

УДК 622.243.2:622.831.2.02

*д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)*

## АНСАМБЛИ И СТРУКТУРЫ МИКРОДЕФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ (ГОРНОЙ ПОРОДЕ)

*В работе рассмотрена актуальная для развития механики твердого тела проблема учета его поврежденности и сплошности при нагружении. В противовес устоявшимся упрощенным толкованиям скалярных мер поврежденности предложена концепция ее описания с помощью несимметричной матрицы второго ранга, элементами которой являются микроразрывы и микросдвиги. Показано, что они возникают в материале в виде структурного ансамбля Z-дефекта, по разному ориентированному в пространстве главных площадок НДС. Впервые доказано существование первичных (фоновых) микродефектов. Исследованы типы, ансамбли и структуры микродефектов в зависимости от НДС, показаны принципиальные различия их структур при растяжении и сжатии материала.*

**Ключевые слова:** поврежденность, сплошность, микродефекты, микросдвиг, микроразрыв, Z-ансамбль, матрица микродефектов, фоновые уровни микродефектов, структуры микродефектов.

### *1 Актуальность и цель исследований*

На протяжении последних 2–3-х десятилетий происходит интенсивное углубленное изучение термомеханических процессов развития поврежденности в твердом теле, связанных с изменением в нем всего комплекса механических свойств, определяющих его упругие, вязкие, пластичные и другие реологические показатели. В частности, одно из важнейших свойств твердого тела — прочность — повсеместно стали рассматривать не как набор статических величин, разделяющих его вначале стабильное, а затем разрушенное состояния, а как сложные термофлуктуационные процессы зарождения и развития микродефектов (поврежденности), которые при определенном сочетании условий переходят в прогрессирующее разрушение.

На основе экспериментальных данных, накопленных при испытаниях металлов, искусственных материалов и горных пород, были предложены многочисленные континуальные механико-математические модели влияния микродефектов (поврежденности) на прочностные и деформационные свойства материалов [1–12 и др.].

Физическим обоснованием введения понятия «поврежденность» послужили экспериментально установленные закономерности постепенной деградации во времени механических свойств материала вследствие образования и развития в нем систем плоских и объемных дефектных структур на микро-, мезо- и макроуровнях [1, 7, 8, 10, 12]. Как было убедительно доказано в фундаментальных работах отечественной школы физики твердого тела [13], основной причиной возникновения микродефектов являются термофлуктуационные процессы перераспределения энергии в нагруженном материале.

Большинство исследований, развивающих концепцию континуальной теории поврежденности, восходят к работам Качанова — Работнова [3, 4, 6, 12] и основаны на использовании скалярных мер поврежденности. И по этому направлению имеются обстоятельные аналитические обзоры [2–6 и др.].

В качестве скалярной меры сплошности материала, показывающей степень сохранности относительной остаточной площади, Качановым [3] был принят нормированный параметр сплошности

$$\Psi = \sigma / \sigma_S, (0 \leq \Psi \leq 1), \quad (1)$$

где  $\sigma, \sigma_S$  — действующее напряжение и прочность материала соответственно.

В дополнение к параметру (1) Работным [4] введено понятие скалярной нормированной меры поврежденности  $\omega$ , равной

$$0 \leq \omega = 1 - \Psi \leq 1. \quad (2)$$

Таким образом, поврежденность  $\omega$  материала здесь понимается как алгебраическое дополнение его сплошности  $\Psi$ . Простота и удобство предложенных мер сплошности (1) и поврежденности (2) способствовали их широкому распространению. В дальнейшем появились работы, где меру поврежденности вводят как тензор второго или более высокого ранга [5].

Большинство исследований, посвященных этой проблеме, используют именно такие скалярные меры поврежденности или их усложненные математические трактовки безотносительно к особенностям напряженно-деформированного состояния материала, тем более без привязки их к различным типам микродефектов [1–11 и др.]. Не были рассмотрены структура и комплекс микродефектов как ансамблей, из которых складывается поврежденность, отсутствуют удачные попытки дать физическую трактовку различных вариантов структуры микродефектов, нет исследований фоновых (первичных) микродефектов.

Поскольку в процессе деформирования материала происходит зарождение, рост и усложнение структуры микродефектов, что кардинальным образом влияет на прочностные и деформационные свойства материала, важность задач изучения закономерностей структуры и развития микродефектов трудно переоценить.

**Цель** исследования — разработка математической модели пространственной структуры микродефектов твердого тела (горной породы), возникающих в результате термофлуктуационных процессов и внешних воздействий.

**Идея** работы заключается в использовании закономерностей возникновения и

взаимного пространственного распределения микродефектов сдвигового и разрывного типов как структурных элементов в объеме тела при его произвольном напряженно-деформированном состоянии (НДС).

**Объектом** исследований являются микродефекты сдвигов и разрывов, **предмет** исследований — закономерности геометрии их взаимного распределения.

К основным **задачам** исследования следует отнести:

1) выбор и обоснование базового набора микродефектов, предопределяющих внутреннюю структуру материала и, тем самым, весь комплекс его механических свойств;

2) анализ возможных ансамблей, пространственных сочетаний и структур разнонаправленных микродефектов;

3) привязку различных ансамблей микродефектов к особенностям напряженно-деформированного состояния материала.

## 2 Типы, ориентация и ансамбли микродефектов

Известно, что при нагружении материала (горной породы) неизбежно как ответная реакция возникают структурные дефекты разного масштаба, которые обобщенно называют поврежденностями.

Под поврежденностью материала понимают возникновение в его объеме в результате термофлуктуационных процессов любых микродефектов сдвигового или разрывного типов (рис. 1, 2), которые вносят существенное искажение в исходно однородное упругое распределение напряжений и деформаций.

В отличие от начальных понятий (1) и (2), лишь обобщенно описывающих поврежденность, мы вводим для микродефектов индексированные переменные  $W_{ij}$ , которые отражают их тип и ориентацию относительно ортонормированного базиса (орты  $i, j, k = 1, 2, 3$ ), связанного с напряженно-деформированным состоянием твердого тела.

Таким образом, главными элементами поврежденности материала  $W_{ij}$  являются

микродвиги  $W_{ij}$  ( $i \neq j$ ) и микроразрывы  $W_{ij}$  ( $i = j$ ). На рисунке 2 показана ориентация сдвиговых и разрывных микродефектов относительно главных площадок приложения внешних нагрузок, заданных ортами  $i, j, k$ .

Используя в качестве основных объектов исследований микродефекты в виде матрицы поврежденностей  $W_{ij}$ , можно дать им следующую физическую интерпретацию:

– **м-сдвиги** — микродефекты сдвиговой природы  $1 \geq W_{ij} > 0$ , ( $W_{ij} \neq W_{ji}$ ), (при  $i \neq j$ ) возникают на площадках с максимальными касательными напряжениями аналогичных индексов  $t_{ij}$ , причем напряжение на м-сдвигах не может превышать заранее заданного предела, который зависит от прочностных показателей материала;

– **м-разрывы** — микродефекты разрывной природы  $1 \geq W_{ii} > 0$ , которые расположены в основном на главных площадках с нормалью  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) и эквивалентны трещинам растяжения.

М-сдвиг  $W_{ij}$  представляет собой сдвиговую деформацию в виде нарушения сплошности тела в форме не всегда пра-

вильного «пятна» деформационной дисторсии со сдвинутыми по касательной и прижатыми (сомкнутыми) друг к другу берегами.

М-разрыв  $W_{ii}$  описывает принципиально иное нарушение: это микротрещина отрыва с образованием двух новых свободных поверхностей в виде двух раздвинутых берегов, ограниченных по контуру замкнутой плавной зоной смыкания.

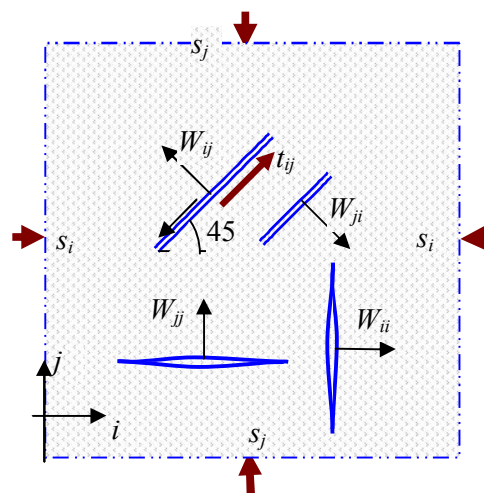


Рисунок 1 Микродефекты сдвигового  $W_{ij}$  и разрывного  $W_{ii}$  типов

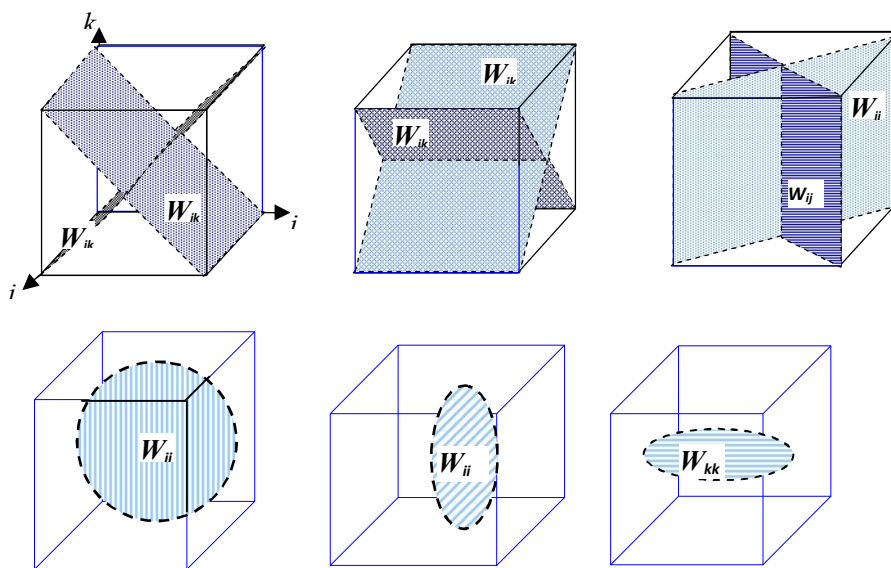


Рисунок 2 Основные направления возникновения сдвиговых  $W_{ij}$  и разрывных  $W_{ii}$  микродефектов в объеме нагруженного тела

Как было установлено термофлуктуационной концепцией прочности, оба м-дефекта, благодаря случайным термофлуктуациям энергии в объеме тела, могут самопроизвольно возникать и залечиваться в виде взаимно противоположных встречных процессов. Важно отметить, что в исследованиях, посвященных этой проблеме, процессы «залечивания» микродефектов остаются до настоящего времени вне поля зрения авторов.

Для математического описания всей совокупности микродефектов — м-сдвигов и м-разрывов — удобно использовать матрицу второго ранга  $\|W_{ij}\|$ , где индексы  $i, j = 1, 2, 3$  следует направить по ортогональным осям главных площадок нагруженного тела, а индексы  $ij$  в обозначении м-сдвигов (с круговой перестановкой) обозначают диагонали между главными площадками  $i, j$ . В нагруженном внешними усилиями твердом теле матрица микродефектов имеет вид

$$W_{ij} = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, вместо обобщенного понятия «поврежденность» вводится матрица микродефектов, где:

- м-сдвиги  $W_{ij}$  ( $i \neq j$ ) действуют вдоль максимальных касательных напряжений;
- м-разрывы  $W_{ii}$  ( $i, j = 1 \dots 3$ ) расположены на главной диагонали матрицы второго ранга  $\|W_{ij}\|$ .

Следует иметь в виду, что матрица микродефектов всегда несимметрична, т. е. в неравномерно нагруженном теле всегда соблюдаются неравенства

$$W_{ij} \neq W_{ji}, \quad W_{ii} \neq W_{jj}. \quad (4)$$

Возникновение такого рода поврежденностей при растяжении и сжатии элементарного объема образует характерные конфигурации (ансамбли) разрывных и сдвиговых дефектов.

При сжатии пластичных материалов вначале возникают м-сдвиги, а затем на их концах зарождаются и вырастают трещины нормального разрыва в виде м-разрывов. Последние в процессе своего развития быстро приближаются к направлению, параллельному сжимающим усилиям. Для хрупких материалов процесс образования ансамбля микродефектов обратный: м-разрывы оказываются первичными, а м-сдвиги — вторичными.

Отсюда можно заключить, что в нагруженном материале возникает особое структурное комплексное повреждение в виде естественно сформированной комбинации (ансамбля) м-сдвигов и м-разрывов, которое уместно назвать микродефектом Z-типа. Общее представление о пространственной ориентации при сжатии тела м-разрывов  $W_{ii}$  и м-сдвигов  $W_{ij}$  после их объединения в ансамбль типа  $Z_{ij}$  можно получить из рисунка 3.

Такие же ансамбли микродефектов будут наблюдаться и в перпендикулярном направлении в плоскости  $ik$ . Поэтому можно условно записать для ансамблей Z-дефектов при одноосном сжатии  $s_i > 0$ :

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= W_{ij} + 2 \cdot W_{jj}; \\ Z_{ik} &= W_{ik} + 2 \cdot W_{kk}. \end{aligned} \quad (5)$$

На рисунке 3 показано два Z-дефекта в плоскости  $ij$ . Такие же ансамбли Z-дефектов будут наблюдаться и в плоскости  $ik$ .

Соотношение размеров м-сдвига и оперяющих его м-разрывов в Z-дефектах может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от прочностных показателей тела (когезии сдвига и отрыва) и его НДС.

В случае одноосного сжатия тела  $s_i > 0$  длина центральных м-сдвигов  $W_{ij}$  и  $W_{ik}$  оказывается (по крайней мере, на начальных этапах нагружения материала) заметно больше длины оперяющих его м-разрывов  $W_{jj}$  и  $W_{kk}$  (рис. 3).

При этом в зависимости от знака приложенных напряжений масштабные соотношения между м-сдвигами и м-разрывами в комплексном Z-дефекте будут заметно от-

личаться. По сути, это будут подобные Z-дефекты с одинаковыми по строению составляющими, но разной длины.

При растяжении тела обычно центральный первичный м-сдвиг имеет малую длину и по мере нагружения опережается двумя м-разрывами большой длины (рис. 4).

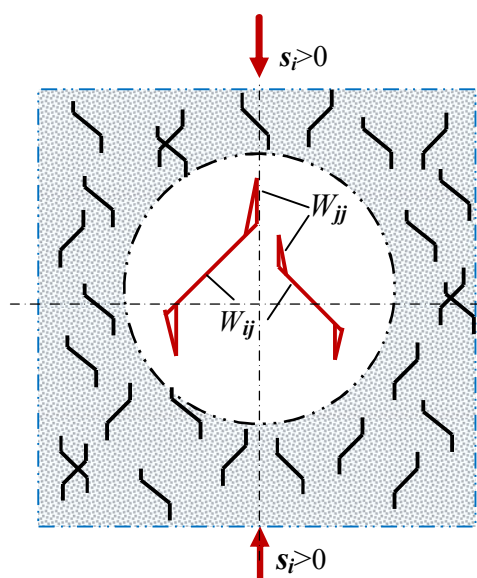


Рисунок 3 Характерные Z-ансамбли разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$  микродефектов при одноосном сжатии ( $s_1 > 0$ )

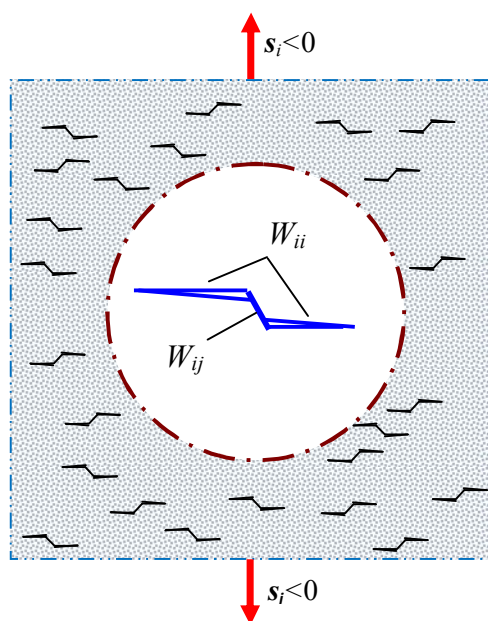


Рисунок 4 Характерный вид Z-ансамбля из разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$  микродефектов при одноосном растяжении ( $s_1 < 0$ )

В ряде случаев (например, невысокие показатели когезии отрыва по сравнению с когезией сдвига) Z-дефект может при растяжении вырождаться в протяженную трещину, особенно на закритических стадиях разрушения материала.

Как и для одноосного сжатия, запишем формулу Z-дефектов в случае одноосного растяжения  $s_i < 0$ :

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= W_{ij} + 2 \cdot W_{ii}; \\ Z_{ik} &= W_{ik} + 2 \cdot W_{ii}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как нетрудно убедиться, формулы (5) и (6), несмотря на их сходство, существенно различаются, что еще раз доказывает принципиальное отличие механизмов разрушения при растяжении и сжатии. Нетрудно привести примеры НДС тела, при котором будут существовать условия возникновения обоих типов Z-дефектов (например, НДС в виде комбинации сжатия и растяжения по разным осям). Разумеется, процессы разрушения материала и методы его описания становятся заметно сложнее.

Полезно ввести наряду с понятием поврежденности (типа м-сдвига и м-разрыва) понятие сплошности материала. Сплошности характеризуют бездефектную часть рассматриваемой площади материала, где все или один из микродефектов отсутствуют.

Для каждого заданного направления  $i, j = 1, 2, 3$  как алгебраическое дополнение микродефектам (поврежденности) в качестве сплошностей примем

$$T_{ij} = 1 - W_{ij}; \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (7)$$

Таким образом, симметричная матрица сплошностей второго ранга подобна матрице микродефектов и содержит девять объектов, при этом  $T_{ij} \neq T_{ji}; (i, j = 1, 2, 3)$ , из которых шесть (при  $i \neq j$ ) — на диагональных плоскостях с максимальными касательными напряжениями, а остальные три (при  $i = j$ ) — сплошности на главных площадках, компланарно которым расположены разрывные дефекты.

Как следует из вышеприведенных соотношений, вся совокупность микродефектов  $W_{ij}$  и сплошностей  $T_{ij}$  представляет собой объект, не обладающий тензорной природой (как ранее предполагалось для поврежденности некоторыми исследователями [1, 5 и др.]). Поэтому будет некорректно оперировать этими объектами посредством мощного аппарата тензорного исчисления, что заметно осложняет их использование для практических целей, в том числе и посредством методов физической мезомеханики [1] для оценки физико-механических свойств материалов (упругости, деформируемости, вязкости, прочности и др.).

Поскольку эти совокупности  $W_{ik}$  и  $T_{ik}$  подчиняются закономерностям теории множеств, можно с их помощью определить, например, размеры оставшейся полной сплошности материала  $T_{c_k}$  на каждой главной площадке по формуле

$$T_{c_k} = T_{kk} \cdot T_{kl} \cdot T_{km}, \quad (k, l, m = 1, 2, 3). \quad (8)$$

Полные сплошности  $T_{c_k}$  имеют простую физическую интерпретацию: они показывают относительную площадь главной площадки, свободную от каких-либо повреждений (дефектов)  $W_{ij}$ . Поэтому логично ввести еще одно понятие — общую поврежденность  $W_{c_k}$  главной площадки как относительную площадь, на которой находится хотя бы один микродефект. Таких объектов будет также три по числу главных площадок:

$$W_{c_k} = 1 - T_{c_k}, \quad (k = 1, 2, 3). \quad (9)$$

### 3 Фоновые уровни микродефектов и их искажение при нагрузке

Даже без какого-либо внешнего нагружения в любом твердом теле (материале, горной породе) в соответствии с законами физики твердого тела происходят непрерывные термофлуктуационные процессы [13]. В связи с этими процессами по всему объему тела самопроизвольно возникают и исчезают начальные (фоновые) микродефекты

в виде случайно (стохастически равномерно) расположенных и беспорядочно ориентированных в пространстве элементарных м-сдвигов и м-разрывов. Они создают фоновый исходный уровень поврежденности в теле в виде постоянного «мерцания» (зарождения и залечивания) микродефектов. Таким образом, в любом материале некоторый исходный (фоновый) уровень микродефектов (поврежденности) существует изначально.

Создание в материале напряженно-деформированного состояния, например путем внешнего нагружения нормальными силами  $s_i$  и  $s_j$ , приводит к тому, что возникновение элементарных микродефектов в виде сдвигов и разрывов происходит в соответствии с полями напряжений и деформаций в теле (рис. 5 и 6).

Рассмотрим особенности распределения микросдвигов в материале, нагруженном нормальными напряжениями  $s_i \geq s_j \geq s_k$ .

Можно с достаточной уверенностью полагать, что вдоль направления действия касательных (сдвигающих) напряжений  $t_{ij}$  и деформаций  $\gamma_{ij}$  м-сдвиги  $W_{ij}$  будут больше, а в противоположном направлении  $W_{ji}$  — меньше. При этом эти изменения будут нарастать по мере приближения к направлению максимальных касательных напряжений, т. е. под углом  $45^\circ$  к главным площадкам с ортами  $i, j, k$ .

М-сдвиги, коллинеарные касательным напряжениям (например,  $W_{ij}$ ), будем называть главными, а противоположного направления ( $W_{ji}$ ) — встречными. По мере приближения направления главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов к поверхности максимальных касательных напряжений  $t_{ij}$  их амплитуда будет постепенно увеличиваться (уменьшаться) по закону (3):

$$\begin{vmatrix} W_{ij}(\alpha) \\ W_{ji}(\alpha) \end{vmatrix} = W_{0s} \pm \left[ 1 + \sin\left(4\alpha - \frac{\pi}{4}\right) \right] \begin{vmatrix} A_{ij} \\ A_{ji} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где  $i, j$  — орты главных площадок;  
 $\alpha$  — угол наклона направления м-сдвига к максимальному касательному напряжению  $t_{ij}$ ;

$W_{0s}$  — фоновый уровень м-сдвигов в теле при отсутствии касательных напряжений  $t_{ij} = 0$ , в однородном теле распределение и плотность фоновых микродефектов одинаковы;

$A_{ij}, A_{ji}$  — полуамплитуды отклонения соответствующих сдвигов от фонового уровня  $W_{0s}$ .

Зависимость (10) отражает приближенную закономерность распределения сдвигов, справедливую только на начальный период их роста, а затем она существенно усложняется.

На рисунке 5 диагональными стрелками показаны направления максимальных касательных напряжений  $t_{ij}$ , а радиус-вектор пропорционален вариации амплитуд главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов. Формула (10) отражает разницу изменений главных и встречных сдвигов в зависимости от угла отклонения от максимальных касательных напряжений.

Разрывные микродефекты (м-разрывы) в ненагруженном теле, также как и м-сдвиги, возникают стохастически равномерно по разным направлениям и по всему объему, формируя тем самым фоновый уровень  $W_{0r}$ . После приложения внешних сил и создания в теле неравномерного напряженного состояния возникают условия для искажения исходного  $W_{0r}$  изотропного поля распределения м-разрывов. М-разрывы, ориентированные перпендикулярно растягивающим деформациям, растут быстрее и становятся преобладающими, тогда как по нормали к направлению сжимающих деформаций их число сокращается. Эта закономерность отражена на рисунке 6, где радиус-вектор пропорционален плотности м-разрывов в разных направлениях.

В отличие от м-сдвигов, которые в основном ориентируются вдоль направления максимальных касательных напряжений, м-разрывы в нагруженном материале возникают и формируются на главных площадках и зависят от распределения деформаций. Плотность м-разрывов достига-

ет максимума в плоскости с минимальными (растягивающими) деформациями, и наоборот — они минимальны в плоскости, где действуют деформации сжатия.

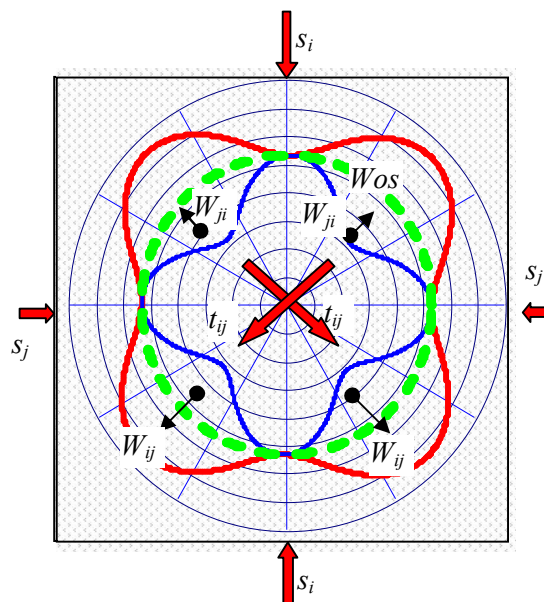


Рисунок 5 Ориентация и плотность распределения главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов относительно их фонового уровня  $W_{0s}$  и главных напряжений  $s_i$  и  $s_j$

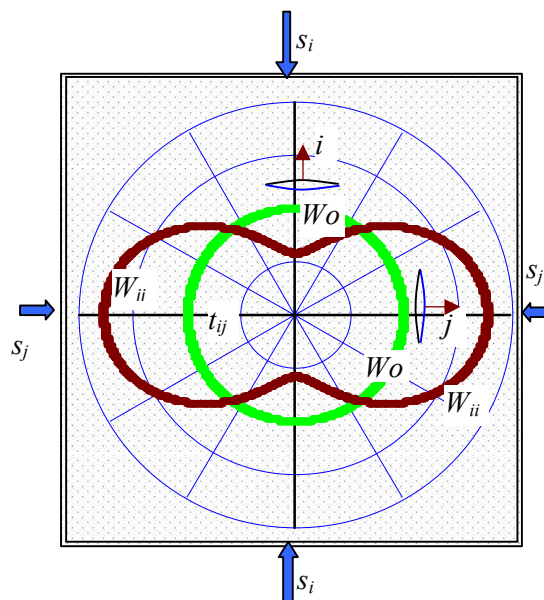


Рисунок 6 Ориентация и плотность распределения м-разрывов  $W_{ii}$  и  $W_{jj}$  относительно фонового уровня  $W_{0r}$  и главных напряжений  $s_i > s_j$

Сравнивая кривые распределения плотностей м-сдвигов и м-разрывов (рис. 3 и 4), следует отметить их заметное отличие. М-сдвиги главного направления (вдоль касательных напряжений) по мере изменения угла наклона всегда выше фонового уровня м-дефектов  $W_0$ , а встречные м-сдвиги существенно ниже, но те и другие становятся равными фоновому уровню  $W_0$  на главных площадках и имеют экстремумы на диагональных направлениях, т. е. на площадках максимальных касательных напряжений.

Плотность м-разрывов в нагруженном теле отклоняется от фонового их уровня всюду, увеличиваясь до максимума в направлении минимальных нормальных напряжений и снижаясь до минимума в перпендикулярном напряжении.

Более того, априори можно полагать, что если создано НДС в твердом теле, при котором нормальные и касательные напряжения удовлетворяют неравенствам

$$s_i \geq s_j \geq s_k \geq 0, \quad t_{ik} \geq t_{ij} \geq t_{jk} \geq 0, \quad (11)$$

то, согласно рисункам 3 и 4, будут соблюдаться вытекающие из них более сильные утверждения для микродефектов в виде следующих неравенств:

– для главных и встречных м-сдвигов:

$$\begin{aligned} W_{ik} &\geq W_{ij} \geq W_{jk} \geq W_{0s} > 0, \\ W_{0s} &\geq W_{jk} \geq W_{ji} \geq W_{ki} > 0; \end{aligned} \quad (12)$$

– для м-разрывов:

$$W_{jj} \geq W_{kk} \geq W_{or} > W_{ii} > 0, \quad (13)$$

где  $W_{0s}$ ,  $W_{or}$  — фоновые уровни соответственно м-разрывов и м-сдвигов, они изотропны и однородны в ненагруженном материале.

Матрица фоновых микродефектов в ненагруженном материале, как следует из (3) и последующих формул, является полностью симметричной, т. е.

$$W_{ii} = W_{or}; \quad W_{ij} = W_{0s}. \quad (14)$$

#### 4 Структуры микродефектов

Следует, тем не менее, обратить внимание на полезную для будущих теоретических построений возможность вероятностной трактовки микродефектов  $W_{ij}$  и сплошностей  $T_{ij}$ . Так, поскольку м-разрывы  $W_{ii}$  и м-сдвиги  $W_{ik}$  удовлетворяют неравенствам

$$0 \leq W_{ii} \leq 1, \quad 0 \leq W_{ij} \leq 1$$

и обладают всеми свойствами, присущими вероятностям (аддитивности, объединения и др.), их можно с полным правом трактовать как вероятность повреждения тем или иным микродефектом части соответственно ориентированной площади. При этом микродефекты  $W_{ik}$  и  $T_{ik}$  представляют собой взаимно исключающие события.

Микродефекты как объекты, обладающие свойством случайного и равномерного распределения по объему изотропного материала, могут, в соответствии с теорией множеств, образовывать различные совокупности (структуры) при наложении друг на друга.

В самом общем случае в теле существуют различные по составу структурные области микродефектов (рис. 7).

Перечислим эти области:

– свободные от микродефектов, которые принято называть сплошностью, и являющиеся дополнением к тому или иному участку с заданным типом дефектов;

– однородные, где распространены микродефекты  $W_{ij}$  одной природы, а другие типы микродефектов отсутствуют;

– смешанные, где происходит перекрытие (пересечение множеств) двух и более типов микродефектов  $W_{ii} \cap W_{ij}$ ,  $W_{ij} \cap W_{ik}$ ,  $W_{ii} \cap W_{ij} \cap W_{ik}$  и т. д.

Для каждого из видов напряженно-деформированного состояния тела характерны свои конфигурации поврежденностей. На рисунке 8 показан один из простейших случаев однородного напряженного состояния материала — одноосное растяжение.



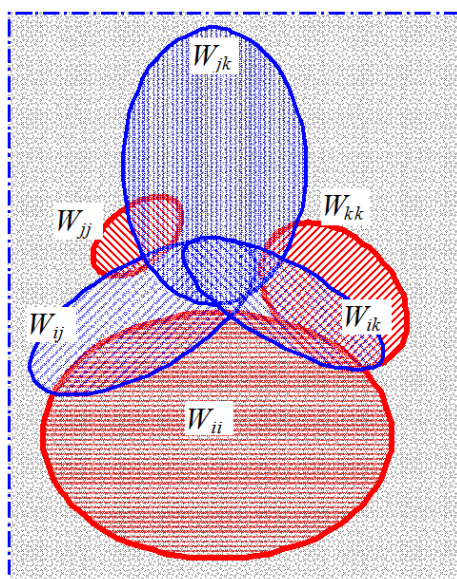


Рисунок 7 Условный вид структурных областей микродефектов при объемном НДС тела

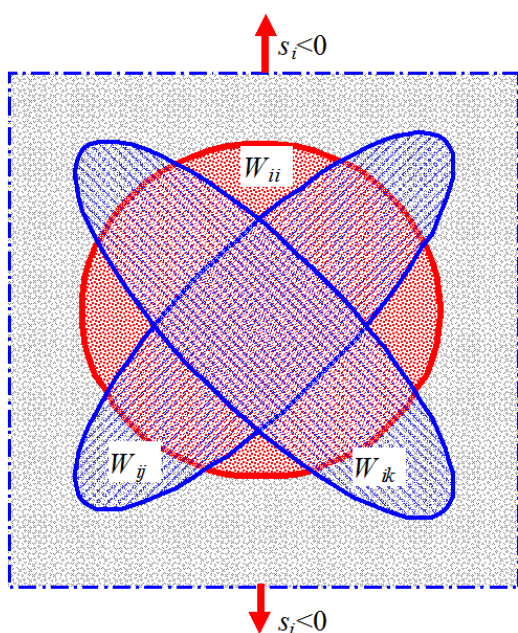


Рисунок 8 Взаимодействие разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  дефектов при растяжении тела по направлению  $i$

Условно показаны без соблюдения масштабов занимаемых площадей возникающие при растяжении дефекты. Таких совокупностей микродефектов будет всего три: дефекты разрыва  $W_{ii}$  на площадке с нормалью  $i$ , на которой действуют растягиваю-

щие напряжения  $s_i < 0$ , и микродефекты сдвига на примыкающих наклонных (под углом 45 градусов) площадках  $W_{ij}$  и  $W_{ik}$ . Всего при одноосном растяжении материала будут существовать три площадки с однотипными микродефектами, три области с наложением двух типов дефектов и одна область, где пересекутся все три возникающих при растяжении микродефекта (один тип разрыва и два типа сдвига).

Соотношения между микродефектами при одноосном растяжении можно записать следующими неравенствами:

$$W_{ij} = W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} \cap W_{ii} > 0 = W_{jk}, \\ W_{ii} > 0 = W_{jj} = W_{kk}.$$

Взаимодействием  $m$ -разрывов друг с другом и с  $m$ -сдвигами можно пренебречь, поскольку влияние этих пересечений как структур микродефектов на НДС тела оказывается незначительным, особенно на начальных этапах нагружения материала.

Более сложным является случай нагружения материала одноосным сжатием, в чем можно убедиться по рисунку 9. Как следует из дальнейшего рассмотрения процессов возникновения и залечивания микродефектов, здесь будут области существования иных типов микродефектов: уже четыре области с одним из типов микродефектов  $W_{jj}$ ,  $W_{kk}$ ,  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  и три области с пересечением двух типов микродефектов, у которых совпадает один из индексов, а именно:  $W_{jj} \cap W_{ij}$ ,  $W_{kk} \cap W_{ik}$  и  $W_{ik} \cap W_{jk}$ . Области пересечения трех типов микродефектов в этом случае не существует.

Запишем в виде неравенств соотношения между возникающими структурами микродефектов при одноосном сжатии:

$$W_{ij} = W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} \cap W_{ii} > 0 = W_{jk}, \\ W_{ii} = 0 < W_{jj} = W_{kk}.$$

Как видно из приведенных соотношений, уже на начальном этапе введения базовых понятий реономной микромеханики обнаруживается существенная разница в протекании, казалось бы, подобных про-

цессов нагружения материала — одноосного сжатия и растяжения. В общепринятой практике трактовки процессов неупругого поведения материалов (с позиций классических теорий пластичности и ползучести) таких различий не должно быть. На самом деле эти различия принципиальны и неопровержимо доказывают отсутствие подобия даже между рассматриваемыми простейшими случаями нагружения твердого тела.

Опираясь на вышеприведенные примеры, можно описать с помощью подобных неравенств и другие случаи НДС тела для любых вариаций параметра Лодэ. Попутно обратим внимание на то, что невозможно создать такое НДС, при котором возникает лишь один тип микродефекта: м-разрыв или м-сдвиг, т. е. микродефекты проявляют свойство коллективного появления. Отсюда следует важный вывод из разработанной теории микродефектов: не существует «чистого» сдвига, растяжения или сжатия. Этот вывод заставляет пересмотреть на новой основе существующие методики определения механических свойств материалов и в первую очередь — показателей их прочности.

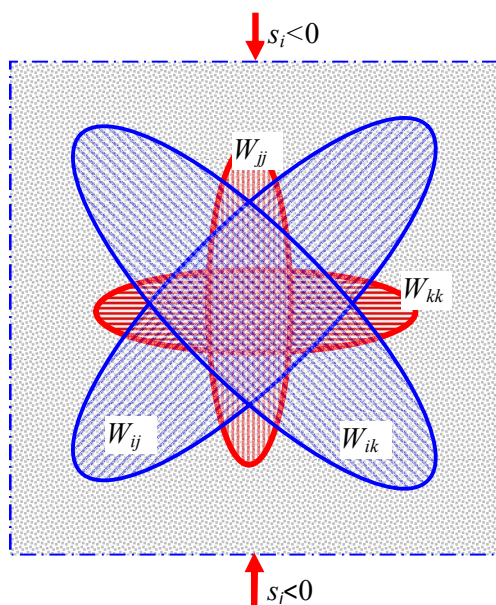


Рисунок 9 Взаимодействие м-сдвигов  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  с м-разрывами  $W_{jj}$ ,  $W_{kk}$  при одноосном сжатии тела по направлению  $i$

Особенности структур микродефектов как основы представления внутреннего строения материала и их изменение во времени открывают возможность для более адекватного и достоверного описания механического состояния подверженного внешним термомеханическим воздействиям тела. Однако в силу особых свойств реономных процессов рождения, рекомбинации и залечивания микродефектов и их ансамблей во времени в дальнейшем придется с целью определения трансформации НДС тела и его свойств еще более усложнить описания механического состояния материала. Именно эти направления и будут темой дальнейших публикаций.

#### Выводы:

1. Проблема описания механических свойств и поведения твердого тела с повреждениями получила глубокое, но далеко не полное развитие. Попытки оперировать не вполне оформленными понятиями поврежденности и сплошности стали препятствовать развитию исследований в этом направлении.

2. Показано, что вместо отвлеченного параметра «поврежденность» введены Z-ансамбли микродефектов в виде сочетания микросдвигов и микроразрывов, для описания которых предложена несимметричная матрица второго ранга.

3. Исследованы типы, ориентация и ансамбли микродефектов в зависимости от НДС, показаны принципиальные различия их структур при растяжении и сжатии материала.

4. Впервые введены фоновые (первичные) уровни плотности м-сдвигов и м-разрывов, дан анализ их анизотропных изменений при нагружении тела растяжением или сжатием. Доказана невозможность существования одиночных микродефектов.

5. Изучены основные закономерности взаимодействия микродефектов и основные структурные области их возможного пересечения на основании присущих для микродефектов вероятностных свойств.

6. Полученные результаты могут служить базой для разработки новой теории напряженно-деформированного состояния микродефектного тела и описания процессов его разрушения при произвольной нагрузке.

### Библиографический список

1. Panin, V. E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids [Text] / V. E. Panin // *Theor. Appl. Fracture Mech.* — 1998. — Vol. 30. — No. 1. — P. 1–11.
2. Сосновский, Л. Концепции поврежденности материалов [Текст] / Л. Сосновский, С. Щербаков // *Обзор: Вестник ТНТУ.* — 2011. — Спецвыпуск. — Ч. 1. — С. 14–23.
3. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения [Текст] / Л. М. Качанов. — М.: Наука, 1974. — 312 с.
4. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. — М.: Наука, 1987. — 388 с.
5. Ильюшин, А. А. Об одной теории длительной прочности [Текст] / А. А. Ильюшин // *Инж. журн. МТТ.* — 1967. — № 3. — С. 21–35.
6. Работнов, Ю. Н. О разрушении твердых тел [Текст] / Ю. Н. Работнов // *Проблемы механики твердого деформируемого тела.* — Л., 1970. — С. 353–357.
7. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение [Текст]: пер. с англ. / Дж. Коллинз; под ред. Э. И. Григолока. — М., 1984. — 624 с.
8. Биргер, И. А. Детерминирование и статистические модели суммирования повреждений [Текст] / И. А. Биргер // *Проблемы прочности.* — 1978. — № 11. — С. 3–11.
9. Протосеня, А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород [Текст] / А. Г. Протосеня, А. Н. Ставрогин. — М.: Недра, 1992. — 224 с.
10. Ставрогин, А. Н. Прочность и деформация горных пород в допредельной и запредельной областях [Текст] / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов, О. А. Ширкес, Е. Д. Певзнер // *ФТПРПИ.* — 1981. — № 6. — С. 2–11.
11. Boudifa, M. A micromechanical model for inelastic ductile damage prediction in polycrystalline metals for metal forming [Text] / M. Boudifa, K. Saanouni, J.-L. Snavosne // *Int. J. Mech. Sci.* — 2009. — Vol. 51. — P. 453–464.
12. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
13. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. — М.: Наука, 1974. — 560 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати зам. директора института  
РАНИМИ АН ДНР д.т.н., проф. Дрибаном В. А.,  
к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Шульгиным П. Н.

Статья поступила в редакцию 25.02.2022.

**Doctor of Technical Sciences, Professor Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**

### ENSEMBLES AND STRUCTURES OF MICRODEFECTS IN A SOLID (ROCK)

The paper considers the problem of accounting its damage and continuity, which is relevant for the development of solid mechanics. In contrast to the fixed simplified interpretations of scalar measures of damage, the concept of its description has been proposed using an asymmetric second-rank matrix, whose elements are micro-fractures and micro-shifts. It is shown that they arise in the material in the form of a structural ensemble of a Z-defect, differently oriented in the space of main sites of the stress-strain state. The existence of primary (background) microdefects is proved for the first time. The types, ensembles and structures of microdefects depending on the stress-strain state are investigated; the fundamental differences of their structures during stretching and compression of the material are shown.

**Key words:** damage, continuity, microdefects, micro-shift, micro-fracture, Z-ensemble, matrix of microdefects, background levels of microdefects, structures of microdefects.