ПЛАСТИЧНІСТЬ ГІРСЬКИХ ПОРІД В ГЕОДИНАМІЧНИХ ПОБУДОВАХ ТА ЇЇ ЗАЛЕЖНІСТЬ ВІД ВСЕСТОРОННЬОГО ТИСКУ І СТРЕСУ

В. Шевчук, І. Кузь

(Львівський державний університет імені Івана Франка)

Структурний аналіз формаційних комплексів фанерозойських складчастих областей наочно демонструє складність деформаційних процесів, зміну в часі реологічних властивостей породних комплексів під час формування складчасто-покривних ансамблів. Пластичність гірських порід, тобто їх здатність до незворотних деформацій, може змінюватись протягом деформаційного процесу. Це пов'язано з дією багатьох чинників, зокрема зі зміною умов навантаження, тобто співвідношень силових чинників різної природи, додатковим впливом високих температур і флюїдного режиму.

При невисоких температурах структуроутворення чи не найважливішим чинником підвищення пластичності гірських порід стає всесторонній тиск (надалі - тиск). В тривимірних геологічних системах такий тиск передається середнім нормальним напруженням (кульовий тензор), в той час як стресові (однонапрямлені) тектонічні сили асоціюють з девіаторною частиною тензору напружень. Після експериментів Адамса, котрий вперше довів, що тиск підвищує пороги пластичності і міцності, отримано численні дані, котрі уточнюють цю закономірність. Експериментально досліджений вплив тисків на пружні, пластичні та міцностні властивості гірських порід добре передається графіком (рис. 1), на якому показана залежність поздовжньої відносної деформації ε_z від різниці між напруженням σ_z і величиною рівномірного тиску

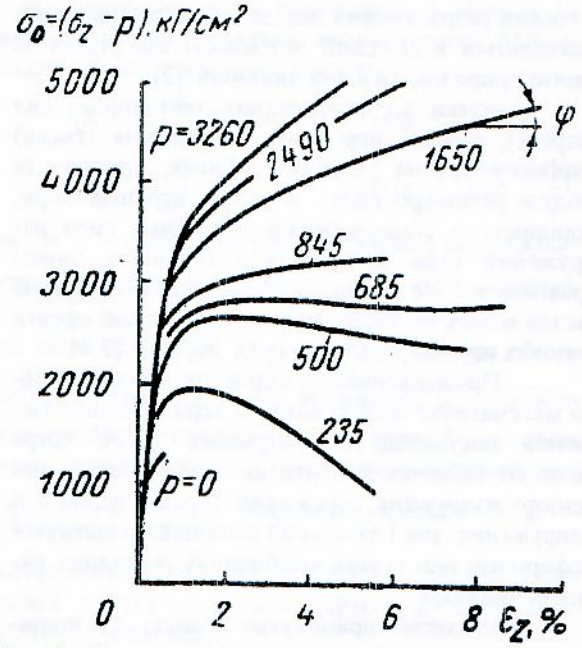

Рис. 1. Діаграми деформацій карарського мармуру в умовах всестороннього стиску різної величини.

$\varepsilon_z = f(\sigma_z - P) = f(\sigma)$, отриманою Т. Карманом ще в 1915 р.

При збільшенні тиску спостерігається зростання міцності мармуру та з'являється здатність до пластичної деформації, спочатку з падінням напружень, потім з деформаційним зміцненням породи. Прямолінійність графіку пластичної деформації свідчить про сталість коефіцієнту зміцнення.

Як це випливає з дослідів Б.В. Байдюка, Н.М. Павлової та інших дослідників [1], вплив тиску на пластичність різний для різних порід. Зокрема, глинисті породи і вапняки деформуються пластично при тисках в сотні барів, а пелітоморфні вапняки, щільні аргіліти та алевроліти виявляють здатність до залишкових деформацій лише при тисках близько 1 кбар. Поведінка пісковиків залежить від складу і структури цементу: силікатний цемент може бути причиною крихких деформацій при практично будь-яких тисках (рис. 2). Зростання порогу текучості у більшості порід тим більше, чим менш пластична порода. Для високопластичних же порід та вапняків цей поріг майже не залежить від зростання тиску. Щодо осадових утворень, то із зростанням тиску їх пластичність закономірно зростає. Більшість досліджених гірських порід, за винятком солей, гіпсів та деяких слабометаморфізованих глин, не

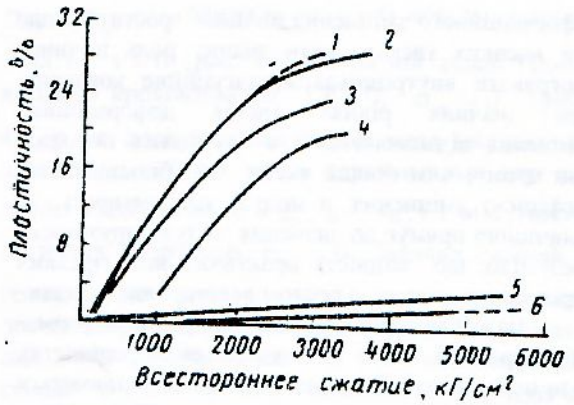

Рис. 2. Залежність величини пластичної деформації від всестороннього стиску для пісковиків (Murill S.A., 1963).

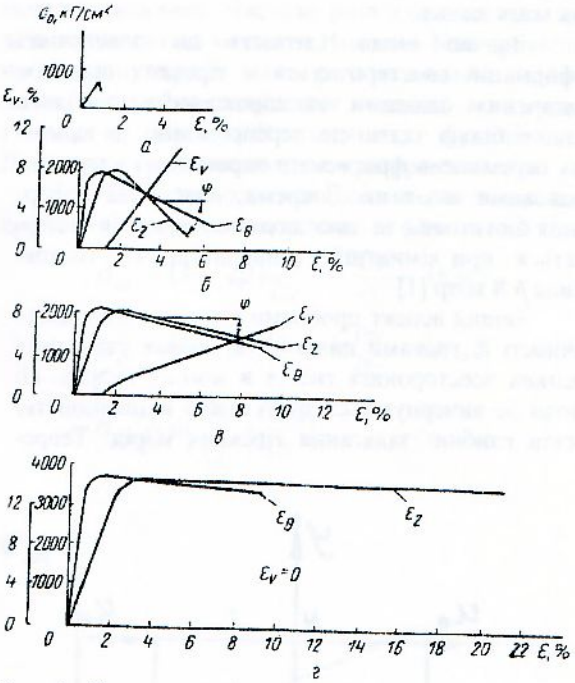

Рис. 3. Діаграми деформацій алевроліта в умовах всестороннього стиску (Байдюк Б.В., 1968).

а – $\sigma_0 = 1$кГ/см^2; *б* – $\sigma_0 = 500$кГ/см^2,

в – $\sigma_0 = 1000$кГ/см^2, *г* – $\sigma_0 = 2000$кГ/см^2,

ε_z - *поздовжня деформація,* ε_θ - *поперечна деформація;* ε_v - *відносна зміна об'єму при деформації.*

виявляє деформаційного зміцнення в пластичній області аж до тисків 2,0-2,5 кбар (рис.3). Пластичні гілки діаграм або горизонтальні, або нахилені вниз (від'ємний модуль пластичності). Коефіцієнт

деформаційного зміцнення починає зростати лише при високих тисках, коли значну роль починає відігравати внутрішньокристалізаційне ковзання. При значних рівнях тисків деформаційне зміцнення відзначається і в глинистих породах. При цьому, чим більші тиски, тим більшим стає коефіцієнт зміцнення, а модуль пластичності за величиною прямує до значення модуля пружності. Зрозуміло, що міцність практично всіх гірських порід також зростає із ростом всесторонніх тисків.

Важливо зазначити, що природні деформаційні процеси часто відзначаються перервністю, коли періоди накопичення напружень змінюються їх релаксацією шляхом пластичних або крихких деформацій. Повторне ж навантаження, за експериментальними даними, сприяє підвищенню меж пружності та пластичності в одних і тих же породних комплексах.

Значно вища здатність до пластичних деформацій спостерігається у гірських породах, збагачених слюдами та піроксенами, оскільки останні більш здатні до переорієнтації та відносних переміщень фрагментів порівняно з кварцем і польовими шпатами. Зокрема, пластична деформація біотитових та двослюдяних гранітів відбувається при кімнатній температурі та тискові понад 3,8 кбар [1].

Інший аспект проблеми взаємозв'язку пластичності із тисками полягає в умовах створення високих всесторонніх тисків в земних надрах. Ці умови не вичерпуються зрозумілою відповідністю тисків глибині залягання гірських порід. Теоретичними розрахунками доведено, що рівень тисків знаходиться в складній залежності від різних за своєю природою силових чинників [2].

Завдяки дії спрямованих тектонічних сил (стресу), середні нормальні напруження (тиски) вирівнюються на значних глибинах, причому їх модулі різко зростають в межах верхньої кори, порівняно із стаціонарними режимами, коли напружений стан визначається головним чином гравітацією. Не менш значний вплив на рівень тисків мають температурні поля та об'ємні ефекти фазових перетворень в гірських породах [3,4].

Продовженням згаданих розрахунків стало математичне моделювання в термопружнопластичній постановці розв'язуваних задач, котре дозволяє водночас оцінити як основні параметри тензору напружень, серед яких середні нормальні напруження, так і загальний потенціал пластичної деформації при різних комбінаціях провідних силових чинників.

Розглянемо прямокутну область Ω шириною $2L$ км, яка розташована на вертикальному зрізі земної кори та обмежена земною поверхнею і паралельною їй площиною, яка лежить на глибині H км. Початок прямокутної декартової системи координат виберемо на вертикальній осі симетрії області в точці на глибині H км. Вісь Ox спрямуємо вздовж горизонталі, вісь Oy - вздовж вертикалі (рис. 4). Отже,

$$\Omega = \left\{ (x, y) \mid -L \le x \le L, \quad 0 \le y \le H \right\}$$

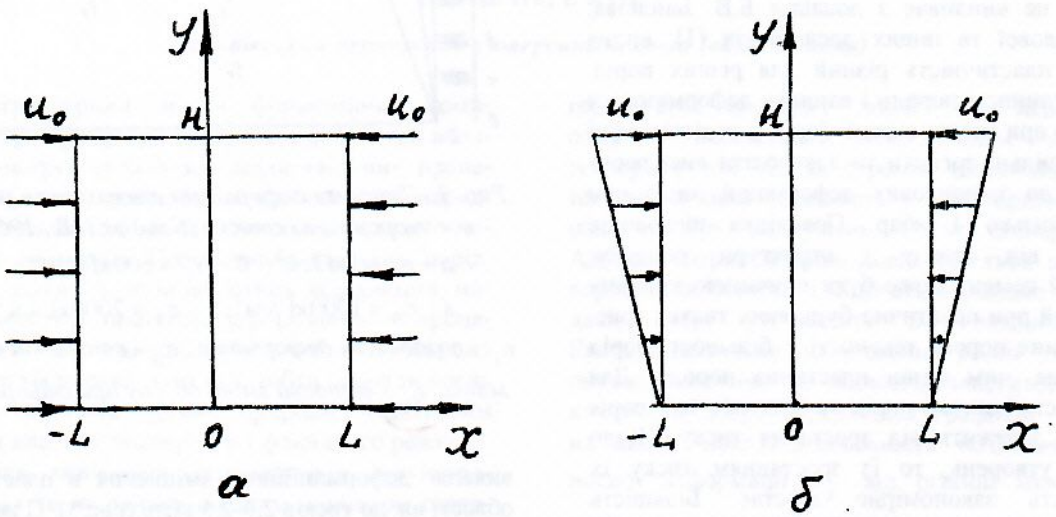

Рис. 4. Область Ω і задані граничні умови
а - із проковзуванням на нижній поверхні, б - із закріпленням нижньої поверхні

Для розрахунку полів переміщень в області Ω використовуємо рівняння квазістатичної плоскої задачі термопружнопластичності

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial x}+\mu\Delta u+F_x-3\kappa\alpha\frac{\partial T}{\partial x}=0$$
$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial y}+\mu\Delta v+F_y-3\kappa\alpha\frac{\partial T}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

де u, v - відповідно горизонтальне і вертикальне переміщення точок об'єму, $\theta=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}$ - відносна зміна об'єму, F_x, F_y - проекції вектора об'ємних сил на осі Ox та Oy відповідно, α - коефіцієнт лінійного теплового розширення, T - різниця між початковою і поточною температурою; $\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ - оператор Лапласа; λ, μ - коефіцієнти Ляме, які у випадку деформаційної теорії пластичності для термально-однорідного тіла мають вигляд:

$$\lambda=\lambda(\varepsilon_{in}),\quad \mu=\mu(\varepsilon_{in})$$
$$\lambda(\varepsilon_{in})=K-\frac{2}{3}\mu(\varepsilon_{in})$$
$$\mu(\varepsilon_{in})=\mu(1-\omega(\varepsilon_{in})) \qquad (2)$$

де K, μ - відповідно модулі об'ємного стиску і зсуву пружного середовища, $\omega(\varepsilon_{in})$-функція пластичності Ільюшина, $\varepsilon_{in}=\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+\varepsilon_x^{\,2}+\varepsilon_y^{\,2}}$ - інтенсивність тензора деформації; ε_x, ε_y - головні значення цього тензора.

Для оцінки рівня пластичних деформацій в земній корі використовуємо модель середовища, що лінійно зміцнюється. Для неї графік залежності інтенсивності тензора напружень ($\sigma_{in}=\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+\sigma_x^{\,2}+\sigma_y^{\,2}}$; σ_x, σ_y - головні значення тензора напружень) від інтенсивності тензора деформацій подано на рис. 5. Тут $\sigma_y=2\mu\varepsilon_y$ - межа текучості, $\gamma=\frac{\mu'}{\mu}$ - модуль зміцнення. Для такого середовища функція $\omega(\varepsilon_{in})$ має вигляд:

$$\omega(\varepsilon_{in})=\begin{cases}0 & при\quad \varepsilon_{in}\le\varepsilon_y\\ (1-\gamma)\dfrac{\varepsilon_{in}-\varepsilon_y}{\varepsilon_{in}} & при\quad \varepsilon_{in}>\varepsilon_y\end{cases}.$$

Будемо вважати, що верхня межа області Ω $y=H$ (рис. 4а, б) вільна від навантаження $\sigma_{yy}=\sigma_{xy}=0$, нижня межа $y=0$ жорстко закріплена $u=v=0$ (рис. 4б) або на ній задані умови вільного проковзування $v=0,\ \sigma_{xy}=0$ (рис. 4а), а на лівій і правій бічній межі (відповідно $x=-H$, $x=H$) - задані горизонтальні переміщення (відповідно $u=u_0$, $u=-u_0$) і відсутність дотичних напружень $\sigma_{xy}=0$. Завдяки силовій і геометричній симетрії задачі для розрахунків достатньо розглядати половину області Ω (наприклад, ліву), задаючи на межі $x=0$ умови жорсткої стінки $u=0,\ \sigma_{xy}=0$ Оскільки задача незв'язана, то поле температур $T(x,y)$ вважаємо відомим після розв'язання задачі теплопровідності [3].

Аналітично розв'язати задачу (1), (2) практично неможливо. Числове розв'язування цієї задачі здійснюється методом Ньютона-Канторовича, на кожному кроці якого розв'язувалась лінійна задача варіаційно-різницевим методом, який грунтується на мінімізації класичного функціонала Лагранжа з урахуванням температурних членів.

Після знаходження поля переміщень напруження визначаються за такими формулами:

$$\sigma_{xx}=(\lambda+2\mu)\frac{\partial u}{\partial x}+\lambda\frac{\partial v}{\partial y}-3K\alpha T$$
$$\sigma_{yy}=(\lambda+2\mu)\frac{\partial v}{\partial y}+\lambda\frac{\partial u}{\partial x}-3K\alpha T \qquad (3)$$
$$\sigma_{xy}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

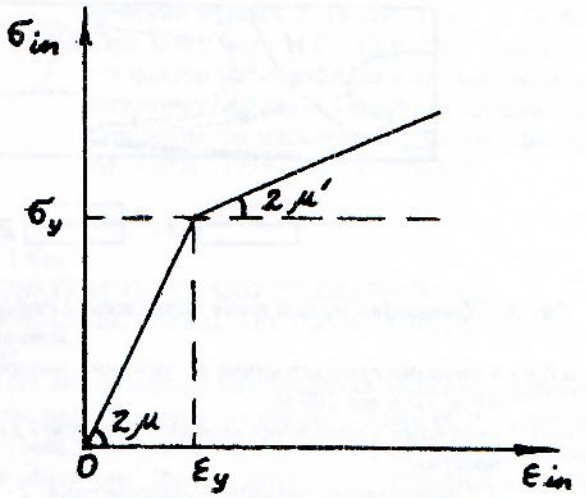

Рис. 5. Графік залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій для матеріалу із лінійним зміцненням

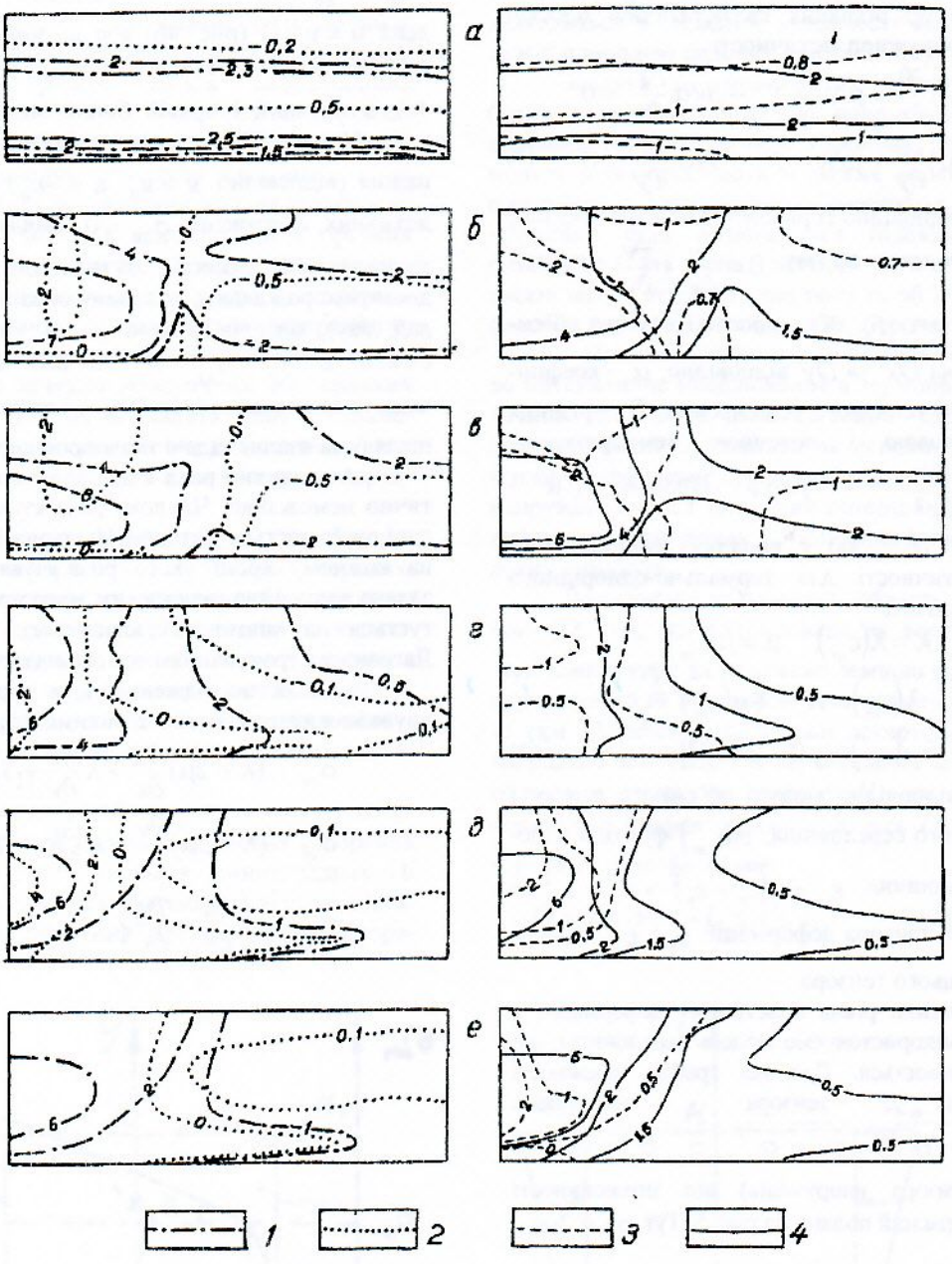

Рис. 6 Двовимірні моделі полів напружень і деформацій, спричинені гравітацією і бічним стиском (ліві частини областей).

а,б,в - з умовами проковзування на нижній поверхні та з переміщенням на лівій бічній поверхні відповідно 40 м, 70 м та 100 м;

г,д,е - з умовами закріплення нижньої поверхні і з такими ж максимальними переміщеннями на лівій бічній поверхні;

1 - максимальні стискуючі напруження; 2 - мінімальні стискуючі (розтягуючі) напруження; 3 - середні нормальні напруження (всесторонній тиск); 4 - загальний потенціал залишкових деформацій.

Побудовано значну кількість плоских моделей різних за розмірами геологічних систем з різними параметрами геологічних середовищ. Як приклад, розглянемо кілька варіантів розрахунків, котрі моделюють напружено-деформівний стан в межах тектонічної пластини, вертикальний розріз якої має розміри 3 км по вертикалі і 20 км по горизонталі (рис. 4) Крайові умови задані такі, як на (рис. 4а) або на (рис. 4б). Пластина знаходиться під дією сили гравітації та бічного стиску, який моделювалося латеральними переміщеннями бічних поверхонь величиною 40 м (рис. 6 а,г), 70 м (рис.6 б,д), 100 м (рис.6 в,е). При цьому, при проковзуванні (рис 4 а) бічні переміщення були однаковими по всій бічній поверхні, а у варіантах із прилипанням на нижній границі (рис.4 б) вони були диференційованими і змінювались за лінійним законом від повної величини у верхній точці бічної поверхні до нуля - в нижній. В зображених на рис.6 моделях параметри середовища задано такими: модуль Юнга $E = 30000$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu = 0{,}25$, модуль зміщення $\gamma = 0{,}1$, межа текучості $\sigma_j = 240$ МПа, питома вага породи $\rho = 2{,}6$ кГ/м^3.

Аналізуючи розраховані поля напружень, перш за все зазначимо суттєві розбіжності при різних умовах на нижній границі. У варіантах із проковзуванням (рис. 6 а,б,в) при допорогових рівнях нормальних і дотичних напружень відзначається майже однорідне поле напружень (рис.6а), котре різко диференціюється з появою залишкових деформацій поблизу навантаженої бічної поверхні (рис.6 б,в). В останніх випадках зона з високими середніми нормальними напруженнями (тисками) постійно розширюється, захоплюючи майже всю нижню частину системи, сприяючи розповсюдженню віртуальної пластичності. Варіанти ж із защемленою нижньою поверхнею та з навантаженням зсувного типу на бічних поверхнях (рис. 6 г,д,е) відзначаються тим, що вже при невеликих навантаженнях (рис.6 г) фіксуються залишкові деформації, котрі передаються підняттям верхньої поверхні поблизу навантаженої бічної. Судячи з рівня компонент тензору напружень, тут переважатиме крихке руйнування з порівняно невеликим розвитком пластичності.

Загалом, поза залежністю від характеру нижньої поверхні, в усіх моделях поле напружень відзначається чіткою зональністю відносно навантаженої поверхні, поблизу якої загальний потенціал залишкових деформацій найбільший.

Отримані результати математичного моделювання мають суттєве значення для геодинамічних побудов, оскільки засвідчують можливість виникнення високих всесторонніх тисків і, відповідно до експериментальних даних, підвищення пластичності в компонентах фанерозойських формаційних комплексів на невеликих глибинах. Розрахунки дозволяють прогнозувати зміну в часі характеру деформації гірських порід залежно від особливостей розвитку верхньокорових колізійних зон

Література

1. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах / Л.А. Шрейнер, Б.В. Байдюк, Н.Н. Павлова и др. - М.: Недра, 1968. - 358 с.
2. Ильюшин А.А. Пластичность. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. -271 с.
3. Шевчук В.В., Лихачов В.В. Математическая модель поля напряжений, вызванного тепловой аномалией в упругой среде // Геофизический журнал. Т. 18, №6, 1996. - с. 74-80.
4. Шевчук В.В., Кузь И.С., Кузь О.Н. Давление как фактор метаморфизма и влияние на него тектонических сил // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. -М.: ГЕОС, 1999. Т. 2. - с. 298-302.

V.Shevchuk, I.Kuz'

PLASTICITY OF ROCKS IN GEODYNAMIC CONSTRACTIONS AND ITS DEPENDENCE FROM COMPREHENSIVE PRESSURE AND ONE-DIRECTIONAL TECTONIC FORCES

Summary

The dependence of rheological properties fanerozoj rocks from one-directional tectonic forces and comprehensive pressure are investigated using the experimental data. The stress and strain fields are obtained based on the solution of two-dimensional problems of thermo-elasto-plasticity. These fields prove the dependence of comprehensive pressure and plasticity of the rocks from the levels of one -directional tectonic forces. The elaborated software gives the possibility to predict the main features of the paleotectonic stress fields in the crust with different boundary conditions, medium parameters and thermal fields.

В. Шевчук, И. Кузь

ПЛАСТИЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД В ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЯХ И ЕЁ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ И СТРЕССА

Резюме

В работе анализируется зависимость реологических свойств фанерозойских породных комплексов от стрессовых тектонических сил и всесторонних давлений с учётом данных экспериментальных исследований. На основе решения двумерных задач термоупругопластичности получены поля напряжений и деформаций, которые доказывают зависимость всесторонних давлений и, как следствие, пластичности горных пород от уровня однонаправленных тектонических сил (боковых перемещений). Результаты математического моделирования позволяют прогнозировать главные особенности палеотектонических полей напряжений и деформационных процессов в верхнекоровых зонах при различных комбинациях силовых факторов различной природы.