосредах. 2022. №4 (34). С. 1809–1821.
3. Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Фокин И.В., Патонин А.В., Шаталина Е.И., Сергеев Д.С., Леонова А.М., Егоров Н.А. Эволюция проницаемости горных пород в процессе разрушения // Триггерные эффекты в геосистемах, Тезисы VI Международной конференции, г. Москва, 21–24 июня 2022 г. С. 104-105.
4. Баюк И.О., Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А. Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов // PROНефть. 2019. No. 3. С. 11–17.
5. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. No. 2. С. 1–12.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН ГРП В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ СО СЛОЖНЫМ МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ НА МИКРОМАСШТАБЕ

В.А. Начев[1], Д.А. Тауренис[1,2], С.Б. Турунтаев[1]

[1] Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН)
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Email: nachev@phystech.edu

Нетрадиционные породы-коллекторы углеводородов, включая нефтяные и газовые сланцы, обладают определенной аккумулирующей способностью с точки зрения флюидонасыщенности, а также абсолютной и фазовой проницаемостей. Одним из основных методов увеличения зон дренажа вокруг добывающих скважин является технология гидравлического разрыва пласта (ГРП). Однако эффективность ГРП на месторождении все еще плохо прогнозируется и, следовательно, часто недостаточно улучшает приток углеводородов к стволу скважины. Одним из возможных способов повышения эффективности ГРП в нетрадиционных плотных породах-коллекторах является создание обширной сети вторичных оперяющих трещин, происходящих из первичных основных трещин.

Одним из наиболее новых и перспективных инструментов, используемых в данной работе для понимания физико-химических процессов, протекающих в пласте при использовании современных технологий разработки ГРП и их оптимизации, является цифровой анализ керна. Неоспоримое преимущество такого моделирования состоит в полном учете в модели составных элементов породы: пустот (пор, каверн, трещин) и

частей минерально-органического скелета (матрицы), включая минеральные зёрна и аморфные фрагменты.

Представленная работа направлена на разработку и валидацию интегрированного экспериментального/численного подхода для снижения неопределенностей в цифровых моделях (ЦМ) породы, используемых для механического моделирования, а также на применение надежных ЦМ с уменьшенными неопределенностями для моделирования распространения трещин в породе-коллекторе на масштабе пустоты. Такой инструмент позволит понять, как следует изменять рабочие параметры операции гидроразрыва пласта, чтобы получить оптимальную конфигурацию трещины, какова была бы фактическая форма трещины и какие пустоты будут образовываться при гидроразрыве пласта при фильтрации жидкости.

В данной работе представлены подготовка интегрированных ЦМ на основе данных о минеральном составе, структуре и механических свойствах образцов исследуемой породы, моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) и распространения трещин в трехмерных случаях в процессе закачки жидкости ГРП в рамках упругой модели с учетом сложной геометрии контактов между минеральными зернами.

Для моделирования распространения 3D-трещины мы выполняем несколько шагов. На первом шаге, проводится микроструктурное описание породы с использованием методов компьютерной томографии, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии и рентгеновских методов. Геомеханическое описание породы включало набор лабораторных методов, таких как многостадийные испытания на прочность при сжатии, испытания на прямое растяжение, бразильские испытания на непрямое растяжение, микро- и наноиндентирование. Затем мы обрабатываем полученные данные, совмещая 2D-данные (СЭМ и QEMSCAN) с 3D-данными (КТ) и выбираем целевые репрезентативные объемы, представляющие интерес для моделирования. В конце, мы подготавливаем цифровые модели горных пород с помощью генерации сетки, заполнив модель механическими свойствами, определив контакты, параметры закачки и установив граничные условия. Затем, мы моделируем НДС в цифровых моделях горных пород и получаем конфигурации разветвленных трещин [1-3].

На рисунке 1 представлен пример подготовленной ЦМ для моделирования процесса фильтрации жидкости ГРП из поры в матрицу образца породы, зона роста трещины в матрице горной породы и форма рассчитанной трещины.

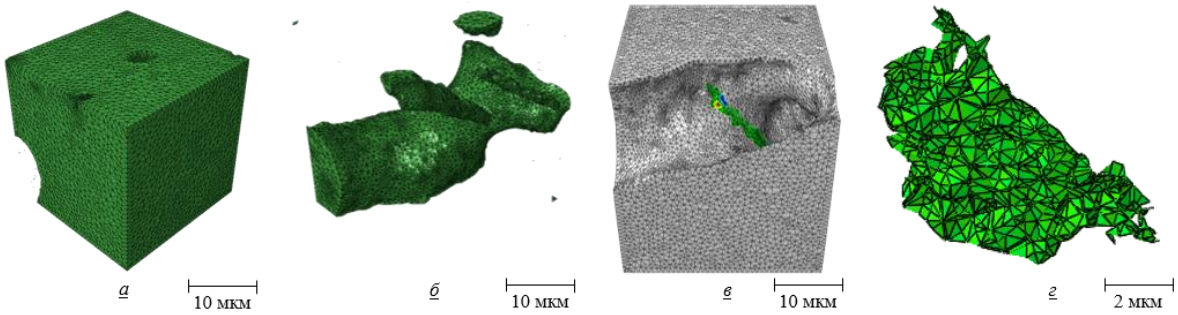


Рис. 1. Пример подготовленной модели для моделирования процесса фильтрации флюида из поры в матрицу: а) трехмерная сетка матрицы; б) трехмерная сетка порового пространства; в) зона роста трещины в матрице горной породы; г) форма трещины.

В результате мы подготовили интегральную модель, которая описывает распространение трехмерных трещин в микромасштабе и учитывает гранулированный состав, структуру образца, упругопластические свойства, условия межзеренных контактов минералов, содержащихся в образце и условия закачки жидкости ГРП. Проведенное численное упругопластическое моделирование выявило особенности зарождения и распространения трещин в гетерогенных 2D и 3D моделях со сложной геометрией контактов между минералами. Мы предложили теоретический метод, связывающий полученные результаты численного моделирования НДС и геометрии трещины с давлением нагнетания жидкости во время операций гидроразрыва пласта для достижения максимального раскрытия трещины на месторождении.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

1. Nachev V. A., Kazak A. V. and Turuntaev S. B. 2020. “3D Digital Mineral-Mechanical Modeling of Complex Reservoirs Rocks for Understanding Fracture Propagation at Microscale.” SPE Russian Petroleum Technology Conference. https://doi.org/10.2118/201979-MS.
2. Начев В.А., Турунтаев С.Б. Моделирование процессов механического разрушения пород-коллекторов на микроуровне // Геофизика. 2021. № 4. P. 29–34.
3. Nachev V., Kazak A., Turuntaev S. 3D Digital Mineral Mechanical Modeling of Complex Reservoir Rocks for Investigation of Fracture Propagation at Microscale // Proceedings of the 9th Unconventional Resources Technology Conference. Tulsa, OK, USA: American Association of Petroleum Geologists, 2021.

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГИДРОРАЗРЫВУ ПЛАСТА: СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Е.В. Новикова[1], М.А. Тримонова[1], Е.В. Зенченко[1], С.Б. Турунтаев[1]

[1] Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН

Email: helenvn97@gmail.com

В последнее время все больше внимания уделяется исследованиям методов и технологиий для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти. К такого рода запасам можно отнести нефтяные залежи, которые размещаются в трудно доступных регионах, а также в районах со сложной геологической структурой. На данный момент гидроразрыв пласта (ГРП) является самым распространенным и стабильным методом интенсификации нефтедобычи. Сам процесс гидроразрыва заключается в механическом воздействии на нефтеносный пласт путем закачки жидкости разрыва под давлением в предварительно пробуренной скважине. Для корректного проведения необходимо знать параметры жидкости разрыва, а также характеристики горного массива, в котором проводится разработка. Одной из таких важных характеристик породы является прочность на одноосное растяжение [1, 2]. В данной работе рассматривались два метода определения данного параметра.

Классическим методом определения прочности на одноосное растяжение материала является «бразильский» тест [3]. Была проведена серия лабораторных экспериментов на искусственных образцах по определению прочности на одноосное растяжение «бразильским» методом (Рис. 1 а)). В экспериментах использовались водонасыщенные образцы модельного материала из смеси гипса с цементом, который в дальнейшем использовался для моделирования процесса гидроразрыва. Характерные

размеры образцов: диаметр - 40 мм, длина - 42 мм. Среднее экспериментальное значение прочности на одноосное растяжение получилось равным 0,80 МПа.

а) б)

Рис. 1. а). Разрушенный образец после испытания «бразильским» методом. б) Разрушенный образец после проведения лабораторного эксперимента по гидроразрыву пласта.

Однако, в некоторых источниках [1, 2] предполагается, что прочность на растяжение можно определить, зная давление повторного раскрытия трещины ГРП. Для проверки данной теории было проведено три двухстадийных лабораторных эксперимента по гидроразрыву пласта. Для этого использовалась уникальная лабораторная установка [4], которая позволяет создавать в модельном образце трехосное поле напряжений. Конструкция установки состоит верхней и нижней крышек, в кольцевое углубление (диаметром 43 см, глубиной 7 см) заливается моделирующий материал, в котором после его высыхания будет проводиться гидроразрыв. Литостатическое давление на моделируется путем заполнения жидкостью под давлением герметичного пространства в верхней крышке над образцом, а боковое – путем заполнения медных камер в боковой стенке-кольце газом или жидкостью под давлением. Далее в предварительно подготовленную скважину в модельном образце производится закачка жидкости с постоянным расходом, в результате чего образуется трещина ГРП (Рис. 1 б)).

В данном случае все эксперименты проводились в два этапа. Первый представлял собой стандартный лабораторный эксперимент по гидроразрыву пласта [4]. Второй же этап заключался в повторном проведении ГРП с целью прорастить уже существующую трещину. В результате для каждого эксперимента были получены зависимости давления от времени, по которым возможно определить давления первичного и вторичного раскрытия трещины ГРП (Рис. 2). После анализа экспериментальных кривых давления

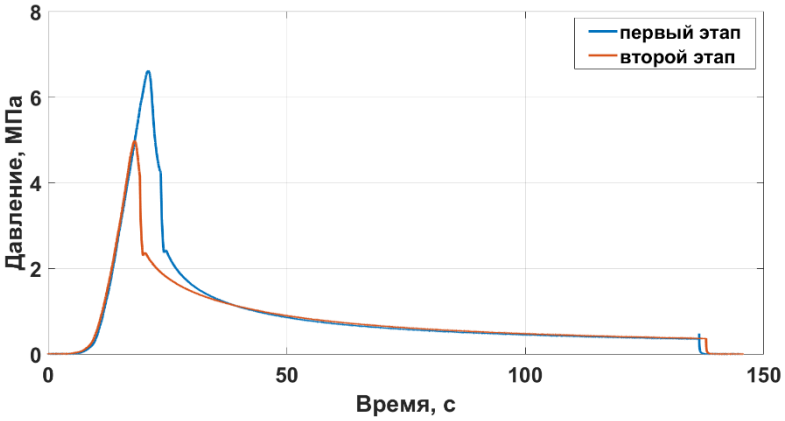


Рис. 2. Пример зависимостей давления от времени, полученных после проведения двухстадийного эксперимента по ГРП.

итоговое экспериментальное значение прочности на одноосное растяжение составило 1,92 МПа.

Экспериментальные оценки прочности на одноосное растяжение для двух разных методов существенно различаются. Это может быть связано с различными условиями проведения экспериментов по разрушению модельного материала. Сравнение результатов, полученных для двух методик, показало, что для моделирования гидроразрыва пласта на реальных месторождениях стоит учитывать этот факт и, по возможности, использовать второй метод определения прочности на одноосное растяжение разрабатываемой горной породы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

Ссылки

1. J.D. Bredehoeft, R.G. Wolff, W.S. Keys, E. Shuter, Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado. Geol Soc Am Bull. 1976;87:250–8.
2. J. Zhang, J.C. Roegiers, Discussion on “Integrating borehole-breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan.” Tectonophysics. 2010;492:295–8.
3. М.А. Иофис, Основы механики горных пород. Недра, Ленинград. 1989.
4. M. Trimonova, N. Baryshnikov, E. Zenchenko, P. Zenchenko, S. Turuntaev, The Study of the Unstable Fracure Propagation in the Injection Well: Numerical and Laboratory Modeling. SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2017.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССУ РАЗРУШЕНИЯ

А.Н. Кочанов[1], С.А.Кочанов[2]

[1]. Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН
[2] Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Email. kochanov@mail.ru

Характерной особенностью горных пород является их неоднородность, под которой понимают пространственную изменчивость их строения, состояния и свойств, обусловленную особенностями генезиса, историей развития и динамикой эндо- и экзогенных процессов. *Неоднородность горных пород* проявляется при любых масштабах исследования, носит многоуровневый характер и является фактором, влияющим на процесс разрушения, так как механическое поведение и деформирование, а также развитие повреждений в горных породах, зависят от прочностных и упругих свойств отдельных минералов, что затрудняет оценивать геомеханические процессы на базе математических и компьютерных моделей. Макроскопические испытания образцов, например в условиях одноосного сжатия или растяжения, не обеспечивают взаимосвязи между микроструктурной неоднородностью и свойствами отдельных минералов и реакцией на деформацию, а понимание их механических свойств имеет жизненно важное значение для соответствующих инженерных приложений.

Неоднородность массива горных пород проявляется не только за счет залегания различных типов пород, но и в виде трещиноватости, которая возникает в горных породах при природных и техногенных процессах. Для оценки степени трещиноватости

массивов горных пород используется акустический показатель A_t, определяемый по формуле $A_t = (Cp_1/Cp_2)^2$, где Cp_1 и Cp_2 — скорость упругих колебаний в образце породы и в массиве. В зависимости от степени развития трещиноватости массивов этот показатель может принимать значения от 0,6-1,0 для практически монолитных пород и до 0,1 для весьма трещиноватых мелко блочных пород [1]. Неоднородность на уровне образцов обусловлена полиминеральным составом горных пород, а также локальными остаточными напряжениями и наличием микродефектов.

Для изучения неоднородности образцов горных пород и их исходной поврежденности при проведении лабораторных экспериментов используем метод неразрушающего контроля ультразвуковой, а также микро- и наноиндентирование. Сразу отметим, что при проведении нами ультразвуковых исследований характерный размер образцов составлял 25 (50)х20(25)х15(12) см, а для микро- и наноиндентирования – 0,5-1,0 см.

Ультразвуковой метод широко известен и давно применяется при решении задач, связанных с оценкой свойств, состояния и структурных особенностей горных пород, их изменений в результате внешних воздействий [2,3]. Специфика распространения упругих волн в неоднородных средах заключается в том, что изменение кинематических и динамических характеристик волн связано не только с геометрией фронта и поглощением, но и с процессами рассеяния волн неоднородностями. Характер этих процессов зависит от соотношения размеров неоднородностей и длины волны.

Метод микро- и наноиндентирования сравнительно новый метод, который в настоящее время становится все более популярным в связи с разработкой нового класса оборудования и превратился в универсальный инструмент, позволяющий изучать закономерности деформационного поведения материалов на разных масштабных уровнях, варьируя нагрузку, глубину и время нагружения [4,5]. Для изучения локальных механических параметров различных горных пород и минералов, включая модуль Юнга, твердость, вязкость разрушения, свойства ползучести и предел прочности при растяжении, с помощью этого метода проведены в последнее время многочисленные испытания, основные результаты которых представлены в обзоре [6].

В качестве информативного параметра ультразвуковых исследований была принята скорость продольных волн. Методика определение этого параметра хорошо отработана, и оценка состояния образцов горных пород осуществлялся по схеме прозвучивания, основанной на использовании прямых волн при расположении излучателя и приемника колебаний на противоположных гранях образца. В результате ультразвуковых исследований образцов различных горных пород отмечается, что их большинство в отдельных точках измерения характеризовались значительным разбросом значений скорости продольных волн, а также акустической анизотропией. Это обусловлено, очевидно, локальными внутренними напряжениями и их микроструктурными особенностями, наличием микротрещин.

В качестве примера в табл. 1 приведены значения скорости продольных волн в образце песчаника с перемещением излучателя и приемника с шагом 3 см. №1 это первоначальные измерения, №2 это те же самые измерения в тех же точках через 38 суток, №3 – через 356 суток. Анализируя эти зависимости, можно также отметить значительное увеличение скорости с момента первоначальных ультразвуковых измерений образцов, находящихся в естественном состоянии, что при всех прочих постоянных условиях, очевидно, связано с фактом их проведения и, соответственно, с ультразвуковым воздействием, а с другой стороны свидетельствует о наличии остаточных напряжений и первоначальной поврежденности локальных объемов образцов. При этом для образцов одного месторождения, изготовленных из одного

блока, характер распределений значений скорости продольных волн, ее абсолютные значения могут существенно различаться.

Таблица 1 Значения скорости продольных волн в образце песчанике (м/с) с течением времени ультразвуковых наблюдений

NN	Точки ультразвуковых измерений с шагом 3 см								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2560	2210	2070	2070	2250	2330	2560	2840	3050
2	3280	3200	2910	3050	3280	3370	3460	3370	3560
3	4270	4270	4270	4270	4270	4570	4570	4570	4570

Концепция минимальной и максимальной скорости для образцов горных пород, связанная с их напряженно-деформированном состоянием, очевидно, впервые рассматривалась в работе [7]. В рамках данной концепции для оценки неоднородности локальных объемов образца введем акустический показатель степени структурной неоднородности образцов горных пород A_c в виде: $A_c=(Cp_ф,/Cp_м)^2$, где $Cp_ф$ — фактически измеренная скорость упругих колебаний в локальном объеме образца и $Cp_м$ — максимально возможная скорость для данного типа горной породы.

Как показывают эксперименты в условиях динамического воздействия на образцы показатель A_c определяет степень их поврежденности (в определенном смысле степень их неоднородности) и размер зоны, где имеет место изменения скорости продольных волн. Чем меньше значения показателя A_c, тем больше размер и степень поврежденности образцов при динамическом воздействии. Следует отметить, что после динамического воздействия взрывного типа в образцах песчаника наблюдается закономерное изменения скорости продольной волны с расстоянием от его источника.

Для оценки микроструктурной неоднородности и локальных свойств горных пород и отдельных минералов использовался метод микро и наноиндентирования, основные результаты применения которого, полученные в экспериментальном научном центре “Нанотехнологии и наноматериалы” ТГУ им. Г. Р. Державина, представлены в работах [8,9].

С целью определения модуля Юнга и твердости образцов горных пород проведены испытания с использованием индентора NanoIndenter G 200 в квазистатическом режиме при заданной глубине внедрения. Результаты исследований упругих и прочностных параметров горных пород представлены в табл. 2. Глубина внедрения индентора для кварцита и песчаника составляла 890, для доломита - 2450, для гранита 420 нм. Максимальная нагрузка для кварцита, песчаника, доломита равна 100 мН, для гранита – 30 мН. Статистические результаты проведенных испытаний приведены в табл. 3, анализируя которых можно отметить, что наблюдается разброс значений в образцах горных пород по упругим и прочностным свойствам. В образцах песчаника при определении модуля Юнга и твердости результаты часто отличались по величине показателей на порядок, что воспринималось как ошибка измерений. Разброс значений показателей свойств песчаника мог быть обусловлен наличием пористости, которая существенным образом влияла на процесс его деформирования.

Степень неоднородности породы по твердости или модулю Юнга, как и по любому ее свойству, оценивается коэффициентом вариации $K_{вар}$. Это важный показатель в плане информации о возможном характере развития процесса разрушения горных пород.

Таблица 2. Результаты испытаний свойств горных пород

Горная порода	Кварцит	Песчаник	Доломит	Гранит
Модуль Юнга, ГПа	155-186	50-105	53-82	71-76
Твердость, ГПа	5-9	4-12	4-8	9-10

Таблица 3. Некоторые статистические оценки свойств горных пород

Показатели	Кварцит	Песчаник	Доломит	Гранит
Коэффициент вариации, %	9.1/17.8	9.0/14.4	20.1/57.0	5.0/7.1

*- в числителе данные для модуля Юнга, а в знаменателе – для твердости

Закономерности процесса деформирования и разрушения материалов характеризуются также еще одним важным параметром свойств – вязкостью разрушения. Для оценки вязкости разрушения различных минеральных компонентов и их межзереных границ использовался динамический наноиндентометр ПМТ-NI. При проведении испытаний применялся трехгранный алмазный индентор Берковича. Прикладываемая нагрузка Р варьировалась в диапазоне от 1 мкН до 500 МН. Длина трещин в углах отпечатка измерялась с помощью оптического микроскопа Axio Observer, Carl Zeiss (Германия).

Для всех отдельных минеральных компонентов кварцита и на границах минеральных зерен определены значения вязкости разрушения K_{1c} , представленные на рис. 1 в виде средних значений, а также определены значения вязкости разрушения на границе раздела отдельных минералов. Можно отметить довольно низкую вязкость разрушения как отдельных кварцевых зерен K_{1c} = 0.5 МПа·м$^{1/2}$, так границ срастания зерен кварц-магнетит и кварц-гематит соответственно 0.68 и 0.38 МПа·м$^{1/2}$. Выполнено также определение вязкости разрушения для различных пород (Рис. 2).

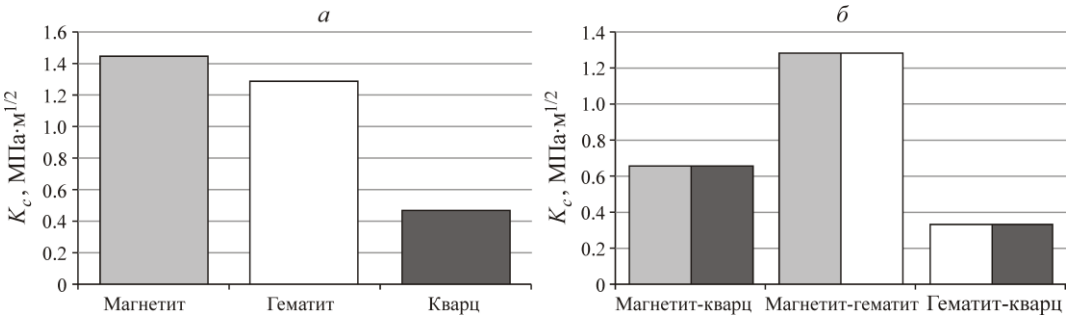


Рисунок 1. Значения вязкости разрушения для породообразующих минералов (а) и на границе их минеральных зерен (б)

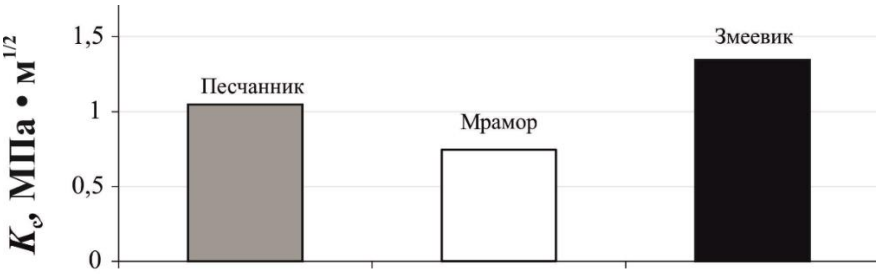


Рисунок 2. Значения вязкости разрушения K_c для образцов различных горных пород

Исследования показали перспективность использования метода микро- и наноиндентирования для оценки прочностных и упругих характеристик горных пород, а также возможность определения вязкости разрушения, что имеет принципиальное значение при решении задач разрушения горных пород. Изучение неоднородности образцов горных пород на микроуровне возможно с использованием ультразвукового метода по скорости продольных волн и метода микро и наноиндентирования как оценка вариации прочностных и упругих параметров отдельных минералов и их границ.

1. О.П. Якобашвили, Сейсмические методы оценки состояния массивов горных пород (ИПКОН РАН, Москва,1992).
2. X. Chen, Z Xu, Bull Eng Geol Environ 76, pp. 661–669 (2017).
3. O.O Blake, D.R. Faulkner, Rock Mech Rock Eng 53, pp. 4001–4013 (2020).
4. Ю.И. Головин, Физика твердого тела,63, сс. 4-42 (2021).
5. A.C. Fischer-Cripps Nanoindentation (Springer New York, London, 2011).
6. Z.Ma, P.G. Ranjith, Z. Chengpeng, Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.,60, pp.1-27 (2020).
7. Л.В. Шаумян Природа физико-механических свойств массивов горных пород. (МГУ, Москва,1988).
8. С.Д. Викторов, Ю.И. Головин, А.Н. Кочанов, А.И. Тюрин, А.В. Шуклинов, И.А. Шуварин, Т.С. Пирожкова, ФТПРПИ, 4, сс. 46–54 (2014).
9. Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, С.Д. Викторов, А.Н. Кочанов, Т.С. Пирожкова, Изв.РАН.сер.физ.,81. сс.390-394 (2018).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОБРУШЕНИЙ УСТУПОВ КАРЬЕРА ПО ДАННЫМ КОМБИНИРОВАННОЙ СЪЕМКИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

И.А. Гузеев

УФ АО «ВНИМИ»

Email: guzeevia83@gmail.com

При проектировании скальных карьеров и в процессе их эксплуатации важно прогнозировать возможные структурные обрушения уступов и определять их вероятность. Для этого используют данные о направлениях трещин, так как устойчивость откосов скальных уступов, по общепринятым допущениям, может быть нарушена только в результате структурных обрушений. Обрушение может произойти по нескольким механизмам: сдвиг по плоскости, сдвиг клиновидного блока и опрокидывание блоков [1].

Для получения наиболее точных результатов расчетов устойчивости, необходимо производить детальную съемку трещиноватости и выявлять пространственные закономерности в направлении трещин, то есть определять параметры систем трещин.

Для этого может использоваться комбинированный подход, сочетающий традиционное и трехмерное (цифровое) картирование уступов.

Традиционный метод картирования основан на полевом измерении направлений трещин с помощью горного компаса или электронного трещиномера непосредственно на карьере. Этот метод позволяет изучать не только направления трещин, но и другие характеристики трещин, такие как интенсивность трещиноватости, выветрелость, обводненность, состояние стенок трещин, заполнитель трещин. Все эти факторы также необходимо учитывать при оценке устойчивости. Однако традиционный метод картирования обладает низкой производительностью и неэффективен для сбора данных с труднодоступных мест, высота съемки ограничена двумя метрами.

Процедура трехмерного (цифрового) картирования откосов предполагает конструирование цифровой копии участка съемки. Для этого используются технологии LiDAR сканирования или фотограмметрической съёмки.

Для фотограмметрической обработки обнажений используются привязанные в пространстве снимки и, опционально, результаты LiDAR сканирования. Наиболее производительным и безопасным методом сбора снимков является съемка с квадрокоптера. Для достижения необходимой точности и детализации моделей, фотографии должны быть разрешением не менее 2 см на пиксель. Построение полетных заданий для беспилотника на высоте 25-40 метров обеспечивает такое качество снимков. Выполнение съемки на 1 квадратном километре обнажений с такими параметрами полета занимает один день полевых работ.

Другой подход – сканирование с применением LiDAR датчика, интегрированного в смартфон (например, Apple IPhone линейки Pro). Оно осуществляется на точках традиционного картирования откосов, а получаемые модели обладают небольшим размером, достигая первых десятков метров в ширину и 2-3 метров в высоту. Такие модели характеризуются более высокой детальностью, чем модели полученные по результатам съемки с дрона, благодаря небольшому расстоянию между объектом съемки и LiDAR датчиком с камерой.

Оптимальным решением является комбинирование методов для получения максимального количества данных и обеспечения наилучшей точности. Например, по результатам всего двух дней полевых работ, при умеренной детальности обработки моделей можно собрать порядка 25 000 измерений направлений трещин. Более того полученные модели могут использоваться для оконтуривания границ литотипов, тектонических нарушений, осыпей, участков дренирования подземных вод, и других геомеханических особенностей массива.

Рис. 1 – Выделение ориентации трещин на трехмерных моделях

После сбора данных о направлениях трещиноватости, проводится разделение месторождений на структурные домены и определение параметров систем трещин и их разброса, что становится основой для последующего расчета устойчивости по специальным схемам [2]. Для расчета вероятности обрушений откосов на основе собранных данных проводится кинематический анализ с помощью программы Digger Slope, которая позволяет производить массовые расчеты устойчивости по всему карьеру одновременно. Дополнительное преимущество программы Digger Slope - возможность объединения результатов расчета в сектора проектирования. В этих секторах определяются оптимальный угол откоса уступа и ширина бермы.

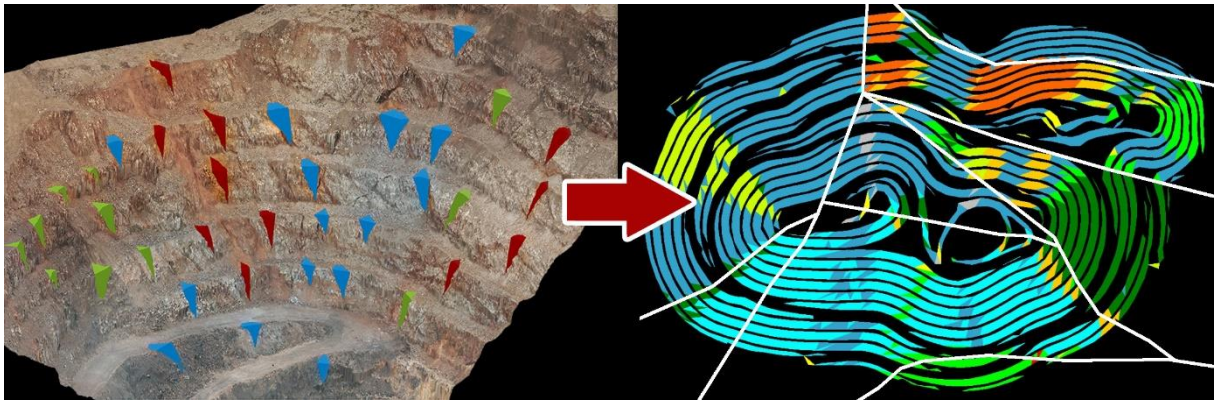


Рис. 2 – Визуализация клиновидных обрушений и районирование по их вероятности

Результаты анализа, проведенного для фактического контура карьера, позволяют спрогнозировать возможные обрушения при развитии горных работ, а также определить объемы этих обрушений. На основе полученных результатов можно подобрать такие параметры откосов, чтобы вероятность и параметры обрушений были приемлемыми.

Применение сочетания описанных методов позволяет подобрать оптимальный угол уступа, ширину бермы и генеральный угол борта, что позволяет снизить объемы вскрыши и обеспечить допустимую вероятность возможных обрушений.

1. Руководство по проектированию бортов карьера. Guidelines for open pit slope design: научное издание / под ред.: Д. Рид, П. Стейси; пер. с англ. А. С. Бентхен; науч. ред. пер. А. Б. Макаров. Екатеринбург: Правовед, 2015. 528 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». М., 2020.

О НЕОБХОДИМОСТИ ЭКСПЛИЦИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ГЕОМЕХАНИКЕ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕРАХ

Б.Т. Ильясов

УФ АО «ВНИМИ»

Email: bt.ilyasov@gmail.com

Известно, что распространенными на сегодня численными методами механики, такими как метод конечных элементов или метод конечных разностей, трещинообразование и разрушение материала не моделируется эксплицитно (т.е. в явном виде), и может учитываться только неявно, посредством изменения свойств материала. В то же время существуют методы дискретных элементов и комбинированные методы, которые эти процессы воспроизводят эксплицитно.

В последние годы с применением программы Prorock, реализующей комбинированный метод конечно-дискретных элементов [1], получены новые практические примеры, в которых эксплицитное моделирование процесса разрушения позволило получить результаты, которые невозможно получить иными способами. Перечислить данные применения можно следующим образом:

- Построение зон обрушения и трещин (разрыва сплошности) в подрабатываемом массиве горных пород;
- Определение коэффициента запаса устойчивости при деформировании уступа, сложенного тонкими слоями пород обратного падения (*англ.* flexible toppling);
- Определение параметров искусственного поля напряжений при отработке месторождения системами с обрушением [1];
- Расчёт параметров анкерного крепления при помощи численного моделирования при небольших запасах устойчивости [1];
- Прогнозирование обрушений, вызванных как структурами, так и напряжениями.

Построение зон обрушения и трещин в подрабатываемом массиве важно для недопущения опасного влияния на вышележащие подземные выработки и объекты земной поверхности. Наиболее актуальна данная задача при подработке водоносных горизонтов и гидрологических объектов поверхности. Так как в модели эксплицитно моделируется разрушение и фрагментация горных пород, имеется возможность оценки удельного объёма пустот в зоне обрушения и даже районирования по данному показателю. Кроме того, можно измерить на модели величины раскрытия трещин в зоне разрывов сплошности. Из этих показателей можно определить показатели фильтрации, необходимые для расчета водопритоков в выработки через подработанный массив.

Также установление границ зон обрушения и трещин требуется при комбинированной отработке месторождения, так как в данных зонах устойчивость уступов и бортов будет пониженной. Исходя из определения, в зоне обрушения сцепление должно быть околонулевым (например, согласно ФНиП «Правила обеспечения устойчивости…» [2] сцепление принимается равным 20 кПа) из-за чего уступы в этой зоне необходимо выполаживать для обеспечения устойчивости как собственно уступов, так и борта карьера. На рис. 1 показаны два конечных контура карьера, которые построены с применением двух подходов: численного МКДЭ-моделирования и углов сдвижения, определенных эмпирическим способом.

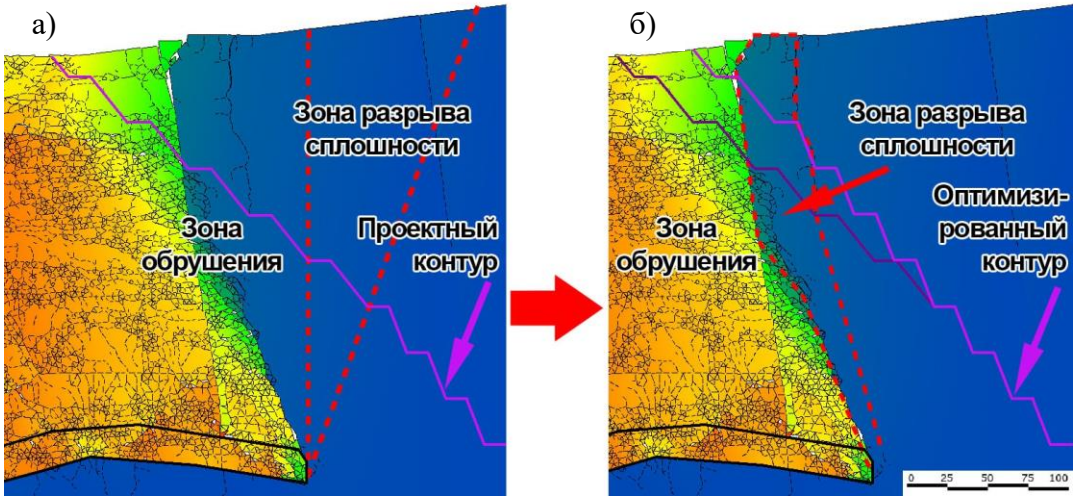


Рис. 1 – Сравнение контуров карьера в зонах обрушения и трещин, обоснованных с применением: а) эмпирических подходов и б) моделирования

Необходимо отметить, что представленные на рис. 1 результаты моделирования подтверждаются данными наблюдений на земной поверхности, а именно величиной оседаний поверхности, расположением воронок обрушения, величиной угла разрыва.

Из рис. 1 можно увидеть, что прогнозирование меньших по размеру зон обрушения и трещин позволяет рекомендовать более крутой борт карьера. Оба контура карьера, приведенных на рисунке 1, обоснованы расчетами устойчивости уступов и борта методом предельного равновесия, разница лишь в границах зон обрушения и уступов.

Определение коэффициента запаса устойчивости уступов при деформировании уступа, сложенного тонкими слоями пород обратного падения (*англ.* flexible toppling), является задачей, не решаемой существующими методами, что является общепризнанным фактом [3]. Стандартные методы предельного равновесия не позволяют учесть слоистость, круто падающую в борт. Для расчёта топплинга применяется метод Гудмана, однако он даёт заниженные результаты при небольшой мощности слоя. Например, для одного из карьеров северо-запада РФ методом Гудмана был получен равным КЗУ=0,68. При этом уступ является устойчивым (т.е. КЗУ >1,3), что известно по натурным наблюдениям. В результате расчёта при помощи МКДЭ-моделирования получен КЗУ>2,0 и данный результат представляется наиболее реалистичным.

При прогнозировании устойчивости подземных выработок появление локальных разрушений в массиве приводит к локальным изменениям напряжений в массиве, что в свою очередь влияет на процесс дальнейшего развития процесса разрушения. В массиве могут образовываться небольшие трещины отрыва (*англ.* splitting), которые при накоплении могут вызывать формирование крупных поверхностей разрушения, опасных для устойчивости выработки [1]. Данный процесс сильно влияет на устойчивость подземных выработок при больших глубинах, при этом он может быть спрогнозирован только при эксплицитном моделировании разрушений.

1. Ильясов Б.Т., Кульсаитов Р.В., Неугомонов С.С., Солуянов Н.О. Оценка устойчивости закрепленной выработки на основе численного моделирования методом конечно-дискретных элементов // Горный журнал, 2023, №1. С. 118-123. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20.
2. ФНиП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утв. приказом РТН №439. 2020.
3. Руководство по проектированию бортов карьера. Guidelines for open pit slope design: научное издание / под ред.: Д. Рид, П. Стейси; пер. с англ. А. С. Бентхен; науч. ред. пер. А. Б. Макаров. Екатеринбург: Правовед, 2015. 528 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ.ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ

Н. Н. Ефремовцев, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва

Email:noee7@mail.ru

Аннотация. Усложнение геомеханических условий разработки месторождений с увеличением глубины и соответственно возрастанием горного

давления требует совершенствования в различных направлениях расчетов параметров буровзрывных работ на основе исследований закономерностей изменения напряженно-деформируемого состояния (НДС) и фрагментации взрываемого массива.

В данной работе приводятся результаты таких исследований участка горного массива с обнаженной поверхностью в условиях плоской деформации методом сглаженных частиц при взрывании шпуровых зарядов щадящего и дробящего действия. Установлены закономерности изменения напряжений во времени и пространстве и формирование зон разрушения массива в результате воздействия взрыва при наличии внешнего давления и при его отсутствии. Приведены результаты расчетов влияния физико-механических свойств на триггерный эффект разрушения взрываемой среды.

Введение

Актуальность исследований обусловлена необходимостью расширения возможностей управления действием взрыва для получения рациональной фрагментации горного массива в связи с быстро изменяющимися горнотехническими условиями разработки месторождений и ужесточением требований к промышленной безопасности ведения горных работ.

Исследования направлены на развитие теории разрушения горного массива и геомеханическое обоснование инновационных технологий ведения горных работ при комплексном освоении недр. Методология исследований базируется на совместном применении компьютерного моделирования и композиционных имитационных моделей для калибровки численных моделей. Имитационные композиционные модели представляют собой образцы пород и кристаллосырья [1-3] и содержат выделенные цветом зоны действия взрыва на трех уровнях по высоте, позволяющие произвести анализ характера разрушения материала при взрыве заряда.

Предметом исследований являются фундаментальные закономерности, характеризующие разрушение массивов горных пород взрывным способом в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах, а также взрываемых сред в процессе специальных взрывных работ.

Описание моделирования

Проводятся исследования закономерностей влияния характеристик промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) и внешнего давления на:

- интенсивность дробления и параметры зон разрушения и распространения радиальных трещин при различных условиях нагружения взрываемых сред, в том числе горных пород;
- изменения во времени величин напряжений, возникающих во взрываемой среде на различном расстоянии от заряда;
- изменения выхода мелких фракций;
- изменения скорости и расстояния разлета фрагментов.

Взрыв как триггер-эффект зачастую ответственен за приведение в действие того или иного процесса, кардинально изменяющего геомеханическое состояние разрабатываемого массива горной породы. Триггерные эффекты в исследованиях действия подрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ), заключаются, в частности, в разрушении или срыве контактов между отдельными блоками горных пород, которые рассматриваются во взаимосвязи с увеличением уровня напряжений в массиве под воздействием энергии взрыва. Рассматриваются особенности влияния на горную породу воздействия «щадящего» взрыва с применением ВВ АС/ДТ-6 и дробящего действия зарядов ВВ ТНТ и других энергоемких материалов.

Интерпретация результатов экспериментов по взрывному разрушению геосред требует реалистичного моделирования поведения материалов. При изучении взрывных процессов со значительными смещениями и разрушением, соизмеримых по масштабу со структурными неоднородностями среды, необходимо использовать мезомеханический подход. Это позволяет исследовать непосредственно из результатов численного моделирования те физические особенности отклика геосреды на воздействие взрыва, какие не могут быть получены, например, с помощью смесевых моделей, заменяющих структурно - неоднородную среду однородной средой с эффективными параметрами.

Как показал опыт расчетов, наиболее приемлемым для решения задач мезомеханики, в которых рассматриваются процессы взрывного разрушения на масштабе структуры геосреды, является метод сглаженных частиц [4-16]. Отсутствие расчетной сетки позволяет методу (в рамках лагранжева формализма) естественным образом рассчитывать произвольные вращательные и сдвиговые перемещения материала, распад односвязных и слияние многосвязных расчетных областей. Более того, подобные методы дают физически правильную картину эволюции смещения фрагментов материала в тех случаях, когда применение сеточных лагранжевых методов становится в принципе не возможным вследствие неприемлемых искажений расчётной сетки. Для исследования закономерностей управления воздействием взрывного разрушения шпуровых и скважинных зарядов ВВ, имеющих различные конструкции и взрывчатые характеристики были апробированы три типа подходов численного моделирования процессов инициирования динамических событий и интерпретации наблюдательных данных – это решения ряда задач плоской деформации с симметрией слоя, осесимметричной задачи, а также трехмерной задачи разрушения в пределах участка взрываемого блока горной породы. Расчетные схемы осесимметричной и плоской задач позволяют с одной стороны достаточно подробно описать поведение реальных имитационных моделей, с другой - существенно упрощают расчетный анализ процесса.

Для решения рассматриваемых задач были сформулированы краевые задачи в рамках модели упругопластического тела механики сплошной среды, которые решались методом сглаженных частиц, положительно зарекомендовавшим в решении динамических задач геомеханики [6-11]. Преимущества лагранжевой, бессеточной идеологии метода сглаженных частиц позволяют при его использовании определять особенности волновых процессов и характер разрушения и фрагментации геосреды. Выявлены особенности влияния энергетической насыщенности зарядов на кинетику фрагментации разрушаемых горных пород [6].

Решение осесимметричной задачи воздействия взрыва зарядов с воздушными промежутками [9]. позволило, в частности, установить влияния величины зазора между зарядами ВВ ТНТ и зарядной полостью на выход фракций менее 1 мм, а также выявить характер изменения выхода мелкой фракции при изменении величины зазора между зарядом и стенкой зарядной камеры и при замене индивидуальных высокоэнергетических ВВ на смесевые составы, содержащие аммиачную селитру.

Проведена оценка влияния воздушных промежутков и диаметра скважин на равномерность дробления массива горных пород [10,11].

В результате исследований получены функции изменения фрагментации отдельных участков взрываемых сред в зависимости от изменения тангенциальных и радиальных напряжений в характерных точках при решении задач о действии скважинных зарядов в условиях плоской деформации, от характера изменения первого

инварианта тензора напряжений при использовании трехмерных моделей, а также от следующих влияющих факторов:

- физико-механических свойств пород;

-расстояния от зарядов промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) с различной кинетикой выделения энергии;

-удельного расхода ПВВ;

-расстояния до свободной поверхности и ее конфигурации;

-диаметра заряда и расстояния между скважинами;

-величины воздушных промежутков между зарядом и стенкой зарядной полости;

-плотности ПВВ.

На рисунке 1. представлены в графическом виде результаты исследований влияния изменения плотности ВВ на критическую прочность геосреды при которой возникает триггерный эффект ее разрушения.

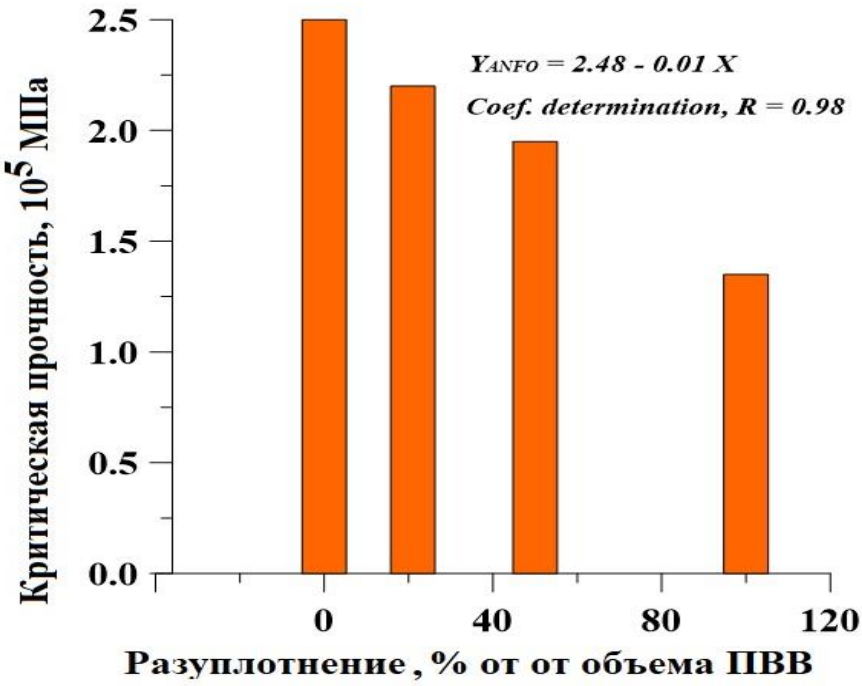


Рис.1. Влияние разуплотнения ПВВ на критическую прочность взрываемой геосреды, при которой возникает триггерный эффект ее разрушения.

В представленном исследовании в условиях плоской деформации методом сглаженных частиц проведено моделирование процесса нагружения и разрушения участка горных пород шпуровым зарядами диаметром 28 мм и 30 мм щадящего и дробящего действия в условиях внешнего давления до (25 МПа) и при его отсутствии.

Образование трещин, субперпендикулярных оси простого растяжения происходит, когда нормальное растягивающее напряжение на поверхности, перпендикулярной оси растяжения, становится выше величины $\sigma_s \approx E/100$ – предела прочности сцепления горной породы на растяжение. Горные породы не однородная

сплошная среда. Присутствуют мелкие трещины и неоднородности, в том числе дефекты на границах зерен. Используемый в расчетах критерий разрушения путем отрыва позволяет определить зоны разрушенного материала при взрывном нагружении.

На рисунке 2 представлены локализация трещин, возникших в результате взрывного воздействия зарядов АС/ДТ-6 и ТНТ на участок массива, изначально не имеющего трещин. Анализ полученных в процессе моделирования данных показал, что зона распространения трещин составляет не менее 70 см от заряда и свободной поверхности.

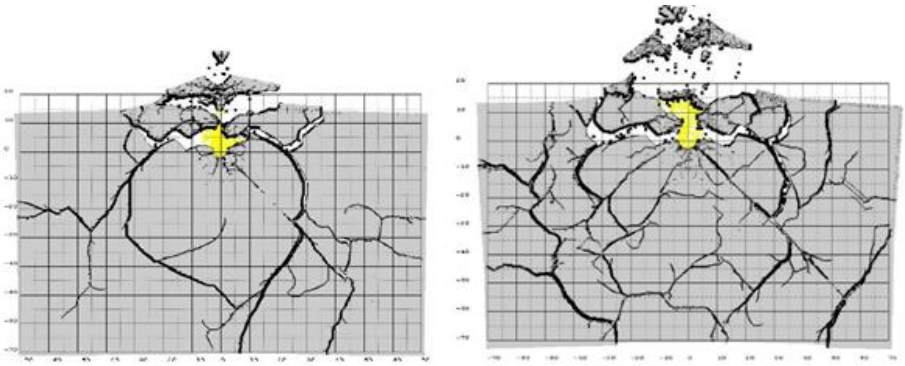


Рис. 2. Локализация трещин при применении заряда щадящего (а) и дробящего действия (б) ТНТ без внешнего давления на разрушаемый взрывом участок геосреды, изначально не имеющий трещин.

При этом среднее расстояние между вновь образованными трещинами в ближней зоне действия взрыва радиусом 25 см составляет 4,54 см и 2,22 см соответственно для заряда щадящего и дробящего действия. Среднее расстояние между трещинами за пределами ближней зоны действия взрыва составило соответственно - 20,4 см и 13,3см. Расчеты с применением метода сглаженных частиц показали, что применение ТНТ вместо АН/ФО -6 приводит к снижению среднего куска взорванной массы на 51% и 35% соответственно в ближней и на участке формирования радиальных трещин соответственно, однако при этом увеличивается в два раза выхода мелких фракций. Влияние кинетики выделения энергии взрыва и систематизации взрываемых сред по степени устойчивости к воздействию взрыва рассмотрены в работах [1, 2]. Особенности изменения во времени и пространстве напряжений, возникающих в разрушаемой среде под воздействием зарядов АС/ДТ-6 и ТНТ рассмотрены нами в работе [6]. Для калибровки моделей за основу взяты деформационно-прочностные характеристики среды и энергетические параметры средств разрушения иммитационных композиционных моделей, использованных при физических экспериментах, проведенных в 2021-2022г на полигоне ИПФХ РАН [3].

На рисунке 3 представлены результаты моделирования методом сглаженных частиц локализации разрушений в результате совместного действия взрыва зарядов с различной энергетической насыщенностью и давления на разрушаемый участок горной породы. Сжатие массива осуществлялось с одинаковой интенсивностью по двум направлениям: параллельно и перпендикулярно свободной поверхности.

Анализ локализации зон разрушения показывает, что при взрывном воздействии зарядов АС/ДТ -6 и ТНТ на сжимаемый участок массива существенно сократилась зона распространения радиальных трещин, а выход мелких фракций в обоих зонах действия взрыва возрос. В результате воздействия давления сформировалась линейные участки

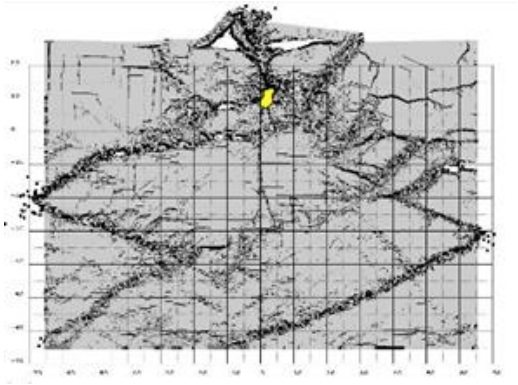


Рис. 3 Локализация трещин при одновременном воздействии на разрушаемый массив взрыва заряда щадящего действия АС/ДТ-6 и давления по двум направлениям.

предразрушения ориентированные преимущественно под углами 35-45 градусов к границе свободной поверхности участка массива. Среднее расстояние между плоскостями разрушения, сформированными воздействием двухстороннего давления и взрывной нагрузки зарядом щадящего и дробящего действия составили соответственно 15,5 см и 11,38 см.

Зависимости изменения во времени показателя напряжения, возникающего во взрываемой среде с применением заряда ТНТ при отсутствии и наличии внешнего давления представлены на рисунке 4.

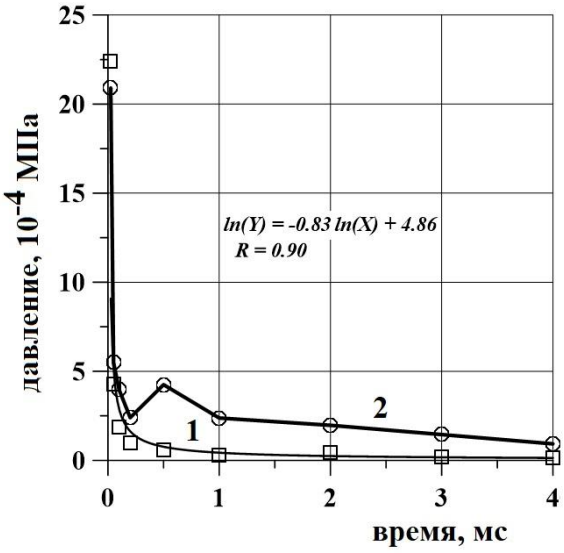


Рис 4. Зависимости показателя напряжения в взрываемой среде с использованием шпурового заряда ТНТ от времени действия взрыва при отсутствии внешнего давления (1) и его наличии.

Заключение

1. Проведены численные эксперименты методом сглаженных частиц комбинированного воздействия на участок массива горных пород давления и энергии взрыва зарядов щадящего и дробящего действия.
2. Установлен характер влияния разуплотнения ВВ на критическую прочность геосреды. Зависимость критической прочности разрушаемой взрывом геосреды при которой возникает триггерныйи эфект ее разрушения от плотности ВВ линейная в пределах исследованного диапазона величин.

3. Установлены особенности локализации радиальных трещин от воздействия энергии взрыва зарядов АС/ДТ-6 и ТНТ на участке не нагруженного массива и при внешнем постоянно действующем давлении. При нагружении модели массива в двух направлениях возникает система трещин, препятствующая распространению радиальных трещин расположенную под углом 35-40 градусов к свободной поверхности.
4. Проведена сравнительная оценка изменения среднего расстояния между трещинами и выхода мелких фракций. Выход мелких фракций при комбинированном воздействии на массив давления и взрывной нагрузки зарядами АНФО-6 и ТНТ увеличился в 2,8 раза по сравнению с аналогичными показателями воздействия взрыва шпуровых зарядов на ненагруженный массив. Что обусловлено существенным отличием величин и арактера изменения во времени напряжений в геосреде при наличии и отсутствии внешнего давления.

1. Ефремовцев Н.Н, Ефремовцев П.Н. Результаты исследования в производственных условиях влияния кинетики выделения энергии взрыва на дробимость горных пород. // ГИАБ. -2015.-№11(58). - С. 17-25.
2. Ефремовцев Н.Н, Ефремовцев П.Н. К вопросу систематизации взрываемых сред по степени устойчивости к воздействию энергии взрыва и классификации средств их разрушения по критерию скорости выделения энергии. // ГИАБ.-2015.-№11(58). - С. 25 - 30.
3. Ефремовцев Н.Н., Лавров В.В., Савченко А.В. Опыт применения композиционных имитационных моделей для оценки дробящего действия взрыва ВВ различной мощности// Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Тезисы докладов. Черноголовка, 2022. С. 286-287.
4. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ - НГУ. - Днепр, - Вып. 1(145). - 2015. - С. 76-82.
5. Шиповский И.Е. Трехмерный расчет разрушения образцов с трещиной // Геотехническая механика. - ИГТМ НАН Украины. - Днепр, 2014. - Вып. 20(1). - 2014. - С. 191-198.
6. Ефремовцев Н.Н., Трофимов В.А., Шиповский. И.Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлинненного заряда // Mining informational and analytical bulletin. № 8.- 2020.- С. 73-85.
7. N.N. Efremovtsev, P.N. Efremovtsev, V.A. Trofimov, I.E. Shipovskii A Procedure for Rock Failure Process Analysis at Various Scales // AIP Conference Proceedings 2509, 020058, 5 pp (2022).
8. Н.Н. Ефремовцев, П.Н. Ефремовцев, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский Результаты численных исследований фрагментации горных пород в пределах взрываемого блока с применением бессеточного метода сглаженных частиц // Взрывное Дело. 2021, 131/88, С. 29 – 45.
9. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Исследование численным методом сглаженных частиц влияния конструктивных особенностей скважинных зарядов на фрагментацию горных пород // Взрывное Дело. 2021, 132/89, С. 27 – 39.
10. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Численное исследование влияния параметров буровзрывных работ на равномерность разрушения массива горных пород. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - Новосибирск. - Том 8. - № 1. - 2021. - С. 73-78.
11. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Исследование закономерностей дробления удлиненными зарядами с применением композиционных моделей и численного моделирования методом сглаженных частиц // Взрывное дело. - 2020 - 127/85. - С. 20-37.
12. Vitaly Trofimov and Ivan Shipovskii. Simulation fragmentation of samples of rock at explosive loading // E3S Web of Conferences Volume 192 (2020) VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2020) -2020. - 01013. – 7 p.
13. N.N. Efremovtsev, V.A. Trofimov, I.E. Shipovskii, Results of Numerical Investigation of Rock Fragmentation by Charges of Different Designs // AIP Conference Proceedings 2504, 030010 (2023). pp. 030010-1 - 030010-5.
14. N.N. Efremovtsev, P.N. Efremovtsev, V.A. Trofimov, I.E. Shipovskii A Procedure for Rock Failure Process Analysis at Various Scales // International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology, edited by V. M. Fomin. AIP Conference Proceedings 2509, 020058, 5 pp. (2022)
15. С.Д. Викторов, Н.Н. Ефремовцев, И. Е. Шиповский, М.О. Долгова. Теоретические аспекты и результаты численных исследований методом сглаженных частиц влияния плотности зарядов на фрагментацию горных пород // Взрывное Дело. 2022, 135/92, С. 15–31.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ КАРБИДОМ ТИТАНА

Адас В.Е.[1], Хазин М. Л.[1], Шайдуров Г.С.[1], Попов Н.А.[2]

[1]Уральский государственный горный университет
[2]Институт химии твердого тела УрО РАН

Email: vintus66@mail.ru

Алюмоматричные композиты, представляют собой передовые материалы с повышенными характеристиками удельной прочности и износостойкости, в том числе при повышенных температурах, коррозионной стойкости и других свойств. Такие материалы используются в горной промышленности при производстве буровых инструментов, буровых головок, зажимов, насосов, крепежных элементов, используемых для работы с горной породой. Они также могут использоваться в авиации, автомобильной промышленности и других отраслях, где требуется легкий, прочный и износостойкий материал.

Целью данной работы является исследование механических свойств композитов Al-TiC 5 % при разном времени перемешивания.

В качестве металлической матрицы использовали порошок алюминия (ПАП-1) чистотой 99,5 % со средним размером частиц 1 мкм. В качестве армирующего материала использовали порошок карбида титана (ТУ 6-09-492-75) чистотой 99,7 % со средним размером частиц 3 мкм. Измерение массы порошка производили на цифровых аналитических весах. В пластиковые емкости объемом 60 мл засыпался порошки Al (1,8 гр.) и TiC (0,2 гр.). Смешивание порошка алюминия и титана проводили механической мешалкой (рис. 1). Скорость вращения емкости с порошком составляла 160 об/мин, при этом каждую минуту направление вращения изменялось на противоположную согласно заданной программе. Время перемешивания составляло: 1, 3 и 6 ч.

При большей скорости перемешивания порошок постепенно налипает на стенки емкости, что ухудшает качество перемешивания. При меньшей скорости перемешивания не достигалось равномерное распределение порошка карбида в объеме матрицы. Поэтому было выбрана скорость перемешивания 160 об/мин [1].

Рисунок 1 – Установка смешивания порошка

Измерение твердости композитов проводили по методу Виккерса на приборе ИТВ-АМ (табл. 1).

Таблица – 1

Влияние времени перемешивания на твердость образца

Материал	Al	Al+5%TiC			
t, перемеш.,ч	-	0	1	3	6
HV, ср.	29,8	32,9	31,8	34,2	30,7

С увеличением времени перемешивания наблюдалось повышение твёрдости образцов. С дальнейшим увеличением времени перемешивания твёрдость образцов начинала уменьшаться. Поэтому оптимальное время перемешивания для данного композита было выбрано равным 3 ч [2].

Увеличение времени перемешивания позволяет повысить равномерность распределения частиц карбида в матрице и повысить прочность материала. В процессе перемешивания происходит захват газа частицами порошка, что при прессовании образцов приводит к их пористости. При слишком длительном перемешивании количество пор достигает величины, при которой твердость и прочность материала начинает уменьшаться (см. таблицу 1).

Для определения равномерности распределения наполнителя по объёму матрицы, были проведены измерения на атомно-эмиссионном комплексе «Гранд-Поток» (рис. 2).

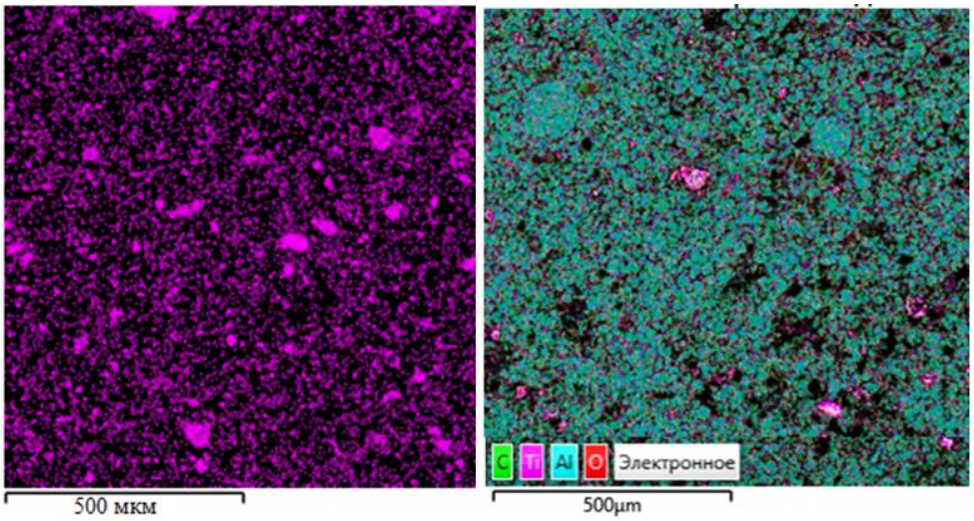


Рисунок 2 – Карта распределения частиц карбида титана в матрице (3 ч)

Согласно полученным данным частицы карбида титана достаточно равномерно распределены по объёму матрицы. Увеличение содержания частиц карбида титана, увеличивает количество препятствий для перемещения дислокации, что обеспечивает повышение твердости и прочности образцов.

Результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания № 0833-2020-0007.

1. Апакашев Р.А., Давыдов С.Я., Хазин М.Л., Чуркин В.А. Патент № 2 768 800. Способ получения алюмоматричных композиционных материалов. Опубликовано: 24.03.2022 Бюл. №9.

2. Адас В.Е., Черепанов С. Д., Хазин М. Л., Апакашев Р.А. Механические свойства алюмоматричных композитов с добавлением карбида титана. // В сборнике: Уральская горная школа - регионам сборник докладов международной научно-практической конференции. 2022. С. 107-108.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТВЁРДОСТИ И ПРОЧНОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА (Al-TiC)

Шайдуров Г. С.[1], Адас В. Е.[1], Хазин М. Л.[1], Попов Н. А.[2]

[1]Уральский государственный горный университет
[2]Институт химии и твёрдого тела УрО РАН

Email: kapp28@yandex.ru

Композициный материал - это материал, который состоит из двух или более компонентов, разделённых чётко выраженной границей и имеющих разные физические и химические свойства. Когда эти компоненты сочетаются, они создают новый материал, который отличается от каждого из компонентов в отдельности. При этом каждый компонент остается отдельным и не смешивается со своими соседями в структуре композита. Таким образом, композитный материал отличается от механической смеси или твердого раствора. Основным преимуществом композитных материалов является их высокая прочность и жесткость, при этом они имеют низкую плотность по сравнению с объемными материалами, что позволяет сократить вес готовой детали. В качестве наполнителя широко используются частицы карбидов, нитридов, силицидов [1].

В настоящее время композиты с алюминиевой матрицей являются востребованным материалом в аэрокосмической, автомобильной промышленности и других технических приложениях [2].

Целью данной работы является установление взаимосвязи твёрдости и прочности композитов Al-TiC. В качестве матрицы исследуемых композитов был выбран порошок алюминия ПА-3 чистотой 99% (ГОСТ 6058-73) со средним размером частиц 250-450 мкм. В качестве наполнителя использовали порошок карбида титана (ГОСТ 28377-89) с размером частиц 40-100 мкм. Для проведения испытаний нами были взяты образцы с разным процентным содержанием TiC: 3 %, 5 % и 9 %. Порошки алюминия и карбида титана перемешивали с помощью мельницы со скоростью 100 об/мин. Полученный порошки прессовали и спекали [3].

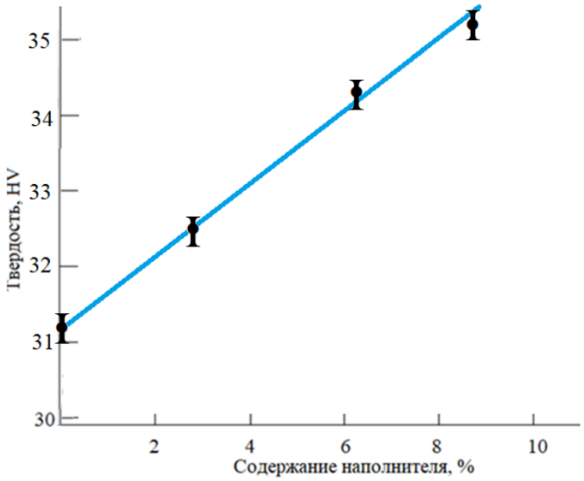


Рис.1 Изменение твёрдости композитов от содержания TiC

Испытание на твердость по Виккерсу проводили на поверхности образца с помощью твердомера ИТВ-30-АМ под нагрузкой 25 Н в течение 15 секунд времени выдержки. Согласно ГОСТ 2999-75 измерения проводили в 5 точках вдоль поверхности

образцов. Прочность на сжатие определяли с помощью универсальной разрывной машины МИМ 2-20-2 при скорости крейцкопфа 0,2 мм/с в соответствие с ГОСТ 25.503-97 и записью диаграммы деформации.

Добавление частиц карбидов в алюминиевый сплав оказывает положительное влияние на механические свойства. С увеличением процентного содержания частиц карбидов в матричном сплаве твердость композитов повышается (рис.1).

Аналогично повышению твёрдости наблюдалось повышение прочности композитов на сжатие (рис 2). Относительное увеличение прочности композита по сравнению с алюминиевой матрицей составляет от 15 % до 22 % (табл). Полученные результаты совпадают с данными литературы [4].

Таблица-1

Механические свойства композита

Материал	Относительное упрочнение, %	Твёрдость, HV Исходная
Al-3%TiC	16,98	32,46
Al-5%TirC	18,61	33,02
Al-9%TiC	21,04	35,96

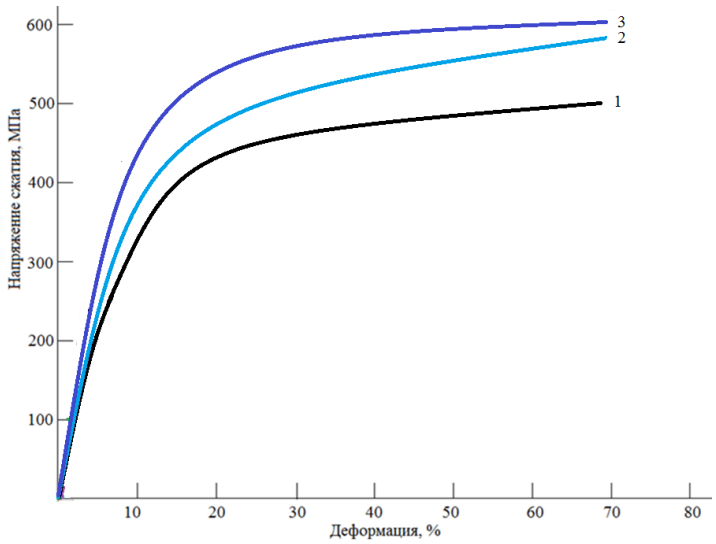


Рис. 2. Диаграмма деформации образцов, полученная при испытаниях на сжатие:
1 – Al+3%TiC; 2 – Al+5%TiC; 3 – Al+9%TiC

Таким образом, увеличение содержания частиц карбида титана повышает твердость и прочность образцов

1. Aynalem G. F. Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Volume 2020, Article ID 3765791, 19 pages. https://doi.org/10.1155/2020/3765791
2. Ловшенко Ф. Г., Лозиков И. А., Хабибуллин А. И. Алюминиевые механически легированные композиционные жаропрочные материалы с особыми физико-механическими свойствами // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 99-111.
3. Апакашев Р. А., Давыдов С. Я., Хазин М. Л., Чуркин В. А. Патент № 2 768 800. Способ получения алюмоматричных композиционных материалов. Опубликовано: 24.03.2022 Бюл. №9.

4. Guo L., Yang Y., Wen X., Guo H., he Wang Z., Guo Z-C. Synthesis of Cu-based TiCx composites via in-situ reaction between CuxTi melt and dissolvable solid carbon // Powder Technology. 2020. Vol. 362, no. 5, pp. 375-385. DOI:10.1016/j.powtec.2019.11.122

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АЛЮМОМАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА (Al-TiC)

Шайдуров Г. С., Адас В. Е., Хазин М. Л.

ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет"

Email: vintus66@mail.ru

Композиты с алюминиевой матрицей широко используется в различных трибологических и другие инженерных приложениях, например, в автомобилестроении, авиации, космической технике и горном деле. Износ, таких компонентов как тормозные барабаны, блоки и гильзы цилиндров, карданные валы и т. д. значительно влияют на общую эффективность работы горного оборудования. Исследования [1] показывают улучшенную твердость и превосходную износостойкость композитов с увеличением содержания TiC.

Образцы композитов Al-TiC испытывали в условиях сухого трения скольжения по схеме: неподвижный образец (цилиндр) по вращающемуся диску из закаленной стали 45ХН. Диаметр рабочей части диска – 50 мм. Размер цилиндра из композиционного материала: диаметр – 10 мм и высота – 8 мм. Осевая нагрузка постоянная 80 Н. Окружная скорость скольжения 0,52 м/с (200 об/мин).

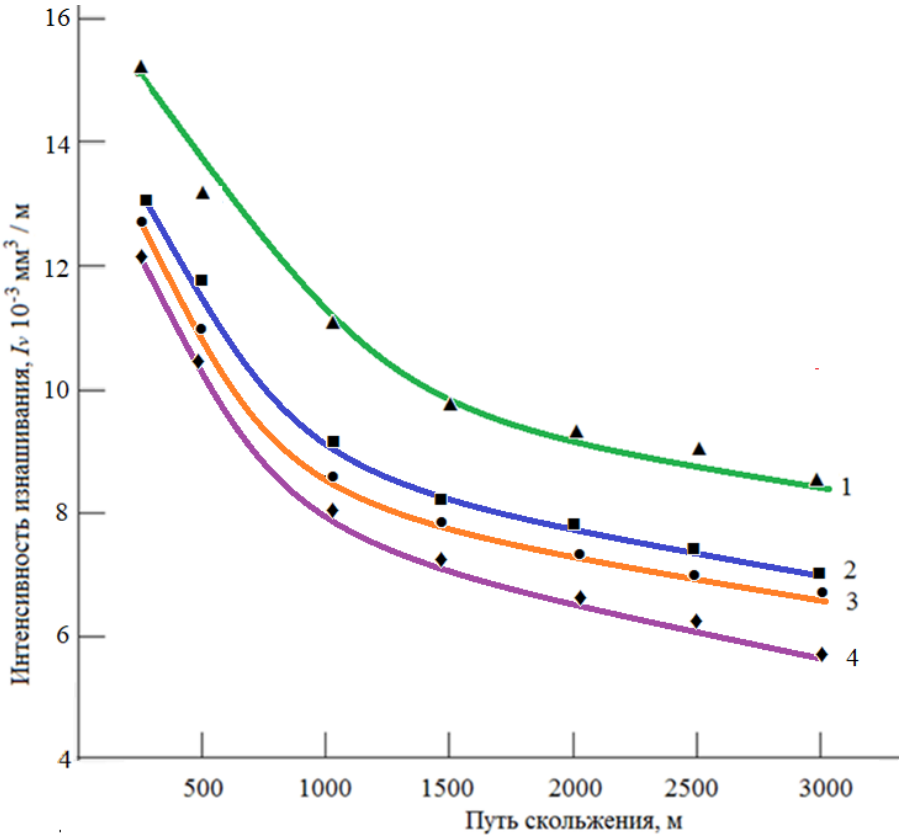


Рис. 1 - Интенсивность изнашивания композитов Al-TiC в зависимости от содержания TiC:

Интенсивность износа чистого алюминия была изначально высокой и уменьшалась с увеличением дистанции прохождения. Введение армирующих частиц уменьшило интенсивность изнашивания материала. Композит показал более низкую интенсивность износа по сравнению с матричным составом, а увеличение содержание карбида привело к дальнейшему ее снижению (рис. 1)

1 – 0 %; 2 -3 %; 3 – 7 %; 4 – 9 %

С увеличением пути скольжения от 1000 до 3000 м интенсивность изнашивания композита уменьшилась вдвое с (12,91 до 7,23) 10–3 мм3/м.

Интенсивность изнашивания с увеличением расстояния скольжения постепенно уменьшается и стремится к постоянному значению (см. рис. 1). Величина интенсивности изнашивания композита снижается по сравнению с матричным материалом. Увеличение содержания частиц карбидов приводит к уменьшению интенсивности изнашивания образцов, т. е. к повышению износостойкости композита (табл.).

Таблица

Изменение износостойкости композита Al-TiC

Содержание TiC, %	Относительная износостойкость на пути		
	1000 м	2000 м	3000 м
0	1	1	1
3	1.16	1.23	1.25
7	1.25	1.28	1.29
9	1.39	1.45	1.53

Величина интенсивности изнашивания матричного металла и композита уменьшается с увеличением пути скольжения и повышением доли частиц карбида. Интенсивность изнашивания композитов показывает более низкое значение по сравнению с матричным металлом, что согласуется с данными литературы [2, 3-6].

Адгезия, истирание, вспахивание и расслоение износа являются процессами износа, наблюдаемыми при испытаниях образцов. Оксидная пленка на поверхности алюминия предотвращает взаимодействие металла с металлом. Неподвижный контакт между цилиндром и диском вызывает сильное напряжение на поверхности образца. Деформация матрицы под действием приложенной нагрузки и силы трения приводит к упрочнению поверхностного слоя, что проявляется в значительном повышении износостойкости.

В значительной мере износ зависит от зарождения и распространения трещин на трущихся поверхностях. Основным источником зарождения трещин в композитах являются границы раздела между матрицей и частицами карбида. В начальный период процесса износа частицы карбидов сопротивляются разрушению и защищают поверхность.

1. Shimada S.; Mochidsuki K. The oxidation of TiC in dry oxygen, wet oxygen, and water vapor // J. Mater. Sci. 2004. vol.39. pp.581–586. https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000011514.46932.e2
2. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. – М.: Атомиздат, 1970. – 304 с
3. Михеев Р. С., Чернышова Т. А. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М.: Издательская группа URSS. 2013. 360 с.

4. Adiga K., Herbert M. A., Rao S. S., Shettigar A. Applications of reinforcement particles in the fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing - A Review // Manufacturing Rev. 2022. Vol. 9, no. 26. pp.1-17. https://doi.org/10.1051/mfreview/2022025
5. Nayak K.C.; Rane K.K.; Date, P.P.; Srivatsan T.S. Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters // Appl. Sci. 2022, Vol. 12, 8843. https://doi.org/10.3390/app12178843
6. Akinwamide S. O.; Akinribide O. J.; Olubambi P. A. Microstructural evolution, mechanical and nanoindentation studies of stir cast binary and ternary aluminium based composites. J. Alloys Compd. 2021, Vol. 850, 156586. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.15658

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАГРУЗКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТВЕРДОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Голыгин А.М., Адас В.Е., Шайдуров Г.С., Хазин М.Л.

Уральский государственный горный университет

Email: Golygin2013@yandex.ru

Твердость поверхностного слоя металла детали машин определенным образом связана с пределом прочности, износостойкостью, пределом текучести, ударной вязкостью и другими характеристиками. Особенно важным является знание твердости поверхностного слоя металла детали после различных методов поверхностной обработки. Для расчета и производства изделий горного машиностроения требуется большая база знаний по твердости поверхностного слоя черных и цветных металлов. Для измерения твердости применяют в заводской и лабораторной практике применяются методы Бринелля, Роквелла и Виккерса, что дает представление о целом комплексе механических свойств металла без его разрушения.

Зависимость твердости от приложенной нагрузки для разных материалов носит сложный характер [1], поэтому установление зависимости твердости и прочности является актуальной задачей.

Во время проведения измерений твердости в процессе увеличения нагрузки, материал проявляет те же свойства, что и при любом другом виде механических испытаний и проходит две стадии: упругую и пластическую деформацию.

Измерение твердости поверхностного слоя металла или индентирование позволяет:

– в короткий срок испытать изделие, используя только его небольшую область;

– использовать данный вид испытаний тогда, когда другие способы по тем или иным обстоятельствам применить невозможно;

– испытать материал практически без повреждения, что позволяет отнести данный вид измерений к неразрушающему контролю;

– определять твердость в микрообъемах и микросечениях;

– использовать малогабаритные приборы, измерять твердость изделий в процессе их эксплуатации с применением автоматизации и интеграции с цифровой вычислительной техникой;

– устанавливать аналитическую или эмпирическую связь получаемых результатов с данными других испытаний.

Испытания на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме используемого индентора, по времени нагружения, способам расчета величины твердости, условиям приложения нагрузки, твердости испытуемого материала, толщине слоя, размерам детали (образца), твердость которого нужно замерить и т. д. Одним из основных параметров режима измерения является величина приложенной нагрузки при

контакте индентора и поверхностного слоя металла испытуемого образца.Исследование влияния твердости от величины нагрузки на индентор проводили для некоторых сталей [2, 3], тогда как для цветных металлов такие данные в литературе практически отсутствуют. Известные данные только для латуни ЛС-59-1 [4].

Целью работы является выявление зависимости твердости цветных металлов от величины нагрузки на индентор.

Для проведения исследований из цветных металлов были выбраны медь и алюминий как наиболее распространённые в промышленности. Измерение твердости проводили на цифровом твердомере ИТВ-30АМ по методу Виккерса при изменении нагрузки в интервале 5-100 Н. Для точности измерения проводились 5 измерений на каждую величину нагрузки и устанавливали время выдержки индентора под нагрузкой 10 с.

Из приведенных на графике результатов следует, что при измерении твердости алюминия величина приложенной нагрузки практически не влияет на результат. А для меди зависимость твердости от приложенной нагрузки имеет более сложный характер. Величина твердости стремится к практически постоянной величине, которое начинается с нагрузки 70-80 Н.

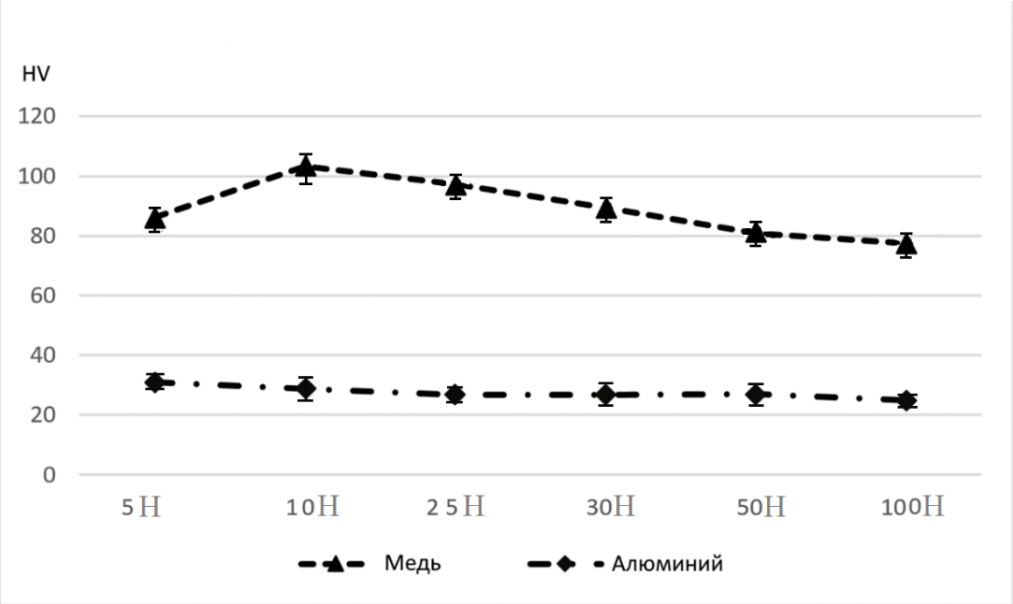


Рис. 1. Зависимость твердости материала от величины нагрузки на индентор

Из полученных результатов следует, что изменение твердости деталей из алюминия можно проводить практически на любой нагрузке, а для меди – желательно проводить измерения твердости при нагрузке индентора не менее 80 Н.

1. Мощенок В. И. Влияние величины нагрузки и формы индентора на значения твердости металла // Физика твердого тела. 2007. № 37. С. 68-70
2. Adaskin A. M., Sapronov I. Yu. Imprints method for determining the ratio of macroand microhardness when tested for Vickers hardness // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. vol. 1431. number article 012006. doi:10.1088/1742-6596/1431/1/012006
3. Malau V., Arifudin L. Vickers Microhardness Dependence Load and Determining of Tensile Strength of HQ 705 Steel from Microhardness Curves // Applied Mechanics and Materials, 2016. Vol. 842, pp 43-52. doi:10.4028/www.scientific.net /AMM.842.43
4. Карнов В. И. Влияние нагрузки и способа приготовление образцов на измеряемую твердость латуни ЛС-59-1 // Физика твердого тела. 1966. Том 147. С. 169-170

Научное издание

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

Материалы конференции и школы молодых ученых и студентов

4 апреля 2023 г. г. Екатеринбург

Электронное издание

Ответственный редактор Д.В. Зайцев

Компьютерная верстка Д.В. Зайцев

Дизайн обложки Д.В. Зайцев

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»