

Список литературы

1. Беккенбах Э. Неравенства / Э. Беккенбах, Р. Беллман – М.: Мир, 2007.
2. Кабанихин С. И. Проекционно-разностные методы определения коэффициентов гиперболических уравнений / С. И. Кабанихин – Новосибирск: Наука, 1988. – 166 с.
3. Ладыженская О. А. Краевые задачи математической физики / О. А. Ладыженская – М.: Наука, 1983.
4. Романов В. Г. Устойчивость в обратных задачах / В. Г. Романов. – М.: Научный мир, 2005.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский – М.: Наука, 1977.
6. Сатыбаев А. Дж. Конечно-разностное решение прямой задачи геоэлектрики с плоской границей / А. Дж. Сатыбаев // Межрегиональная научно-техническая конференция «Кыргызская государственность и проблема межкультурного диалога». Сборник научных трудов.-2003. Вып. 3. – С. 172-175.
7. Смирнов В. И. Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – М.- 1974.-Т. 4.- Ч. 2. – 525 с.

УДК 622.02 (075.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Тажиббаев Кушбакали Тажиббаевич, д.т.н, проф., заведующий лаборатории Института геомеханики и освоения недр НАН КР, Кыргызстан, 720052, г.Бишкек, ул. Медерова 98, e-mail: kushbak@yandex.ru

Султаналиева Рая Мамакеевна, к.ф.-м.н, проф. КГТУ им.И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр.Мира 66, e-mail: raia-ktu@mail.ru

Конушбаева Айнур Токтосуновна, ст.преп. каф. «Физика» КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр.Мира 66, e-mail: aikat80@mail.ru

Для анализа изменения остаточных структурных напряжений, разработана структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды. Модель предназначена для описания изменения остаточных (структурных) напряжений, существующих на различных структурных уровнях горных пород (кристаллическая решетка, кристаллическая отдельность, блок мозаики, зерно). Проведены сравнения остаточных напряжений измеренных рентгенографическим методом отдельных минералов горных пород с изменениями в модели. Экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с изменениями напряжений в модели.

Ключевые слова: остаточные напряжения, структурно-механическая модель, неоднородное твердое тело, горная порода, минерал.

INVESTIGATION OF OF RESIDUAL STRESSES ON THE BASIS OF STRUCTURAL-MECHANICAL MODEL

Tajibayev Kushbakali Tajibaevich, doctor of Technical Sciences, prof., head of laboratory of the Institute of Geomechanics and development of mineral resources of the NAS KR, Kyrgyzstan, 720052, c.Bishkek, str. Mederova 98, e-mail: kushbak@yandex.ru

Sultanalieva Raia Mamakeevna, candidate of Physical and Mathematical Sciences, prof. the Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, c. Bishkek, Mira 66, e-mail: raia-ktu@mail.ru

Konushbaeva Ainur Toktosunovna, senior lecturer department of Physics the Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, c. Bishkek, Mira 66, e-mail: aikat80@mail.ru

For the analysis of structural changes in the residual stresses developed structural-mechanical model of stress-strain state of an inhomogeneous solid medium. The model is intended to describe the changes in the residual (structural) stresses that exist in different structural levels of rocks (crystalline lattice, a crystalline separate block mosaic, grain). Comparisons of the residual stresses measured by x-ray of individual minerals of rocks with the changes in the model. The experimental data are in good agreement with the stress changes in the model.

Keywords: residual stresses, structural-mechanical model, inhomogeneous a rigid body, rock, mineral.

Остаточные напряжения могут иметь место в твердых материалах на разных масштабных и структурных уровнях. Различают остаточные напряжения 1-го рода, уравнивающиеся на макроскопическом структурном уровне - на уровне зерен, 2-го рода - микроскопический структурный уровень - на уровне кристаллических отдельных, 3-го рода - субмикроскопический структурный уровень - на уровне кристаллической решетки. Известно, что остаточные напряжения - это механические напряжения, остающиеся в структурах твердых материалов после устранения причин (внешние нагрузки, потоки тепла) его возникновения.

Вследствие неоднородности пространственного распределения, а также знакопеременной изменчивости величин на разных структурных и масштабных уровнях, остаточные напряжения таких гетерогенных материалов, как горные породы, композитные материалы, сплавы металлов и др., не поддаются непосредственному точному аналитическому описанию. В связи с этим возникает необходимость их исследования на основе структурно-механических модельных представлений. Результаты таких исследований, в конечном счете, позволят целенаправленно управлять механическими свойствами технических материалов, руд и минералов, и эффективно решать технологические задачи по упрочнению металлов, конструкций, а также по разупрочнению крепких руд и минералов до их измельчения. При разупрочнении крепких руд обеспечивается наиболее полное извлечение из них полезного металла или компонента с меньшими материальными и энергетическими затратами.

В гетерогенных твердых материалах, как горные породы, остаточные напряжения неоднородны, и поэтому в них наблюдается сложная картина напряженного состояния. Для анализа остаточных напряжений, имеющих место на разных масштабных уровнях, совместно с К.Т. Тажибаевым разработана структурно - механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды (рисунок 1) [2, 3]. Предлагаемая модель предназначена для описания изменения остаточных (структурных) напряжений, существующих на различных структурных уровнях горных пород (кристаллическая решетка, кристаллическая отдельность, блок мозаики, зерно). Анализ данных показывает, что остаточные напряжения более подробно изучены в металлах и технических материалах, чем в горных породах. Несмотря на определенные достижения в области изучения остаточных напряжений в твердых средах, в настоящее время представления о процессах их релаксации и совместного изменения на разных масштабных уровнях достаточно скудны. Для анализа разномасштабных остаточных напряжений и чтобы восполнить в какой-то мере указанный пробел, была предложена данная структурно- механическая модель неоднородной твердой среды (рис.1).

Модель состоит из пяти разных цепочек (А, Б, В, Г, Д), содержащих упругие, пластические, вязкие и неустойчивые элементы. Особенность каждой цепочки характеризуется ее равновесным состоянием. Например, цепочка В отражает нейтральное (не напряженное) состояние и характеризуется равновесием. Особенностью цепочек частиц неустойчивого равновесия 2-го порядка (цепочки А и Д) является наличие неустойчивого элемента (9), отображающего частицы на поверхности раздела (на внешней поверхности или на поверхности внутренней трещины), то есть, частиц не со всех сторон уравновешенных.

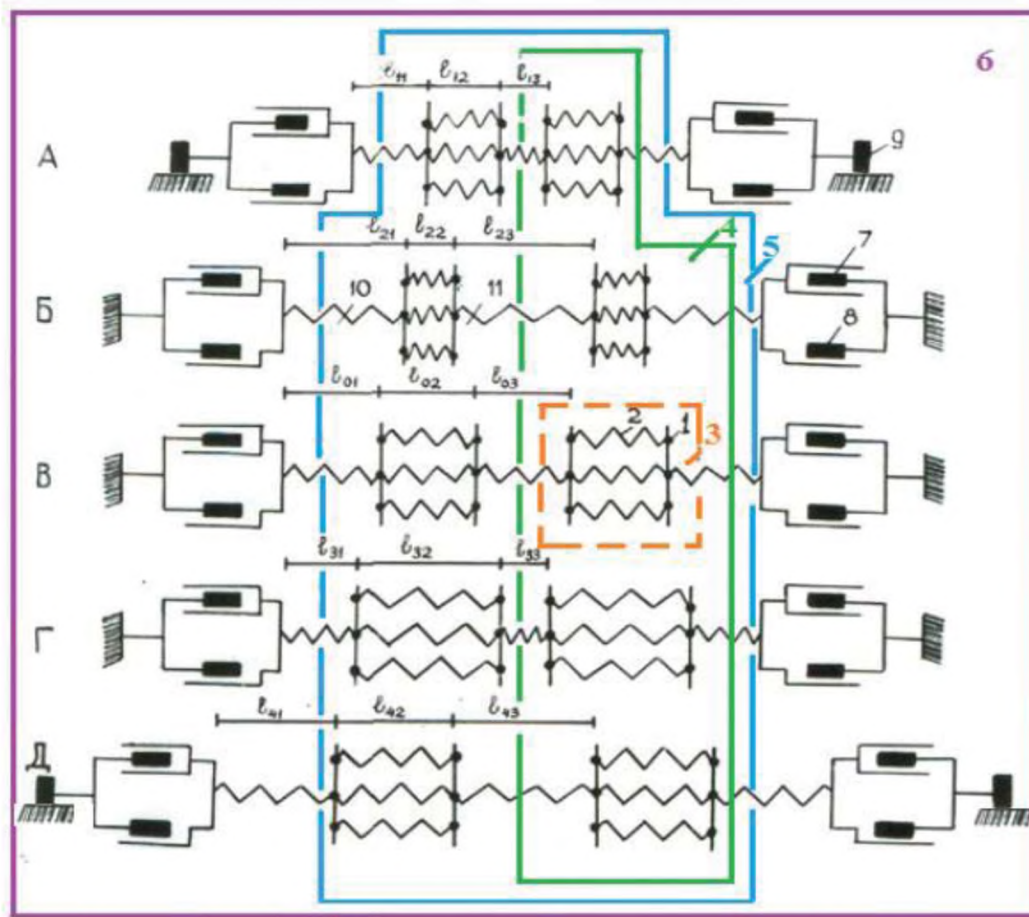


Рис. 1. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала.

1-атом; 2-межатомный упругий элемент; 3-ячейка кристаллической решетки; 4-кристаллическая отдельность (блок мозаики); 5-зерно; 6-блок 2-го уровня; 7-вязкий элемент; 8-пластический элемент; 9-неустойчивый элемент (неуравновешенные частицы поверхности раздела фаз); 10-упругий элемент границы зерна; 11-упругий элемент границы кристаллической отдельности (блок 1-го уровня); **А**-сжатая цепочка частиц неустойчивого равновесия 2-го порядка; **Б**- неоднородно-деформированная цепочка частиц неустойчивого равновесия 1-го порядка; **В**- цепочка частиц (нейтральная) устойчивого равновесия; **Г**- неоднородно деформированная цепочка частиц неустойчивого равновесия 1-го порядка; **Д** - растянутая цепочка частиц неустойчивого равновесия 2-го порядка; l_{01}, l_{02}, l_{03} - параметры нейтральной цепочки частиц; $l_{11} \dots, l_{43}$ - параметры деформированных цепочек частиц.

Характерным для этих цепочек является то, что напряжения (деформация) на всех структурных уровнях на границе и внутри зерна, на границе и внутри кристаллической отдельности имеет один знак, то есть все элементы такой цепочки либо растянуты, либо сжаты. Эти цепочки весьма неустойчивы. Незначительные внешние нагрузки, например, в цепочке **А** и **Д**, могут привести, в зависимости от знака остаточных напряжений к скачкообразному деформированию расширения или сжатия, как результат совместной деформации всех упругих элементов в одном направлении. Относительное равновесие таких неустойчивых цепочек обеспечивается только силами сцепления и трения частиц.

Цепочки типа **Б** и **Г** также неустойчивы, но в отличие от цепочек **А** и **Д** уравновешены со всех сторон окружающими частицами, поэтому они названы цепочками неустойчивого равновесия 1-го порядка. Особенность данных цепочек заключается в том, что в них

напряжения (деформация) на разных структурных элементах могут быть разного знака. Например, в цепочке **Б** на уровне кристаллической решетки имеются сжимающие остаточные напряжения, тогда как на границе блока мозаики (внутри зерна) и на границе зерна – растягивающие напряжения. В этой цепочке увеличение сжимающего напряжения на кристаллической решетке, согласно модели, приводит к увеличению растягивающих напряжений на границе кристаллической отдельности (блока мозаики) и зерна. В цепочке **Г** уменьшение растягивающих напряжений или переход растягивающих к сжимающим напряжениям на кристаллической решетке приведет к уменьшению напряжений сжатия или к переходу сжимающих напряжений к растягивающим на границе зерна и кристаллической отдельности.

Модель содержит в себе такие структурные элементы как атом, ячейка кристаллической решетки, кристаллическая отдельность (блок мозаики), зерно, блок-2 уровня. Следует отметить, что в цепочках неустойчивого равновесия (**А, Б, Г, Д**) происходит релаксация остаточных напряжений, скорость которой зависит от внешних и внутренних условий. Эти цепочки всегда стремятся к нейтральному состоянию – к устойчивому равновесию (к состоянию **В**), то есть к минимуму потенциальной энергии. Например, в цепочке **Б** сжимающие остаточные напряжения в кристаллической решетке, “самопроизвольно” уменьшаясь во времени, вызовут одновременное уменьшение растягивающих напряжений на границах кристаллической отдельности и зерна. Однако при соответствующих условиях данный процесс может длиться тысячи и миллионы лет. Внешние силовые поля значительно ускоряют процессы изменения остаточных напряжений: в одном случае устраняя их полностью, в другом – формируя. В этом смысле исходя из модели вполне понятно устранение остаточных напряжений при отжиге (при нагревании и медленном охлаждении). Для проверки правомерности предложенной модели было проведено сравнение экспериментально измеренных изменений остаточных напряжений на разных структурных уровнях с изменениями в модели для минералов шести разновидностей горных пород. Проверка модели по экспериментальным данным Т.К. Заворыкиной (табл.1) [1] показала соответствие изменений напряжений в модели с данными рентгеноскопии. Исследование исходного структурного состояния и процессов, протекающих в железных рудах Михайловского месторождения при физическом воздействии, показало, что кинетика процессов изменения структурной нарушенности породы носит многостадийный характер и позволяет в зависимости от вида, интенсивности и длительности обработки получать различные структурные состояния полиминерального агрегата. При механическом нагружении руды максимальные текстурные и структурные напряжения, возникающие в железосодержащих минералах (магнетите и гематите), инициируют именно в них наиболее ранние и значительные структурные преобразования. На первой стадии, при нагрузках менее 50 МПа, изменение дислокационной структуры зерен магнетита вызывает их деформационное упрочнение, затем, при более интенсивных нагрузках (более 50 МПа – вторая стадия) из-за высоких локальных напряжений на различных стопорах в магнетите появляются микротрещины как в объеме зерен, так и в межзеренном пространстве, при этом в зернах кварца новых нарушений сплошности нет. При нагрузке более 100 МПа наступает третья стадия структурных изменений, характеризующаяся дополнительным появлением нарушений сплошности в зернах кварца.

Равномерный по объему нагрев железной руды генерирует максимальные сжимающие напряжения в кварце, а растягивающие – в магнетите и гематите. В зависимости от вариации состава руды в этом случае, в первую очередь, повреждаются гематитовые и магнетитовые зерна; при температурах более 350⁰С активизируются процесс образования трещин и в кварцевых зернах.

Электромагнитная СВЧ - обработка вызывает первоочередное разупрочнение кварцевых зерен. Так, при нагреве до T=200⁰С за время не более 50с (I стадия) за счет преобладающего действия растягивающих напряжений в кварце и сжимающих в рудных минералах происходит трещинообразование в зернах кварца и упрочнение контакта

магнетит - гематит в агрегате рудных минералов. Нагрев до $T=450^{\circ}\text{C}$ за время 180с (II стадия) интенсифицирует действие вторичных структурных напряжений, вызванных выравниванием температуры по образцу и характеризуемых действием растягивающих напряжений в рудных минералах и сжимающих в кварце, вызывающих упрочнение кварца и гематита и разупрочнение магнетита. При нагреве до $T=950^{\circ}\text{C}$ за время 600 с (III стадия) под действием значительных растягивающих напряжений, последовательно генерируемых во всех минералах, происходит общее разупрочнение агрегата.

Исследования показали, что механизм изменения структурного состояния и свойства горных пород при действии различных полей определяется совокупностью разноуровневых процессов преобразований иерархической системы дефектности, немонотонно инициируемый вариацией термобарических условий в элементах строения. Например, при воздействии электромагнитным полем продолжительностью 50, 180, 600 с. напряжения, по сравнению с исходным состоянием, на кристаллической решетке магнетита изменяется как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, чему соответствует изменения напряжений на границе и внутри зерна. Все эти взаимосогласованные изменения, установленные экспериментально, хорошо описываются структурно-механической моделью. Например, исходное состояние (установленное экспериментально) магнетита в модели соответствует цепочке **Б**, где увеличение сжимающих напряжений (по сравнению с исходным значением) в кристаллической решетке приведет к увеличению растягивающих напряжений на границе кристаллической отдельности (блока мозаики) и на границе зерна. Экспериментально, при увеличении сжимающих напряжений кристаллической решетки магнетита от СВЧ облучения (в течение 50с.), растягивающие напряжения на границе кристаллической отдельности и на границе зерна увеличились, то есть имеется соответствие фактических изменений с изменениями в модели. Изменение сжимающего напряжения кристаллической решетки магнетита от СВЧ-облучения в течение 180с. и уменьшение при этом растягивающих напряжений на границах кристаллической отдельности и зерна также полностью соответствует согласованным изменениям напряжений в структурных элементах модели (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1.

Изменение параметров структурного состояния основных минералов
окисленной железной руды

Длительность СВЧ-воздействия, Сек	Д, А	$\rho_D \cdot 10^{-10}$ см ⁻²	r_D , А	r_e , А	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\rho_{\Sigma} \cdot 10^{-11}$ см ⁻²	$\rho_{cp} \cdot 10^{11}$ см ⁻²	$\alpha \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^2$	$\sigma_D \cdot 10^3$, Мбар	$\sigma_{эpz} \cdot 10^4$, Мбар
-----------------------------------	------	---	--------------	--------------	--------------------------	--	---	---------------------	---------------------	---------------------------------	-------------------------------------

а) кварц

исх. 0	1371,0	1,60	790,0451	91,10	1,98	12,06	1,32	5,47	5,25	11,95	7,90
СВЧ-воз.,с 50	781,5	4,91	,3	97,13	-1,74	10,6	2,20	77,70	88,30	5,26	2,21
180	1275,0	1,85	735,2	35,74	5,01	78,27	3,26	8,0	6,93	71,22	44,95
600	439,6	12,31	285,0	126,0	1,28	6,30	2,64	2,7	2,68	1,79	0,55

б) гематит

0	661,0	6,87	381,5	234,0	-1,17	1,82	1,11	18,3	2,54	3,41	4,90
50	773,4	5,08	443,7	251,60	-1,41	1,58	0,89	0,91	0,03	3,58	5,83
180	535,4	10,30	311,6	135,60	-2,00	5,44	2,36	1,85	1,85	7,94	9,75
600	925,4	3,50	534,5	816,50	0,35	0,315	0,22	79,91	79,91	0,41	0,78

в) магнетит

0	461,0	14,12	266,0	132,0	-2,10	5,76	2,88	2,70	1,16	4,36	4,66
50	360,0	23,15	208,0	91,0	-2,93	12,10	5,36	6,75	2,01	6,63	5,10
180	696	6,20	401,6	466,0	-0,65	0,46	0,55	2,10	0,16	0,61	0,88
600	520	11,10	300	258,0	-1,10	1,50	1,25	1,90	0,07	1,35	1,58

Из анализа представленной модели вытекают следующие выводы:

1. Остаточные напряжения 1-го, 2-го и 3-го рода изменяются в соответствии с их знаками взаимосогласованно: в одном направлении напряженных (всюду сжатых – отрицательные знаки, или всюду растянутых – положительные знаки) структурных элементах разного масштабного уровня (цепочки **А** и **Д**), увеличение напряжения 3-го рода приводит к уменьшению напряжений 1-го и 2-го рода, а уменьшение напряжений 3-го рода к увеличению напряжений 1-го и 2-го рода.

2. В разнонаправленных напряженных структурных элементах (цепочки **Б** и **Г**), увеличение напряжения 3-го рода приводит к увеличению напряжений 1-го и 2-го рода, а уменьшение напряжения 3-го рода до смены знака – к уменьшению напряжений 1-го и 2-го рода.

3. В разнонаправленных напряженных структурных элементах (цепочки **Б** и **Г**), уменьшение напряжения 3-го рода и смена знака приводит к уменьшению абсолютной величины напряжений 1-го и 2-го рода и смене их знака.

4. В не напряженных структурных элементах (цепочка **В**), формирование сжимающих напряжений 3-го рода приводит к формированию растягивающих напряжений 1-го и 2-го рода, формирование растягивающих напряжений 3-го рода – к формированию сжимающих напряжений 1-го и 2-го рода.

Список литературы

1. Зильбершмидт М.Г. Методы анализа структурного состояния горных пород. Ч.1 [Текст] / М.Т. Зильбершмидт, Т.К. Заворыкина. - М.: МГИ 1980.-с.88.
2. Тажибаев К.Т. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды [Текст] / К.Т.Тажибаев, Р.М. Султаналиева // Геомеханическое обоснование методов расчета устойчивости обнажений.-Бишкек: Илим, 1992. – С.99-107.
3. Тажибаев К. Т. Остаточные напряжения разных масштабно - структурных уровней и анализ их изменения на основе структурно-механической модели неоднородного твердого материала [Текст] /К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева //Известия НАН КР №2.- 2011. - С . 110-114.

УДК 519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ ЗАДАЧИ ТРЕХФАЗНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В «ГЛОБАЛЬНОЙ» ПОСТАНОВКЕ

Темирбеков Нурлан Муханович, д.ф-м.н., профессор, Казахстанский инженерно-технологический университет, Казахстан, 050060, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 93 Г/5, e-mail: temirbekov@rambler.ru

Байгереев Досан Рахимгалиевич, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан, 070000, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева 19, e-mail: dbaigereyev@gmail.com

Работа посвящена исследованию устойчивости конечно-разностных схем для задачи трехфазной неизотермической фильтрации в однородной, изотропной среде без учета капиллярных и гравитационных сил методом априорных оценок. Актуальность работы связана с тем, что рассматриваемая модель описывает процессы, протекающие в нефтяных пластах при добыче тяжелой нефти методом паротеплового воздействия на пласт. В качестве исходной дифференциальной задачи принята так называемая «глобальная» постановка задачи, состоящая из пяти дифференциальных уравнений в частных производных для температуры, водонасыщенности, нефтенасыщенности, скорости и «глобального» давления.