

Аннигиляционный механизм землетрясений

© **В. С. Кравченко**, 2012

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 16 мая 2011 г.

Представлено членом редколлегии Б. Г. Пустовитенко

Запропоновано механізм тектонічних землетрусів, який ґрунтується на вивільненні енергії, накопиченої гірськими породами внаслідок пластичної деформації.

A mechanism of tectonic earthquakes based on release of energy accumulated by rocks as a result of plastic deformation has been proposed.

Введение. Современные представления о механизме тектонических землетрясений основываются на гипотезе о накоплении в горных породах земной коры упругих напряжений вследствие тектонических процессов. Землетрясение возникает в случае, когда упругие напряжения превышают прочность горных пород [Магницкий, 1965; Болт, 1981; Линьков, 1987 и др.]. Процесс подготовки землетрясения, его спусковой механизм и сам механизм остаются гипотетическими и дискуссионными. Разнообразие точек зрения исследователей на эти процессы обусловлены сложностью, а в ряде случаев — невозможностью непосредственного исследования процессов, которые происходят в глубинных пластах земной коры.

Пластическая деформация горных пород в сейсмологии считается необратимой и исключается как возможная причина землетрясений. Такие представления существенно ограничивают поиск предвестников, способов прогнозирования и возможности предотвращения или ослабления катастрофических землетрясений.

Предложенный в настоящей статье механизм основан на особенностях и эффектах, сопровождающих критическую стадию полигонизации, установленную при отжиге деформированных металлических материалов [Засимчук и др., 1978; Засимчук, Кравченко, 1980; Кравченко, Харченко, 1981]. Ее суть состоит в том, что утрата механически уравновешенного состояния дислокационной системы сопровождается консервативным перераспределением дислокаций, их аннигиляцией и возникновением упругих напряжений. Уровень этих напряжений может заведомо превышать разрушающие и достигать уровня теоретиче-

ской прочности [Кравченко, Харченко, 1981].

Критическая стадия полигонизации является фундаментальной закономерностью в развитии дислокационной системы кристаллических материалов и, по-видимому, может осуществляться не только в металлических материалах, но и в породах земной коры.

В основе предложенного механизма находятся следующие положения:

- энергия в горных породах длительно (годы, века) накапливается путем образования дислокаций (линейных дефектов кристаллической решетки) вследствие пластической деформации (ползучести) материала при тектонических процессах;
- дислокационная система находится в механически уравновешенном состоянии, но термодинамически неустойчива, и поэтому перестраивается в состояние с наименьшей энергией, т. е. хаотически распределенные дислокации упорядочиваются, создавая дислокационные стенки;
- одновременное упорядочение дислокаций в материале нарушает состояние упругого равновесия, в котором находится дислокационная система, из-за чего дислокации перемещаются консервативно (скольжением) с последующей аннигиляцией противоположных по знаку дислокаций;
- встречное перемещение противоположных по знаку дислокаций к моменту их аннигиляции является быстрым (секунды, минуты) процессом самопроизвольной деформации, что обуславливает изменение геометрии (формы) участка материала, охваченного этим процессом. В результате взаимодействия этого участка с

окружающей средой возникают упругие напряжения. Другими словами, происходит трансформация пластической деформации в упругую.

Подготовительный период. Вследствие тектонических процессов горные породы земной коры деформируются. Возникающие при этом упругие напряжения в условиях высоких температур релаксируют путем образования линейных дефектов кристаллической решетки — дислокаций, т. е. происходит пластическая деформация материала. Дислокации являются мощными дефектами и накопленная ими энергия может существенно превышать энергию упругой деформации. При повышенных температурах, когда возможно перераспределение дислокаций, формируется полигонизационная структура со знакопеременными дислокационными границами. Дислокации в границах ячеек неупорядочены, поэтому такие границы имеют поля дальнедействующих напряжений. В целом такая система находится в состоянии упругого равновесия, но термодинамически не уравновешена и дислокационные границы перестраиваются в субграницы. Рассмотрим этот процесс детально.

Для простоты ограничимся границами наклана. В этом случае термическая активация будет оказывать содействие преобразованию таких границ в знакопеременные субграницы.

Лимитирующим звеном образования субграниц из неупорядоченных слоев (границ ячеек) является переползание избыточных дислокаций на минимальное расстояние порядка периода субграницы L/M . Скорость переползания V можно оценить, используя зависимость, предложенную в работе [Косевич, 1978]:

$$V = \frac{2\pi D}{\mathbf{b} \ln(L/r_0)} \left(\frac{V_a P'_{xx}}{kT} \right), \quad (1)$$

где D — коэффициент самодиффузии; V_a — атомный объем, равный приблизительно \mathbf{b}^3 ; \mathbf{b} — вектор Бюргерса; P'_{xx} — компонента тензора (девиатора напряжений); r_0 — радиус ядра дислокаций; $2L$ — длина границы.

Поскольку субграница формируется из границы ячейки, в которой дислокации распределены неупорядоченно, для приближенной оценки P'_{xx} можно воспользоваться уравнениями, предложенными в работе [Масюкевич, Рябошапка, 1975] для компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} :

$$P'_{xx} = \sigma_{xx} - \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}),$$

$$\sigma_{xx} = \frac{AM}{2Lh} \left\{ (L-y) \left[\arctg \frac{x+h}{L-y} - \arctg \frac{x-h}{L-y} \right] - (L+y) \left[\arctg \frac{x+h}{L+y} - \arctg \frac{x-h}{L+y} \right] \right\} + \sigma_{yy}, \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{AM}{8Lh} \left\{ (h-x) \ln \frac{(h-x)^2 + (L-y)^2 + (h+x) \ln \frac{(h+x)^2 + (L-y)^2}{(h+x)^2 + (L+y)^2} \right\}, \quad (3)$$

$$\sigma_{zz} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \quad (4)$$

где $A = G\mathbf{b}/2\pi(1-\nu)$; M — число дислокаций в слое (границе ячейки); $2h$ — толщина слоя; $2L$ — длина слоя; ось x параллельна направлению вектора Бюргерса дислокаций в слое; ось y параллельна границе слоя; ось z совпадает с направлением дислокационной линии; начало координат расположено в середине слоя; G — модуль сдвига; ν — коэффициент Пуассона.

Приняв $\nu=0,3$ для P'_{xx} , получим

$$P'_{xx} = 1/3(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \quad (5)$$

и при $x=y=L$, $P'_{xx} \approx -BG\mathbf{b}M/L$, где B — числовой коэффициент, близкий к 0,1 в интервале отклонений $h/L=1 \div 0,1$. Из формул (1) и (5) следует

$$V \approx \frac{BD\mathbf{b}^3GM}{LkT} \quad (\text{при } L \gg r_0). \quad (6)$$

Время τ_y , необходимое для упорядочения границы ячейки, оценивается таким образом:

$$\tau_y \approx \frac{L^2 kT}{M^2 BD\mathbf{b}^3 G}. \quad (7)$$

Как следует из формулы (7), время τ_y существенно зависит от плотности дислокаций в рассматриваемой границе, уменьшаясь при увеличении плотности. Значит, прежде всего упорядочиваются сильно разориентированные границы ячеек с наибольшей плотностью избыточных дислокаций. Это создает градиент степени упорядочения дислокационной структуры в любой промежуток времени.

Спусковой механизм землетрясения. Неодновременность упорядочения дислокаций в различных границах ячеек приводит к неустойчивости формирующихся субграниц. Это связано с разным дальнедействием полей напряжений регулярных субграниц и границ ячеек: в отличие от последних поле напряжений субграницы исчезает на расстоянии, сравнительном с ее периодом [Косевич, 1978].

Поле далекодействующих напряжений около близлежащих границ ячеек действует на упорядоченную (или частично упорядоченную) область подобно внешнему напряжению. Основное условие неустойчивости субграниц можно, таким образом, сформулировать так: субграницы, которые формируются в материале с ячеистой структурой, могут оказаться неустойчивыми и рассыпаться, если сдвиговая компонента напряжений (σ_{xy}), которая действует из области неупорядоченных границ ячеек, превысит напряжение связи дислокаций в субграницах.

Условие рассыпания субграниц можно выразить аналитически следующим образом. Напряжение, создаваемое дислокациями в субгранице, согласно работе [Хирт, Лоте, 1972], определяется следующим образом:

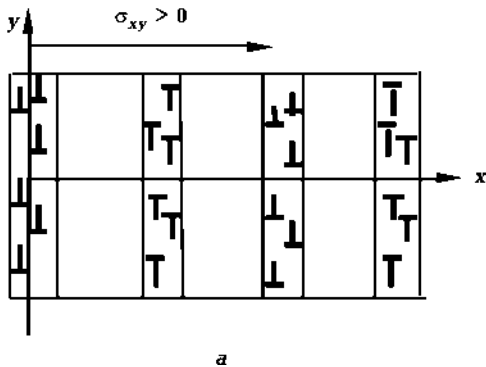
$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 2\pi x}{d} \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi}{d} x - \cos \frac{2\pi}{d} y - 1 \right), \quad (8)$$

где d — расстояние между дислокациями; координата x измеряется в направлении, перпендикулярном субгранице; координата y — вдоль субграницы;

$$\sigma_0 = \frac{Gb}{2d(1-\nu) \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi}{d} x - \cos \frac{2\pi}{d} y \right)^2}.$$

На субграницу действуют напряжения границы ячейки, которые, согласно [Масюкевич, Рябошапка, 1975], можно выразить так:

$$\bar{\sigma}_{xy} = \frac{GbM}{16\pi(1-\nu)Lh} \left\{ (L-y) \ln \frac{(L-y)^2 + (h+x)^2}{(L+y)^2 + (h-x)^2} + (L+y) \ln \frac{(L+y)^2 + (h+x)^2}{(L+y)^2 + (h-x)^2} \right\}. \quad (9)$$



Здесь обозначения те же, что в формулах (2)—(4). Если напряжения, которые определяются формулой (9), превышают σ_{xy} для дислокаций в субгранице, последняя становится неустойчивой и может рассыпаться. Запишем это условие для центральной дислокации ($y=0$), предположив, что субграница находится на расстоянии $2L$ от границы ячейки. Тогда

$$\bar{\sigma}_{xy} \approx \frac{GbM}{10\pi(1-\nu)L}, \quad \sigma_{xy} = \frac{Gb}{d} \frac{\pi x}{d(1-\nu)} \frac{\left(\operatorname{ch} \frac{2\pi}{d} x - 1 \right)}{\left(\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{d} \right)^2}.$$

Максимальное напряжение σ_{xy}^{\max} , которое удерживает дислокацию в субгранице, определяется при $x=d/2\pi$:

$$\sigma_{xy}^{\max} \approx \frac{Gb}{10d(1-\nu)}.$$

Условие рассыпания субграницы можно записать в следующем виде: $M/\pi L \geq 1/d$, т. е. субграница рассыпается, если в соседней границе ячейки такой же мощности неупорядоченной остается около трети дислокаций.

Таким образом, неодновременность образования регулярных субграниц в разных объемах деформированного материала приводит к неустойчивости дислокационной системы. В реальных объектах неустойчивыми становятся, как правило, лишь частично упорядоченные границы в тот момент, когда в процессе перестройки дислокационной системы появляется нескомпенсированное поле далекодействующих напряжений. Схематично это можно показать на рис. 1.

Под влиянием нескомпенсированных напряжений дислокации границ начнут перемещаться вдоль оси x так, чтобы $\bar{\sigma}_{xy} \rightarrow 0$. При

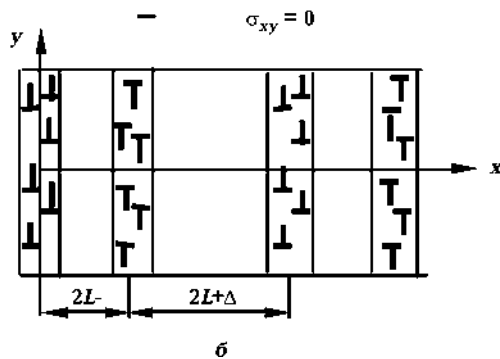


Рис. 1. Схема перестройки дислокационной структуры под влиянием далекодействующих напряжений: а — начальный этап, б — после смещения дислокаций.

этом дислокации противоположных знаков будут смещаться навстречу друг другу, что приведет к возникновению упругого взаимодействия σ_{xy}^* между границами противоположных знаков вследствие их попарного сближения. Эти напряжения вызовут дальнейшее перемещение дислокаций противоположных знаков навстречу друг другу, что можно оценить согласно уравнению (9). Если центральные дислокации каждой из границ длиной $2L$ смещаются на расстояние $\Delta x = L/\pi M$ так, как показано на рис. 1, то между дислокационными границами ячеек возникнут соответствующие этому смещению напряжения упругого взаимодействия:

$$\Delta\sigma_{xy}^* = \sigma_{xy}(x_1) - \sigma_{xy}(x_2),$$

где $x_1 = 2L - L/\pi M$; $x_2 = 2L + L/\pi M$.

Можно считать, что под влиянием таких напряжений дислокации перемещаются консервативно до встречи с дислокациями противоположного знака. При этом они могут либо аннигилировать, если перемещаются в одной плоскости, либо создавать дислокационные диполи, если перемещаются в параллельных плоскостях.

Трансформация пластической деформации в упругую. Встречное перемещение противоположных по знаку дислокаций с последующей их аннигиляцией вызывает изменение ориентации совершенствующегося участка. При этом необходимо рассмотреть по крайней мере два случая:

- процесс происходит в свободных условиях (например, на краю участка), когда возможно свободное перемещение материала (рис. 2, а). В этом случае осуществляется трансляция материала на величину P ;
- процесс происходит в стесненных условиях (в большом объеме материала и далеко

от края), когда свободное перемещение материала невозможно, как показано на рис. 2, б. В этом случае перемещения дислокаций должно вызвать появление упругих напряжений вследствие реакции окружающей среды на смену геометрии (формы) участка, который совершенствуется.

Рассмотрим сдвиговую компоненту $\sigma_{xy}^{обр}$ тензора упругих напряжений, возникающих в этом случае. Ограничимся случаем, когда дислокационные границы являются границами наклона, которые состоят из параллельных дислокационных линий. Смещение границ противоположного знака навстречу друг другу сопровождается изменением формы объема материала, охваченного рассматриваемым процессом. В области упругих деформаций справедливым является соотношение $\sigma_{xy}^{обр} = G\gamma$, где G — модуль сдвига, γ — деформация сдвига.

Деформация остается упругой до того времени, пока не получат развития релаксационные процессы, которые приводят к необратимым эффектам. Наиболее вероятна релаксация напряжений вследствие размножения и перемещения вновь образующихся дислокаций, т. е. в связи с активацией дислокационных источников, поэтому существование обратных напряжений $\sigma_{xy}^{обр}$ ограничено инкубационным периодом работы источников дислокаций t_0 . После окончания инкубационного периода релаксации напряжений критическая стадия полигонизации будет сопровождаться упруго-пластической деформацией. Используя соотношение $\dot{\gamma} = \rho \mathbf{b}$ (ρ — плотность подвижных дислокаций; \mathbf{b} — вектор Бюргерса; V — скорость перемещения дислокаций; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига) и выразив $V = \partial \bar{x} / \partial t$ ($\partial \bar{x}$ — средняя длина пробега дислокаций), уравнение можно переписать:

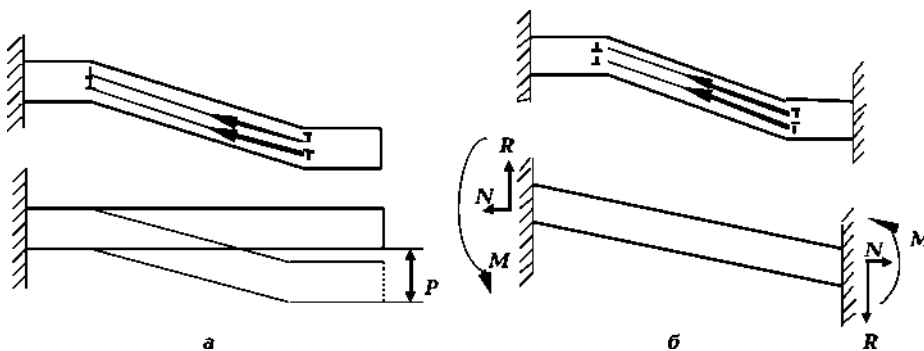


Рис. 2. Схема совершенствования структуры путем перемещения и аннигиляции дислокаций смежных субграниц: а — в свободных условиях (на краю участка), перемещение и аннигиляция дислокаций сопровождаются трансляцией материала на величину P ; б — в стесненных условиях, перемещение дислокаций сопровождается возникновением напряжений (изобразены в виде реакций на опорах).

$$\sigma_{xy}^{обр} = G\rho b \int_0^{t_0} \frac{\partial \bar{x}}{\partial t} dt. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет провести приближенные оценки $\sigma_{xy}^{обр}$, если принять экспериментально наблюдаемые значения параметров дислокационных структур. Таким образом, величина упругих напряжений, согласно формуле (10), при постоянном t_0 существенно зависит от скорости перемещения дислокаций и их плотности.

Значительный интерес представляет исследование распределения напряжений на участке, охваченном рассматриваемым процессом. Оценки такого распределения усложняются тем, что практически невозможно предусмотреть относительное количество одновременно (в период t_0) перемещающихся и аннигилирующих дислокаций. Поэтому мы попытались оценить это распределение, предполагая практически одновременную аннигиляцию всех дислокаций в рассматриваемом объеме, т. е. допустив, что за период t_0 дислокации осуществили сдвиг в микрообъеме. Перемещение дислокаций (дислокационных стенок) навстречу друг другу осуществляет сдвиг области $abcd$ и изменение его геометрии, как показано на рис. 3. Возникающие при этом смещения материала вызовут упругие напряжения, распределение и величина которых определятся методами теории упругости [Амензаде, 1971]. Для области, показанной на рис. 3, решим задачу о плоском напряженном состоянии.

Решаемая система уравнений включает в себя:

1) уравнения равновесия для материальной точки рассматриваемого тела:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0;$$

2) геометрические уравнения, которые связывают перемещения и деформации:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};$$

3) физические уравнения, которые связывают деформации и напряжения:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x),$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy}, \quad \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y),$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — компоненты напряжений; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}$ — компоненты деформаций; x, y — декартовы координаты; u — перемещения в направлении оси x ; v — перемещения в направлении оси y ; E — модуль упругости I рода; ν — коэффициент Пуассона.

К приведенным уравнениям необходимо добавить кинематические граничные условия на контуре при условии закрепления материала по контуру $ABCD$:

$$U|_{ABCD} = 0, \quad V|_{ABCD} = 0.$$

Нагрузка определяется перемещением сторон квадрата $abcd$ путем поворота сторон ab и cd на угол θ . В этом случае

$$U|_{ab} = P, \quad U|_{dc} = -P.$$

Задача решалась методом конечных элементов [Зенкевич, 1975] с использованием программы, приведенной в работе [Билета и др., 1976]. Распределение напряжений и их величина (в условных единицах), полученные в результате решения поставленной задачи, приведены на рис. 4—6.

Таким образом, максимальные сдвиговые напряжения возникают в центре участка, охваченного рассыланием дислокационных границ и аннигиляцией дислокаций. Другими словами, обратные напряжения не могут остановить встречное перемещение дислокаций, так как максимальная величина этих напряжений всегда локализуется на некотором расстоянии от дислокации, перемещение которой производит сдвиг.

Приведенные результаты вычислительного эксперимента важны для понимания процесса

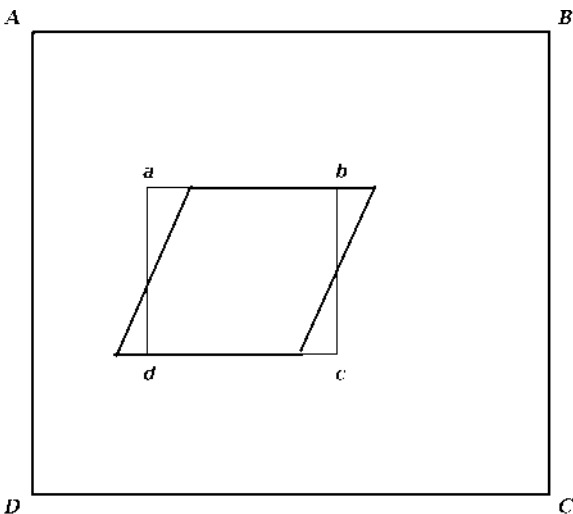


Рис. 3. Изменение геометрии совершенствующегося участка в деформированной матрице.

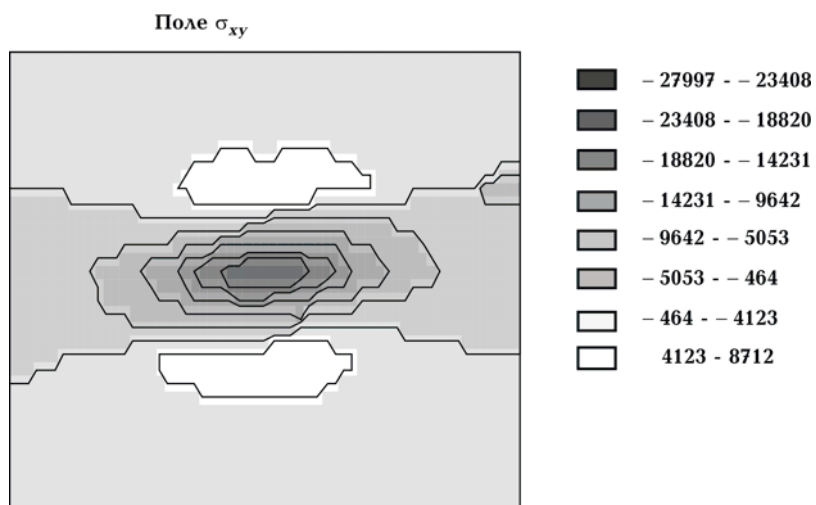


Рис. 4. Распределение сдвиговых напряжений (поле σ_{xy}).

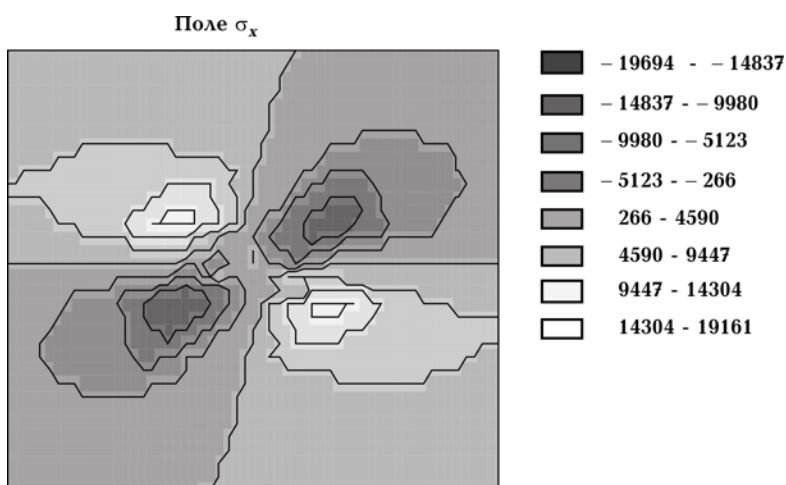


Рис. 5. Распределение напряжения (поле σ_x).

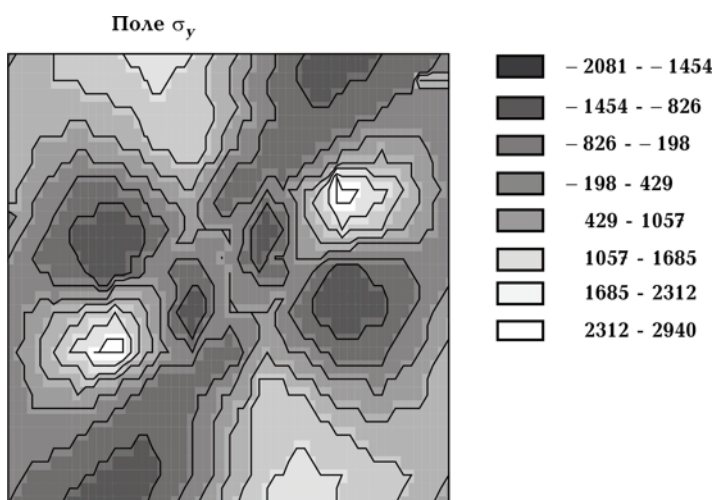


Рис. 6. Распределение напряжения (поле σ_y).

возникновения упругих напряжений и факторов, их определяющих. Однако эти оценки приведены для одной дислокационной ячейки. В реальных условиях процесс перемещения и аннигиляции дислокаций, начавшись в одной ячейке, может охватывать участок больших размеров. Размер участка d (диаметр) определяется по формуле $d=2C_t t_0$, где C_t — скорость поперечной звуковой волны, а t_0 — инкубационный период работы дислокационных источников. Для неметаллических кристаллических материалов t_0 может достигать десятков секунд, $C_t \approx 3$ км/с. Итак, участок, на котором осуществляется усовершенствование кристаллического строения материала, может охватывать площадь в десятки и сотни квадратных километров. Энергия, которая высвобождается во время этого процесса, обуславливает землетрясение и эффекты, которые его сопровождают.

Следует ожидать, что критическая стадия полигонизации в горных породах создаст множество центров рекристаллизации или рекристаллизации *in situ*, аналогично формированию таковых при отжиге деформированных металлических кристаллических материалов. При этом отсутствует преимущественное направление, в котором осуществляется самопроизвольное перемещение дислокаций и возникающие на отдельных участках (в отдельных

изолированных зернах-кристаллитах горной породы) упругие напряжения в объеме всего материала взаимно компенсируются. В этом случае процесс самопроизвольного консервативного перемещения дислокаций должен сопровождаться типичными для рекристаллизации эффектами — тепловым, звуковой эмиссией, совершенствованием строения материала, зарождением микротрещин, аномальным массопереносом, возникновением точечных дефектов и пр.

Однако на процесс критической стадии полигонизации могут оказывать существенное влияние текстура материала и, особенно, внешние упругие напряжения. Это определяет перемещение дислокаций (сдвиг) преимущественно в одном направлении и, таким образом, создает условия для суперпозиций нескомпенсированных напряжений. Суперпозиция напряжений определяет максимальный их уровень в центре сдвига. Их величина может заведомо превышать разрушающие напряжения и достигать уровня теоретической прочности.

Вследствие суперпозиции напряжений отбор энергии, необходимой для необратимых явлений в очаге землетрясения, осуществляется со всего объема материала, охваченного критической стадией полигонизации.

Список литературы

- Амензаде Ю. А. Теория упругости. — Москва: Высшая школа, 1971. — 287 с.
- Билета А. Л., Цибенко А. С., Морганюк В. С. Программирование на Фортране. — Киев: КПИ, 1976. — 112 с.
- Болт Б. А. Землетрясения. Общедоступный очерк. — Москва: Мир, 1981. — 256 с.
- Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. — Москва: Изд-во иностр. лит., 1962. — 584 с.
- Засимчук Е. Э., Кравченко В. С. Рекристаллизация, вызванная аннигиляцией дислокаций // Металлофизика. — 1980. — 2, № 5. — С. 64—74.
- Засимчук Е. Э., Кравченко В. С., Харченко В. К. Критическая стадия полигонизации в монокристаллах вольфрама, деформированного сжатием и ее роль в изменении прочности // Проблемы прочности. — 1978. — № 1. — С. 69—73.
- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — Москва: Мир, 1975. — 544 с.
- Косевич А. М. Дислокации в теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1978. — 219 с.
- Кравченко В. С., Харченко В. К. Влияние критической стадии полигонизации на характеристики пластичности вольфрама при высокотемпературных механических испытаниях // Проблемы прочности. — 1981. — № 5. — С. 82—88.
- Линьков Э. М. Сейсмические явления. — Ленинград, 1987. — 248 с.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. — Москва: Недра, 1965. — 378 с.
- Масюкевич А. М., Рябошапка К. П. Поля напряжений и энергия дислокаций, хаотически распределенных в слое и стенке // Металлофизика. — 1975. — Вып. 62. — С. 3—9
- Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. — Москва: Атомиздат, 1972. — 600 с.