

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

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

Для анализа изменения остаточных структурных напряжений разработана структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды. Приводится сравнение экспериментально измеренных остаточных напряжений на разных структурных уровнях с модельными описаниями.

Ключевые слова: остаточные напряжения, структурно-механическая модель, неоднородное твердое тело, СВЧ-волны

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES ON THE BASIS OF STRUCTURAL-MECHANICAL MODEL AN INHOMOGENEOUS SOLID

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

For the analysis of structural changes in the residual stresses developed structural-mechanical model of the stress-strain state of of an inhomogeneous solid medium. The comparison of the experimentally measured residual stresses at different structural levels from of the model description.

Keywords: residual stresses, structural-mechanical model, inhomogeneous a rigid body, microwaves

Остаточные напряжения – это механические напряжения, остающиеся в структурах твердых материалов после устранения причин (внешние нагрузки, потоки тепла) их возникновения.

Основной причиной возникновения данных напряжений является неоднородность деформации в разных точках тела вследствие неравномерности упругопластических деформаций, а также неравномерности температурных процессов в объеме тела.

Остаточные напряжения могут иметь место в твердых материалах на разных масштабных и структурных уровнях. Согласно классификации остаточных напряжений, возникающих при деформировании различных веществ, существуют напряжения трех родов. Остаточные напряжения 1-го рода, уравнивающиеся на макроскопическом структурном уровне - на уровне зерен, 2-го рода – микроскопический структурный уровень - на уровне кристаллических отдельных частей, 3-го рода – субмикроскопический структурный уровень – на уровне кристаллической решетки [3]. Остаточные напряжения более подробно изучены в металлах и технических материалах, чем в горных породах. Как известно, остаточные напряжения, в некоторых случаях значительно упрочняют материалы, в соответствующих условиях могут привести к неожиданным и непредвиденным катастрофическим разрушением деталей, конструкций. Такие разрушения особенно нежелательны, например, в ответственных узлах атомных электростанций или авиалайнеров, в металлических газопроводах. Значительные остаточные напряжения во многих случаях присутствуют и в горных породах [4].

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, позволяют целенаправленно управлять механическими свойствами технических материалов, руд, минералов и эффективно решать технологические задачи по упрочнению металлов, конструкций, а также по разупрочнению крепких руд и минералов. 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 (рис.1) [1].

Предлагаемая модель предназначена для описания изменения остаточных (структурных) напряжений, существующих на различных структурных уровнях горных пород (кристаллическая решетка, кристаллическая

отдельность, блок мозаики, зерно).

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).

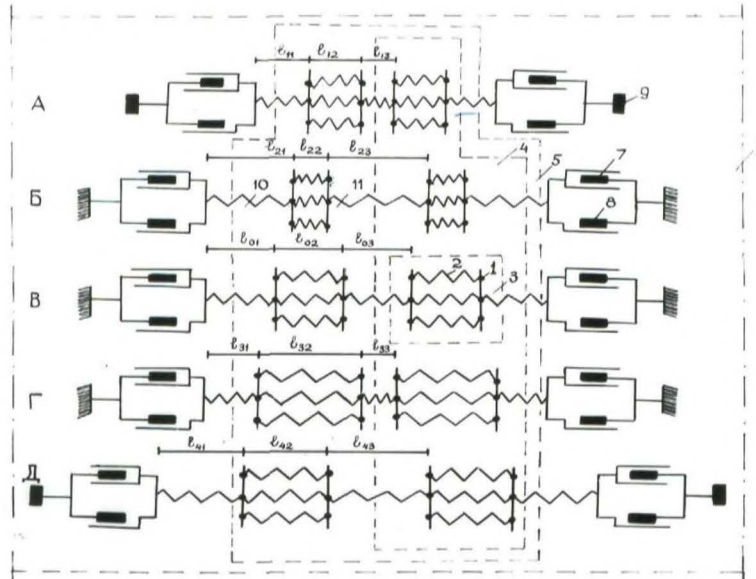


Рис. 1. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала .

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 мозаики); **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.

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. Характерным для этих цепочек является то, что напряжение (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. Заворькиной (табл. 1) [2] показала полное 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.

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 350°C активизируются процесс образования трещин и в кварцевых зернах.

Электромагнитная СВЧ - обработка вызывает первоочередное разупрочнение кварцевых зерен. Так, при нагреве до $T=200^{\circ}\text{C}$ 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.

Исследование изменений структурного состояния редкометалльной руды при действии различных физических полей также выявило характерную многостадийность процесса. При механическом нагружении максимальные напряжения наблюдаются в зернах эгирина, что и предопределяется его первоочередное разупрочнение. Затем при больших интенсивностях нагружения возникают микротрещины и в полевоом шпате. Тепловое воздействие создает наибольшие структурные напряжения в полевоом шпате, причина – появление максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, которые вызывают в нем наиболее значительные структурные преобразования вплоть до образования нарушений сплошности, при этом происходит преимущественное повреждение межзерновых контактов лопарит – полевоый шпат. Высокочастотная электромагнитная обработка инициирует максимальные растягивающие напряжения в зернах полевоого шпата и наибольшие сжимающие в зернах эгирина[2].

Действие структурных напряжений, инициируемых фазовыми и химическими превращениями, многокомпонентностью и анизотропией свойств минералов в некондиционной железной руде, вызывает избирательную поврежденность, снижающую прочность и улучшающую последующее раскрытие 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. Кинетика структурных преобразований определяется знаком, величиной и скоростью изменения элементов иерархической системы напряжений в породе и зависит от вида и режима внешнего воздействия и исходного структурного состояния.

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.

Табл.3.2.1

Изменение параметров структурного состояния основных минералов окисленной железной руды

Длительность СВЧ-воздействия, Сек	Д, А	$\rho_D \cdot 10^{10}$ см ⁻²	γ_D , А	γ_{es} , А	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\rho_{\Sigma} \cdot 10^{-11}$ см ⁻²	$\rho_{sp} \cdot 10^{11}$ см ⁻²	$\alpha \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^2$	$\sigma_D \cdot 10^3$, Мбар	$\sigma_{sp} \cdot 10^4$, Мбар
а) кварц											
исх.	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

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).

Выводы

1. В твердых материалах вследствие их дискретно-связанной структуры распределение остаточных напряжений в разных масштабных уровнях неоднородные и имеет периодический характер.
2. Остаточные напряжения на разных структурных элементах: кристаллическая решетка, зерно, граница зерна могут иметь разные знаки и изменяются в соответствии с их знаками взаимосогласованно:
3. При увеличении сжимающих напряжений кристаллической решетки магнетита от СВЧ облучения (в течение 50с.), растягивающие напряжения на границе кристаллической отдельности и на границе зерна увеличивается, т.е. имеется соответствие фактических изменений с изменениями в модели.
4. 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

Список литературы

- 1.Тажобаев К.Т. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды / Р.М.Султаналиева // Геомеханическое обоснование методов расчета устойчивости обнажений.Бишкек.: Илим, 1992. 99-107 с.
- 2.Заворыкина Т.К. Разработка метода управления селективным раскрытием минеральных сростков окисленной железной руды высокочастотным электромагнитным воздействием //Автореферат дисс. канд. техн. наук. –М.: МГИ, 1909. -17 с.
3. Зильбершмидт М.Т. Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии. «Физические процессы в горных породах». Материалы всесоюзной конференции. М.: 1984.
4. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений. -Заводская лаборатория, 1950, №2, с.188-192.

References

1. Tajibaev K.T. structure-mechanics model of the tensely-deformed state of heterogeneous hard environment / of R.M.Sultanalieva // Geomechanical ground of methods of calculation of stability of baring.Bishkek. : Ilim, 1992. 99-107 p.
2. Zavorykina T.K. Development of management method selective opening of mineral growed of the oxidized iron-stone by high-frequency electromagnetic influence //Abstract of thesis of diss. cand. tech. sciences. -M.: MGI, 1909. - 17 p.
3. Zilbershmidt M.T. Mechanism of change of the structural state of mountain breeds at external influence. "Physical processes are in mountain breeds". Materials of all-union conference. M.: 1984.
4. Davidenkov N.N. About measuring remaining tensions.-Factories laboratory, 1950, №2, P.188-192.

УДК 621.791

О ВЛИЯНИИ ПАРОВ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ ВАННЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

Султангазиева Р.Т., Аманкулова Н. А.

Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика. E-mail: renasultangazieva@mail.ru, a_nur4@mail.ru

В данной работе система МГД уравнений электродуговой плазмы дополнена уравнением конвективной диффузии для паров металла испаряющегося анода. Поставлены граничные условия для концентрации паров металла. Рассчитаны транспортные коэффициенты смеси плазмообразующего газа и паров металла. Приведена оценка весовой концентрации паров металла обрабатываемого изделия в столбе аргоновой дуги при электродуговой сварке при различных силах тока сварки. Установлена необходимость учета влияния паров при токах выше 150А.

Ключевые слова: электродуговая плазма, пары металла, МГД уравнения, плазма образующий газ, аргоновая дуга, электродуговая сварка.

THE INFLUENCE OF THE WELD POOL METAL VAPOR ON THE ARC PLASMA PARAMETERS

Sultangazieva R.T., Amankulova N.A.

*Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic
E-mail: renasultangazieva@mail.ru, a_nur4@mail.ru*