

СТРУКТУРА І ДИНАМІКА ЗОН ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЗСУВУ (за результатами фізичного моделювання і польових досліджень)

Наведено результати досліджень (передусім шляхом фізичного моделювання) поширених тектонічних процесів – утворення та розвитку зон горизонтального зсуву (ЗГЗ). Як пластично-в'язкі модельні матеріали використано спеціальні пасти з регульованими реологічними характеристиками, що дало змогу відтворити процеси крихкого руйнування та пластичних деформацій гірських порід, а також процеси перехідних типів. Відтворено характерні часово-просторові закономірності модельованих процесів, виділено системи тріщин, що характеризують їх послідовні стадії, визначено роль кожної системи у структуроутворенні. Наведено приклади зон такого типу в геологічних структурах Берегівського горбогір'я у Закарпатті та деякі результати геофізичного моніторингу їх сучасного геодинамічного режиму.

Ключові слова: фізичне моделювання тектонічних процесів; зони горизонтального зсуву; реологічні характеристики; крихке руйнування; пластичні деформації; системи тріщин; структуроутворення.

Вступ

Зсуви різних масштабів та типів, зокрема, по субвертикальних розломах і тріщинах, є найпоширенішим типом порушень у земній корі ([Гінтов, 2005] та ін.). Особливий інтерес для геологів та геофізиків становлять протяжні зони горизонтального зсуву (ЗГЗ). Оскільки ці зони часто є активними і тепер, вони є об'єктами досліджень для сейсмологів та геофізиків [Дослідження..., 2005] з метою вивчення сучасних геодинамічних (зокрема деформаційних) процесів, пошуків провісників землетрусів, оцінок рівня сейсмічної небезпеки та ін. З іншого боку, як зони розуцільнення порід, сприятливі для міграції флюїдів, ЗГЗ є перспективними зонами для пошуків рудних копалин та покладів вуглеводнів ([Матковський, 1992] та ін.). Але як геологам, так і геофізикам для розв'язання зазначених задач необхідні знання про особливості структури та геодинаміки ЗГЗ. Наукове обґрунтування перспективних для пошуків родовищ ділянок, ефективність пошукових та розвідувальних робіт, а також моніторингових геодинамічних досліджень безпосередньо залежать від знання особливостей внутрішньої будови, просторово-часових зв'язків та закономірностей розвитку тектонічних порушень різного рангу та генезису, взаємодії їх між собою та із складчастими структурами. Частину відповідей на ці питання дають польові геолого-геофізичні дослідження. Однак вони є складними та дорогими, ними важко охопити великі території, вони не можуть надати пряме відтворення процесу утворення структур у часі. Тому фізичне моделювання таких процесів може значно доповнити дані польових досліджень і є достатньо ефективним та результативним.

Фізичне моделювання тектонічних процесів

Відомо досить багато робіт, присвячених фізичному моделюванню зсувних дислокацій та ЗГЗ в цілому ([Riedel, 1929; Clayton, 1966; Skempton, 1966; Tchalenko, 1970; Wilson, 1970; Михайлова, 1971; Wilcox, 1973; Harding, 1974; Стоянов, 1977; Graham, 1978; Odonne, 1983; Sylvester, 1988; Richard, 1988; Семинский, 1988; Бондаренко, 1988;

Бокун, 1988, 1991; Борняков, 2008] та ін.). Таке моделювання проводилось у різних постановках і з різною метою: для структурної геології, для пошуків корисних копалин, для перевірки тих чи інших тектонічних побудов. У результаті досліджень було виявлено основні структурні елементи ЗГЗ, однак еволюція цих зон, їх структурна організація, значення різних факторів у деформаційних процесах залишилися значною мірою нез'ясованими.

Мета та задачі досліджень

Фізичне моделювання ЗГЗ ми проводили у руслі загальної задачі геофізики [Гзовский, 1963], тобто передбачало оцінку значення різних факторів у деформаційному процесі. Загальна мета і конкретні задачі досліджень ставились, враховуючи те, що ЗГЗ у природі є протяжними структурами, перетинають на своєму шляху різні комплекси гірських порід, тому і самі зони мають відрізнятися за своєю будовою. Звідси випливає постановка конкретних задач для фізичного моделювання: приготувати модельні матеріали з різними, але чітко визначеними реологічними властивостями і провести на них моделювання ЗГЗ. Мета цих досліджень – оцінити значення речовинного складу, його реологічних характеристик та особливостей деформування на часово-просторову картину деформацій та руйнувань у моделях. Зрозуміло, що слід намагатися якомога чіткіше пов'язати деформаційну поведінку модельного матеріалу з поведінкою реальних гірських порід. Однак сьогодні зробити це на кількісному рівні неможливо через брак відповідних даних для порід. Тому порівнювати результати фізичного моделювання з реальними польовими даними можливо лише на якісному рівні.

Методика і техніка експерименту

Фізичне моделювання ЗГЗ проводили на спеціальній установці (рис. 1, а) [Бокун, 1981]. Модель являла собою шар модельного матеріалу розміром від 15×15 до 50×50 см і товщиною 1–5 см (рис. 1, б), укладеного на розміщені поряд 2 жорсткі пластини з рифленими (для забезпечення

передачі механічних зусиль на модель) поверхнями і прорізью між ними. Пластини імітували жорстку основу, прорізь – зону зсуву, модельний шар – товщу гірських порід. Пластини переміщувались одна відносно іншої за допомогою пуансонів установки. Для фіксації деформацій і переміщень по тріщинах на поверхню моделі наносилась маркувальна сітка з кроком 1×1 см. Процес деформування спостерігався візуально і фотографувався через певні проміжки часу. Порівнюючи фото, можна простежити характерні структурні перетворення, розвиток тріщин різного рангу та генезису.

Реологічні властивості модельних матеріалів

Важливою відмінністю наших досліджень від робіт інших авторів є належна увага до реологічних характеристик модельних матеріалів. Відомо, що в тектонофізичному моделюванні волога глина (глиниста паста) найчастіше використовується для відтворення геологічних процесів.

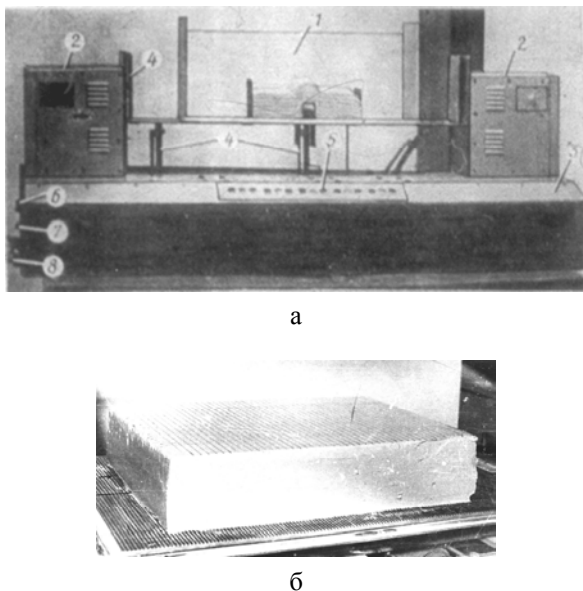


Рис. 1. Установа фізичного моделювання процесів розривотворення на пластично-в'язких матеріалах (а) та модель з глинистої пасти (б)

Однак у цих роботах не наводяться всі необхідні реологічні параметри таких матеріалів, не описуються особливості їх поведінки при деформаціях та умови навантаження в експериментах. Це ускладнює аналіз спостережуваних в експериментах деформацій і порівняння результатів моделювання з даними інших авторів. Для приготування модельних матеріалів для наших експериментів у якості твердої фази використовувались аеросил, порошки бітумного сланцю, карборунду, крейди, кварцового піску різного гранулометричного складу. Як дисперсне середовище використовувались технічний гліцерин, вазелінова олія, вода. Матеріали з різними характеристиками створювались шляхом зміни процентних співвідно-

шень між твердою фазою та дисперсним середовищем. Отримувані матеріали – це пластично-в'язкі маси (пасти). У колоїдній хімії їх зараховують до коагуляційних структур, які відзначаються малою міцністю, яскраво вираженими пластично-в'язкими властивостями, еластичністю, здатністю до релаксації напружень і тиксотропного відновлення міцності з часом. Їх фізико-механічні властивості вивчалися шляхом побудови двох типів реологічних кривих. Один з них – це графік типу $\tau(\varepsilon)$ при $\varepsilon = \text{const}$, що характеризує деформаційну поведінку матеріалу і дає змогу визначити границю текучості τ_s та в'язкість гранично порушеної структури η_m . Інший – графік кінетики деформацій, що відображає розвиток деформацій у часі при постійному навантаженні з подальшим розвантаженням. Ця крива дає змогу визначити модулі пружності (умовно-миттєвий E_1 , еластичний E_2 і рівноважний E), а також в'язкість повзучості η_0 .

У багатьох наших експериментах використовувалась глиниста паста (концентрація 54–58 %), приготована з тонкодисперсної глини гідрослюдистого складу. Її реологічні властивості в умовах чистого зсуву характеризують криві рис. 2.

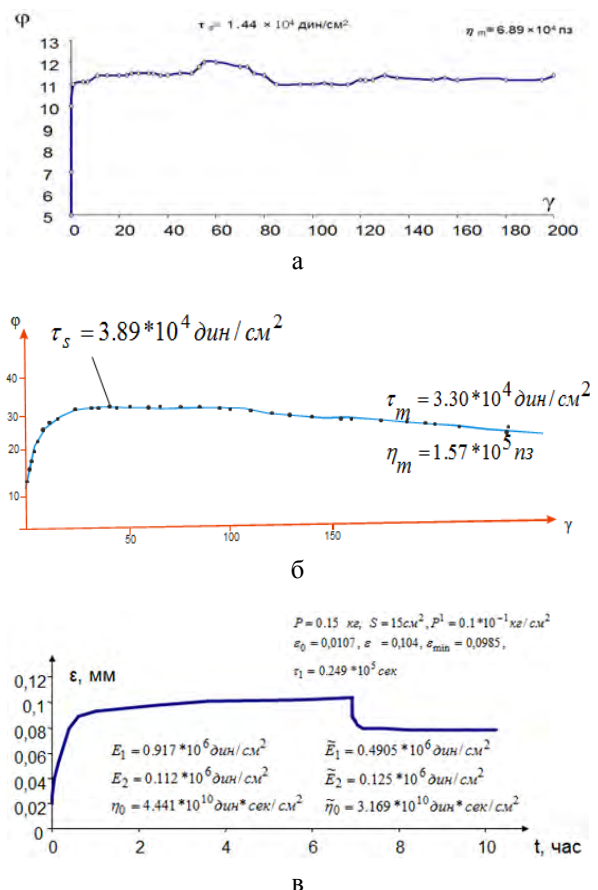


Рис. 2. Реологічні властивості глинистих паст: а – реологічна крива $\tau(\varepsilon)$ при $\varepsilon = \text{const}$ для глинистої пасти; б – те ж для пасти аеросил (15 %) – вазелінова олія (85 %); в – крива кінетики деформації для пасти Веселовської глини (концентрація 58,6 %)

Зокрема, деформаційну поведінку пасти можна описати так: після пружної та зворотної пластичної деформації на прямолінійній ділянці виникають пластично-в'язкі деформації мінімально порушеної структури з високою вязкістю. На ділянці до τ_s напруження різко зростають, що свідчить про зміцнення структури пасти. Після досягнення границі текучості τ_s напруження різко спадають, структурний каркас пасти руйнується (у моделях це момент найбільших структурних перетворень). Далі продовжуються пластично-в'язкі деформації, але уже зруйнованої структури. Місцями спостерігається незначне зростання напружень і їх спад до встановленого рівня. Відбувається локальне руйнування залишків жорсткого каркасу.

Реологічні властивості глинистих паст з додаванням крейди (див. рис. 3) мають свої особливості (особливо різною є зона пластично-в'язких деформацій), що істотно залежать від процентного співвідношення між крейдою та глиною.

Результати експериментів

Із наведеного вище бачимо, що глиниста паста – пружно-в'язко-пластичне середовище, в якому одночасно розвиваються розриви і пластичні деформації, подібно до того, як це відбувається у товщах гірських порід. Утворення ЗГЗ в такому матеріалі ілюструють фото на рис. 4. Швидкість зміщення пластин основи у цьому експерименті становила 1 мм/хв, товщина шару – 10 мм.

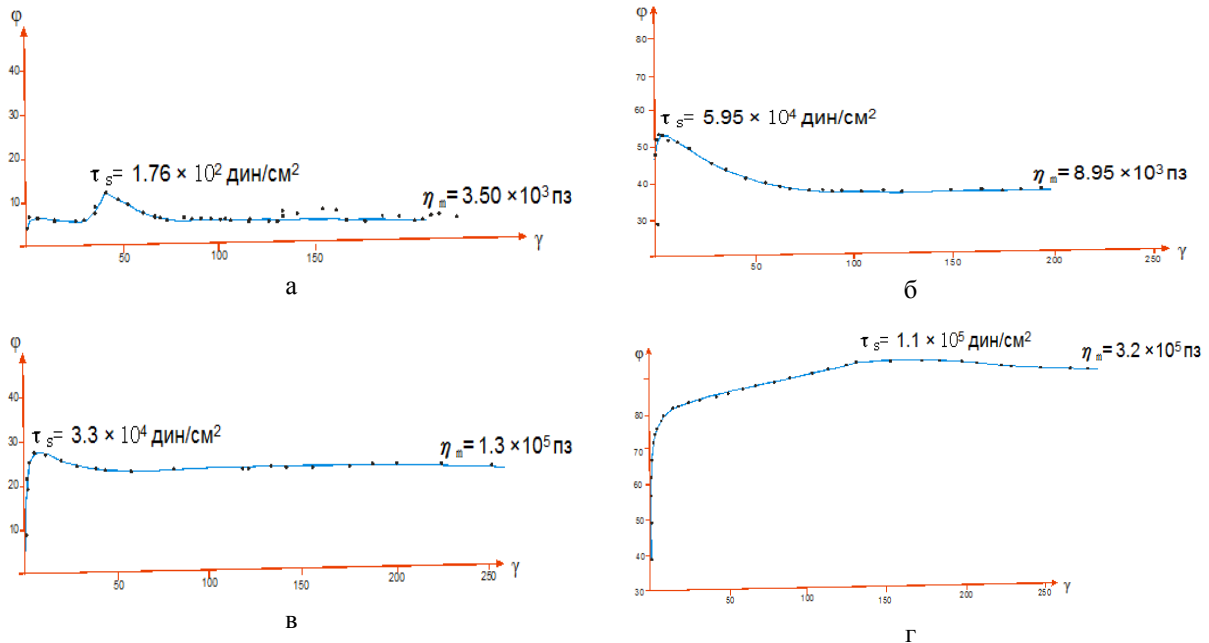


Рис. 3. Реологічні криві $\tau(\epsilon)$ при $\epsilon = \text{const}$ для пасти крейда – глина – гліцерин (50 %) різного складу: а – крейда (50 %); б – крейда (37,5 %) – глина (12,5 %); в – крейда (25 %) – глина (25 %); г – крейда (12,5 %) – глина (37,5 %)

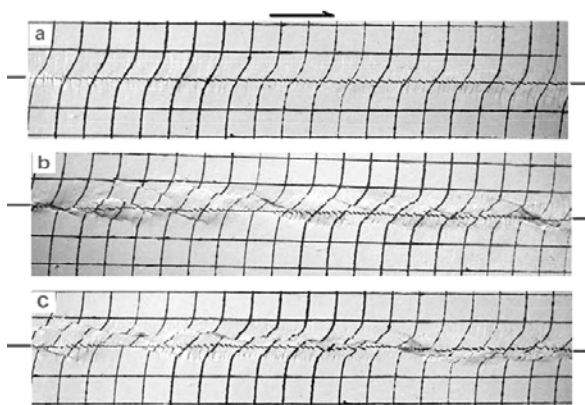


Рис. 4. Три стадії розвитку зони горизонтального зсуву в шарі глинистої пасти (концентрація твердої фази 58 %, $V = 1$ мм/хв) (пояснення в тексті)

На початковій стадії після пластичних деформацій у майбутній ЗГЗ виникає система сколових тріщин R' , яка трасує простягання зони зсуву в основі моделі – у підшві модельного шару (рис. 4, а). Тріщинки паралельні одна одній, крок між ними 1,5–2 мм, орієнтація перпендикулярна до осі зсуву. У подальшому кінці прямолінійних тріщин загинаються, набираючи S-подібного вигляду і протилежного падіння, що свідчить про виникнення обертальних рухів у ЗГЗ, а рівномірність розташування тріщин свідчить про однорідність поля напружень у макромасштабі. Розвиток цих тріщин вглиб зразка не простежений, але, враховуючи їх морфологію та характер розвитку, можна припустити, що це поверхневі тріщини, які виникли як реакція на обертальні рухи. Значення цієї системи тріщин у структуроутворенні незначне, але вони можуть проявлятися в локальних структурах на пізніших етапах розвитку ЗГЗ.

На наступній стадії розвитку ЗГЗ виникає ешелонувана система великих тріщин розтягу (синтетичні тріщини R), яка просторово збігається з простяганням магістрального зсуву в основі і системою тріщин R' (рис. 4, б). Тріщини крутопадаючі, орієнтовані під кутом 25–30° до осі зсуву, крок між ними 45–50 мм. Вони розділяють однорідне поле напружень на почергові зони розтягу (зони розвитку цих тріщин) та стиску (ділянки між тріщинами).

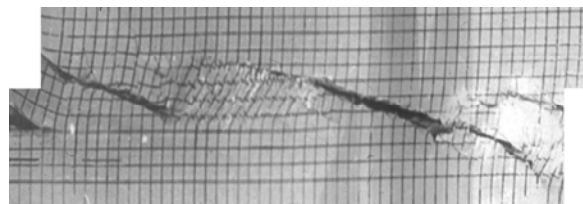
На третій стадії розвитку рух жорсткої основи моделі зумовлює подальший розвиток тріщин системи R. Під час зростання вони огинають суміжні ділянки і з'єднуються з сусідніми аналогічними тріщинами розтягу цієї системи. У результаті утворюється єдина магістральна тріщина (наскрізний розрив), що має в плані звивистий вигляд (рис. 4, с). В експериментах ми спостерігали також спосіб з'єднання тріщин R в єдину наскрізну за допомогою поздовжніх тріщин L (див. рис. 8, в). А. Skempton (1966) та С. Стоянов (1977) вказують на участь у цьому процесі ще й зворотних косих напружень R. Звивистість природних розломів розглядається в роботі М. Гзовського (1953).

Після утворення наскрізної тріщини деформаційний процес у модельній ЗГЗ обмежується пластично-в'язкими деформаціями у вузькій зоні зсуву. У природних умовах тертя берегів ЗГЗ, високі температури і тиски спричиняють поряд з пластично-в'язкими деформаціями зміни реологічних властивостей порід, їх петрологічні та мінеральні перетворення.

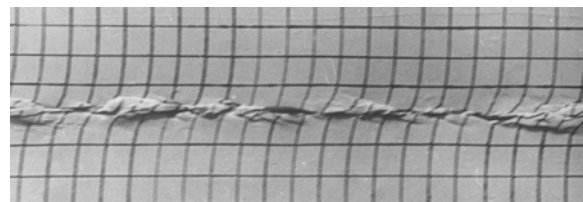
Ешелонувана система тріщин розтягу і ділянки ЗГЗ між ними мають важливе значення не тільки у формуванні магістрального розриву, але і в утворенні ряду структур, відмінних за морфологією та внутрішньою будовою, що ілюструють дані експерименту, показані на рис. 5.

Різноманітність цих структур визначається геометричними параметрами тріщин розтягу R (довжина, крок, кут між тріщиною і напрямком зсуву) та реологічними властивостями модельного матеріалу. Найпростіша з цих структур (не виражена в рельєфі) – монолітний блок (рис. 5, а), який передбачає в умовах стиску (див. маркувальну сітку) і зазнає лише пластичних деформацій. Вихідні параметри цього експерименту такі: товщина моделі 5 см, швидкість навантаження – 0,02 мм/хв, концентрація твердої фази у пасті 54 %.

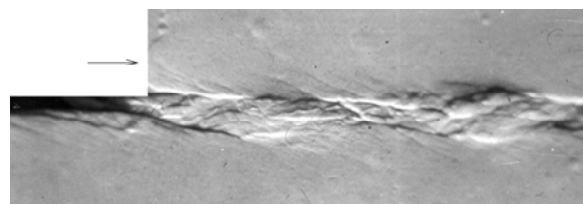
Лінійну систему жорстких горстів-клинів над зсувним розривом ілюструє рис. 5, б. Параметри експерименту – товщина моделі 2 см, швидкість навантаження – 5 мм/хв, концентрація твердої фази у пасті 54 %. Механізм утворення структур такого типу, а також складчастих горстів (рис. 5, в) ми розглядаємо, як трансформацію горизонтальних рухів у ЗГЗ в повороти (обертання міжтріщинних ділянок – кручення зумовлює руйнування та пластичні деформації матеріалу, відбувається збільшення об'єму і в результаті високий внутрішній тиск витискає блок догори).



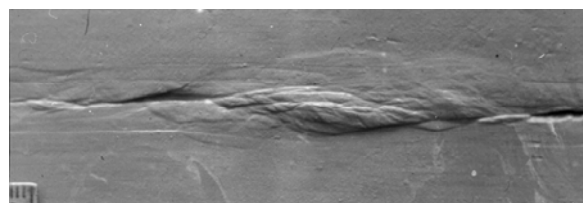
а



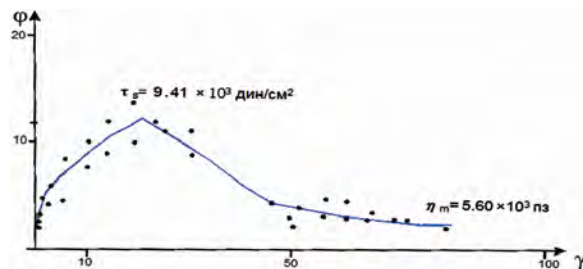
б



в



г



д

Рис. 5. Системи тріщин розтягу та горстових структур, сформовані в процесі розвитку модельних ЗГЗ (пояснення в тексті) і реологічна крива (д) для матеріалу моделі на рис. 5, в

Два складчастих горсти (рис. 5, в) є структурами ЗГЗ, сформованими в експерименті на модельному матеріалі з карборунду та вазелінової олії ($\tau_s=3,53 \times 10^3$ дин/см², $\eta_m=2,12 \times 10^3$ Пз, товщина моделі 1,5 см, швидкість навантаження – 5 мм/хв). Морфологія та генетичний тип складок аналогічні складкам усієї ЗГЗ (детальніше процес їх утворення див. на рис. 10). Це подібні складки волочиння з вертикальними шарнірами (гетеросинклінали за А. Лук'яновим [Лукьянов, 1963]). Реологічну криву для матеріалу моделі наведено на рис. 9, в.

Валоподібне утворення (рис. 5, г) за внутрішньою будовою є складною складчасто-розривною структурою, сформованою в експерименті на модельному матеріалі з карборунду та вазелінової олії з параметрами: товщина моделі 8 мм, швидкість навантаження – 20 мм/хв, $\tau_s=8,24 \times 10^3$ дин/см², $\eta_m=2,35 \times 10^3$ Пз. Механізм утворення цієї і подібних структур визначають, з одного боку, велика протяжність і дуже малий кут з напрямком зсуву тріщин R, а з іншого – висока текучість модельного матеріалу. Практично тріщини збігаються (або близькі до цього) з напрямком зсувного шва, а місцями є його берегами. В цих умовах матеріал моделі легко транспортується (перетікає) в горизонтальному напрямку вздовж шва і акумулюється (скупчується) на закінченнях тріщин R, що не збігаються. Процес скупчення матеріалу супроводжується утворенням розривів різного рангу та генезису – скиди, підкиди, насуви тощо. Слід зазначити, що отримані під час моделювання ЗГЗ та локальні структури у їх межах мають свої аналоги в осадових, хомогенних та інших товщах гірських порід, про що свідчать результати багатьох дослідників (див, наприклад, [Васильев, 1988; Юрель, 1988; Гинтов и др., 1988] та ін). Важливе значення тут мають також процеси дилатансійного розушлінення гірських порід. Тому такі структури є важливим об'єктом досліджень при пошуках різноманітних корисних копалин ([Юрель, 1988; Ковалишин, Братусь, 1984; Матковський, 1992] та ін.). Зокрема, певні аналогії з структурою на рис. 4, г простежуються у структурі сітки розломів та різнорангових розривних порушень і, відповідно, у структурі тріщинуватості порід найбільшої в Берегівському гобогір'ї гори Мужіївської (Великої Берегівської) [Ковалишин, Братусь, 1984; Матковський, 1992; Назаревич, Назаревич, 2000, 2001].

Інші структурні особливості мають ЗГЗ, змодельовані пастами з піску та вазелінової олії. Деформаційну поведінку цих матеріалів в умовах чистого зсуву відображають криві на рис. 6. Паста з фракцією зерен 0,05–0,063 мм має чітку границю текучості ($\tau_s=4,7 \times 10^4$ дин/см²) і руйнується в умовах спаду напружень, не виявляючи пластичних деформацій (рис 6, а). Реологічна крива пасти з фракцією $\leq 0,05$ мм (рис 6, б) показує, що після пружної та зворотної пластичної деформації паста зазнає пластично-в'язких деформацій зі зміцненням структурного каркасу до досягнення межі пластичності $4,1 \times 10^4$ дин/см², а далі настає пластично-в'язке руйнування матеріалу, яке переходить у пластичні деформації при постійних напруженнях. Такі деформаційні особливості матеріалу відображаються в особливостях будови промодельованих з його використанням ЗГЗ, результати таких експериментів наведено нижче.

Процес розвитку ЗГЗ в моделі з товщиною шару 18 мм і швидкістю навантаження 5 мм/хв. має такі особливості (рис. 7). На початковому етапі виникає діагональна система закритих тріщин сколу. Потім, з кроком порядку 20 мм тріщини сколу в цій смугі привідкриваються і стають зіяючими, з'являється ешелонувана система тріщин розтягу R (рис. 7, а).

На наступній стадії над майбутнім магістральним розривом формуються поздовжні тріщини L. Вони розсікають ділянки між тріщинами R і утворюють наскрізний розрив. Результуюча ЗГЗ являє собою прямолинійну структуру, ускладнену відкритими і закритими тріщинами R (рис. 7, б).

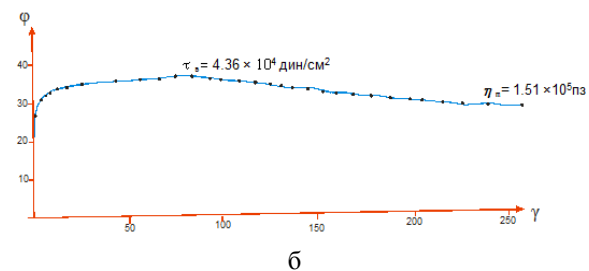
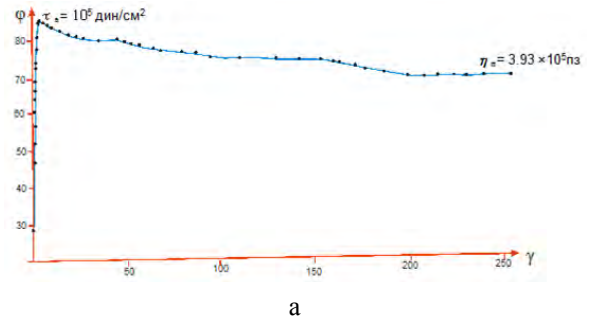


Рис. 6. Реологічні криві для паст на основі кварцового піску (концентрація 84,6 %) та технічного гліцерину:
а – фракція піску з розмірами зерен 0,05–0,63 мм; б – з розмірами зерен $\leq 0,05$ мм

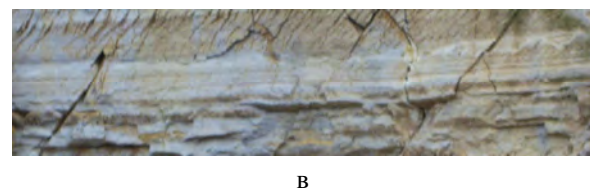
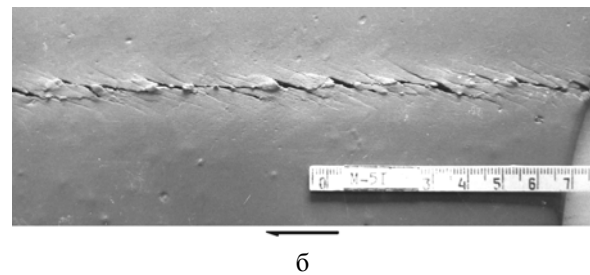
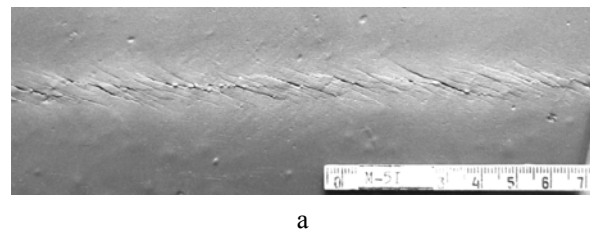


Рис. 7. Двостадійний розвиток ЗГЗ в моделі з кварцового піску та гліцерину (а, б) та природна тріщинувата зона такого типу (в) (пояснення в тексті)

У моделі на рис. 8 (товщина шару 20 мм, швидкість навантаження 5 мм/хв.) процес утворення відкритих тріщин R на початковій стадії (рис. 8, а) аналогічний такому у попередній моделі. На наступному етапі (рис. 8, б) з'являються поздовжні тріщини L, які простягаються під гострим кутом до осі зсуву в основі моделі. Під час зростання вони видовжуються і розкриваються, а на їх закінченні формуються складчасті форми типу косих антиклінальних згинів, флексур та ін. (рис. 8, в). Найявніші складчасті форм, інший характер розвитку тріщин L – особливості відмінності ЗГЗ цієї моделі від попередньої.

Водночас, ці зони мають і спільні закономірності розвитку та будови, які, за аналогією, можуть мати місце і в природних ЗГЗ, представлених породами з високою міцністю (вивержених, еффузивних, окварцованих комплексах гірських порід та ін.). Приклад такої зони наведено на рис. 7, в – це шар вулканічних порід (андезитів) в кар'єрі гори Ардово, на північній околиці м. Берегове (зона Березівського горбогір'я).

Помітно інакше розвивається зсувний процес у моделі з піску та вазелінової олії (рис. 9). Бачимо, що тріщини відриву формуються тут під помітно більшим кутом до осі зсуву, що зумовлено більшою жорсткістю силового каркасу пасти. Також простежується певний поворот осі структурних блоків у зоні формування зсуву (рис 9, г), пов'язаний з їх напружено-деформованим станом. Реологічні криві для цього матеріалу наведено на рис. 10.

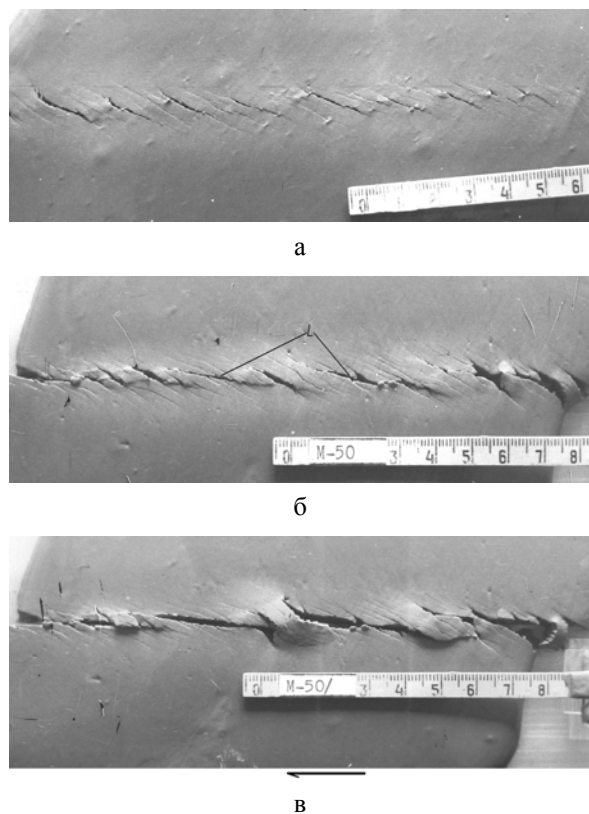


Рис. 8. Тристадійний розвиток ЗГЗ в моделі з кварцового піску та гліцерину (пояснення в тексті)

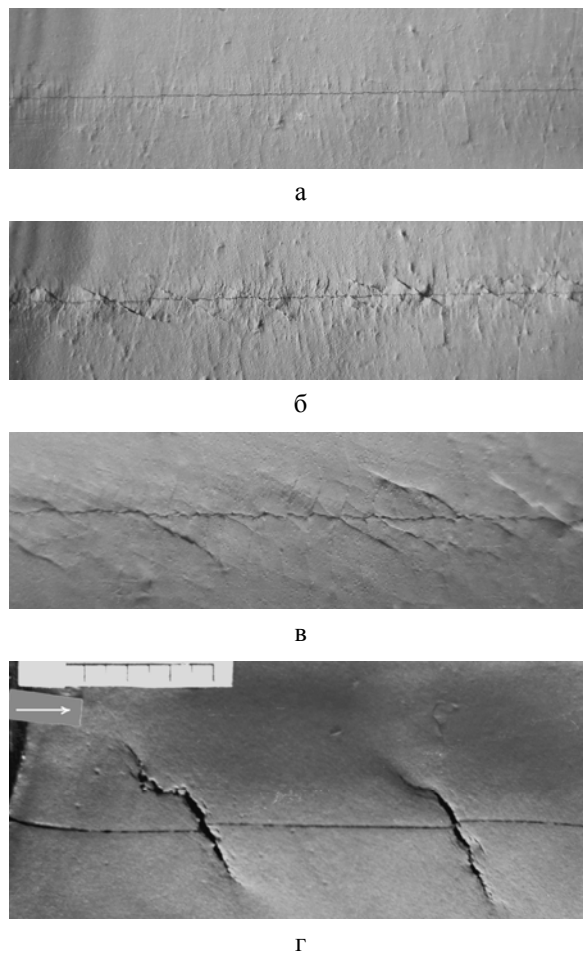


Рис. 9. Розвиток ЗГЗ у моделях з кварцового піску та вазелінової олії (фракція піску з розмірами зерен 0,05–0,63 мм, концентрація 80,8 %)

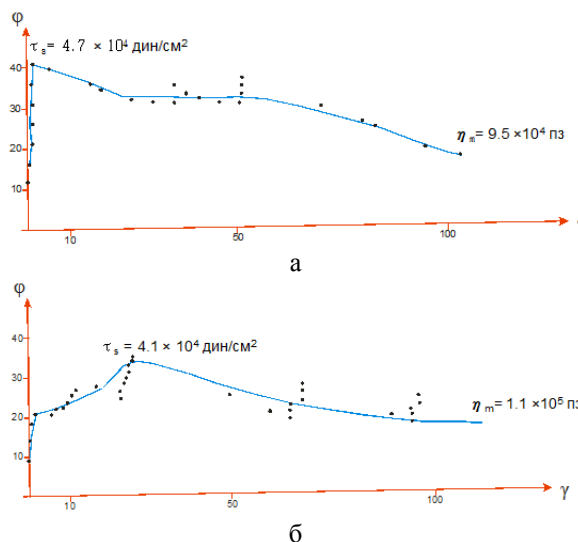


Рис. 10. Реологічні криві для паст на основі піску та вазелінової олії: а – фракція піску з розмірами зерен 0,05–0,63 мм (концентрація 82,14 %); б – з розмірами зерен $\leq 0,05$ мм (концентрація 79,38 %)

Якісно інший тип ЗГЗ відтворено на матеріалі карборунд – вазелінова олія. Реологічна крива цього матеріалу (рис. 11) показує, що границя текучості (міцність) досягається зразу після пружної та зворотної пластичної деформації, після цього відбувається різкий спад напружень, (руйнування структурного каркасу) і встановлюється пластична деформація матеріалу. Така деформаційна поведінка свідчить про те, що цей матеріал до руйнування поводить як тверде тіло, а після руйнування – майже як в'язка рідина.

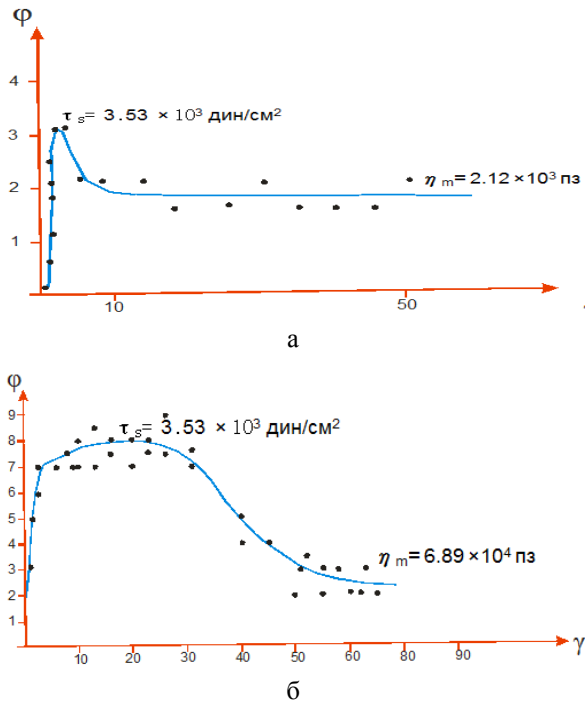


Рис. 11. Реологічні криві для паст на основі карборунду: а – для карборунду та вазелінової олії у моделі на рис. 12 в; б – для карборунду (68 %), аеросилу (1,4 %) та вазелінової олії (30,6 %) у моделі на рис. 13

Це відбувається завдяки специфічній особливості такого модельного матеріалу – його здатності формувати адсорбційні шари, які спричиняють пластичну деформацію, подібно до того, як у деяких гірських породах такі деформації (квазіпластичні на макроструктурному відносно тонкої структури породи рівні) відбуваються по численних субпаралельних поверхнях сколів.

Утворення ЗГЗ в описаному матеріалі з товщиною шару 20 мм і швидкістю навантаження 5 мм/хв. розвивалось у такій послідовності (див. рис. 12). Першими з'явилися ледь помітні паралельні одна до іншої діагональні тріщини сколу. Смуга їх розвитку трасує простягання зсувного шва в основі моделі. Слідом за цим у межах цієї смуги відбулося тонке розшарування матеріалу (утворення квазішаруватості) у вертикальній площині, яке зумовило високу текучість при низьких напруженнях. Тертя на контакті непорушеного

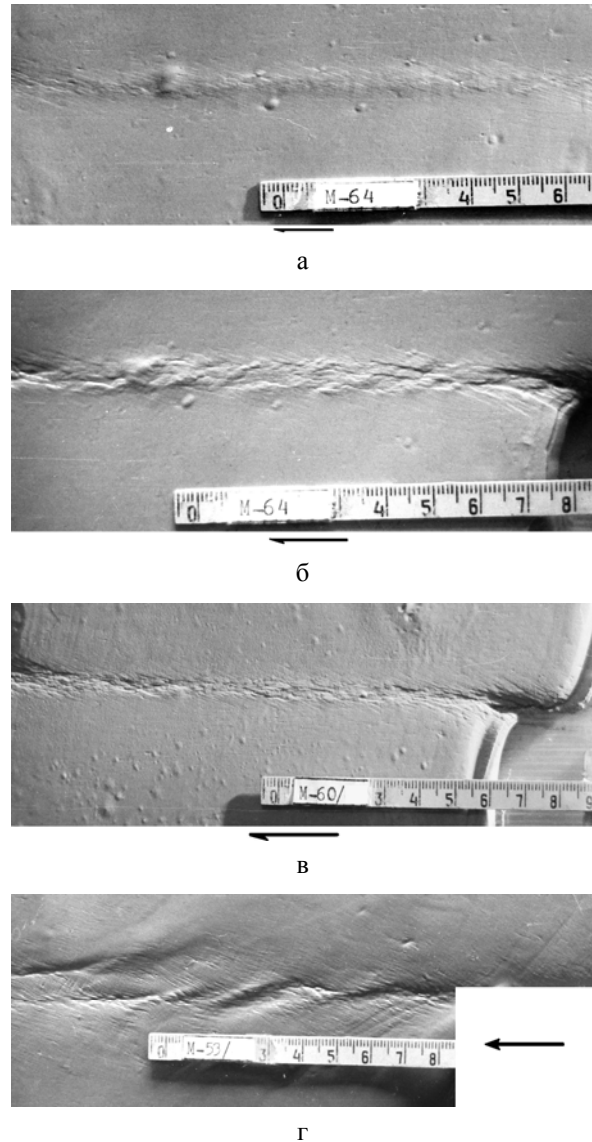


Рис. 12. Розвиток ЗГЗ в моделі з карборунду та вазелінової олії (пояснення в тексті)

матеріалу з більшою міцністю і розуцільненого розшаруванням в умовах зсуву спричинило утворення подібних антиклінальних складок з вертикальними шарнірами (аксоносинкліналі за А. Лук'яновим [Лукьянов, 1963]) та звивистої складчастості ЗГЗ загалом (рис. 12, б). Невелике (на 3–5 %) збільшення вмісту вазелінової олії підвищує текучість матеріалу і зменшує ширину ЗГЗ (рис. 12, в).

Збільшення процентного вмісту карборунду (до 73,21 %) приводить до крихіткого типу руйнування і збільшення ширини ЗГЗ (рис. 13, а, б).

Подальші структурні перетворення ЗГЗ пов'язані з активізацією у межах зони сколових тріщин початкового етапу (поза її межами вони залишаються пасивними). Активні діагональні тріщини розділяють зону пластичних деформацій на ділянки розтягу та стиску, які в процесі розвитку утворюють виражені в рельєфі горсти і грабени (див. рис. 5, б та г) а також цікаві за морфологією складчасті форми

(рис. 12, в). Природні аналоги цього типу зон змятості можна зустріти у хомогенних товщах евапоритової формації, слабкоконтрастних океанічних осадах, здатних розширюватись в умовах зсуву.

Додавання до складу пасти карборунд – вазелінова олія 1,4 % аеросилу ще сильніше змінює її механічні властивості (рис. 11, б). Аеросил зв'язує олію і цим позбавляє її здатності формувати вільні адсорбційні шари, які зумовлюють високу текучість пасти при низькому напруженні. Матеріал пасти не утворює жорсткого каркасу твердого тіла, а границя пластичності досягається в процесі поступового ущільнення. Після досягнення напружень $\tau_s = 9,62 \times 10^3$ дин/см² матеріал деформується з поступовим руйнуванням структури (при високій в'язкості), а потім його структура різко руйнується, напруження спадають, настає пластично-в'язке деформування максимально зруйнованої структури з мінімальною в'язкістю. Отже, деформаційна поведінка цього матеріалу на значному етапі деформування нагадує глинисту пасту, але відрізняється різкішим руйнуванням структурного каркасу в кінці навантаження.

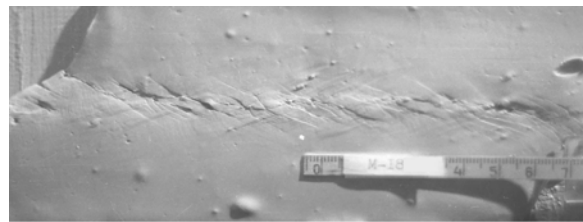
Утворення ЗГЗ у цьому матеріалі (рис. 13, товщина шару 17 мм, швидкість навантаження 5 мм/хв) починається, як і у глині, з появи системи перпендикулярних до осі зсуву сколових тріщин R', які під час зсування по шву нахилиються і приймають вигляд ешелонуваної системи (рис. 13, в).

Слідом за цим формується система великих (крок 56 мм) діагональних ешелонуваних тріщин розтягу R. У процесі подальшого зміщення одного з крил (правосторонній зсув) спостерігається складна картина структурних перетворень – унаслідок упору активного борта зсуву в нерухомий відбувається відрив і поворот блоків, утворення структур з віялоподібним розташуванням радіальних і дугоподібних концентричних розривів (рис. 13, г). Помічено, що радіальні тріщини – це оновлені тріщини R' початкового етапу. У центральній частині ЗГЗ спостерігались розвороти, хаотичне скупчування дрібних блоків, їх підняття і опускання.

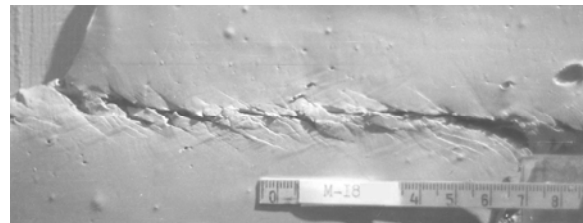
Аналіз результатів моделювання

За результатами проведеного фізичного моделювання бачимо, що речовинний склад модельних матеріалів та їх реологічні властивості, які впливають на особливості будови та структурну організацію ЗГЗ загалом, є визначальними для їх формування. Важливе значення у цьому процесі належить різним системам тріщин. Послідовність їх виникнення в часі дає змогу виділити низку закономірних стадій розвитку процесу.

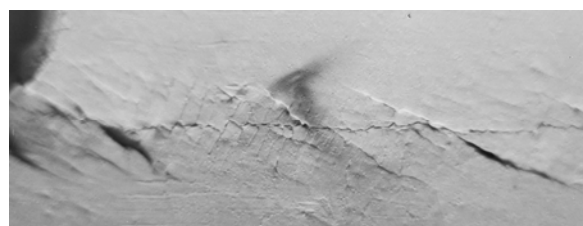
Початкова стадія відзначається появою системи сколових тріщин R'. Їх значення у структурних перетвореннях невелике (хоча вони й можуть проявлятися у локальних структурах на пізніших етапах), однак, як структурних маркерів, що вказують на локалізацію зсувного шва на глибині, дуже значне.



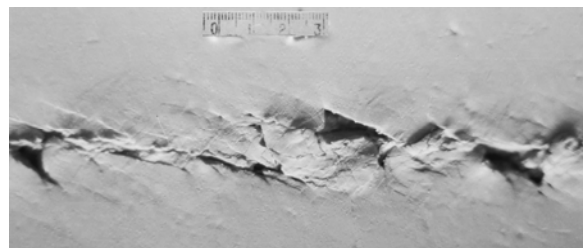
а



б



в



г

Рис. 13. Розвиток ЗГЗ в моделях з карборунду, аеросилу та вазелінової олії (пояснення в тексті)

Друга – основна стадія формування ЗГЗ характеризується утворенням системи синтетичних тріщин R. В одних випадках тріщини R, об'єднуючись, самі формують магістральний розрив, у інших – визначають способи такого об'єднання. Багато залежить від геометричних параметрів самих тріщин (їх довжини, кроку між сусідніми тріщинами, кута між тріщиною і віссю зсуву). Тріщини R розділяють однорідне поле напружень на ділянки напружень розтягу та стиску, зумовлюючи виникнення інших структур – горстів, грабенів, флексур тощо.

Третя стадія розвитку ЗГЗ відзначається формуванням поздовжніх тріщин L. Вони формуються у площині зсувного шва в жорсткій основі і утворюють наскрізний розрив ЗГЗ. При цьому на їх закінченнях формуються складчасті структури.

Приклади сформованих у результаті експериментів зон зсуву з оптично відконтрастованою структурою розривів та тріщинуватості наведено на рис. 14.

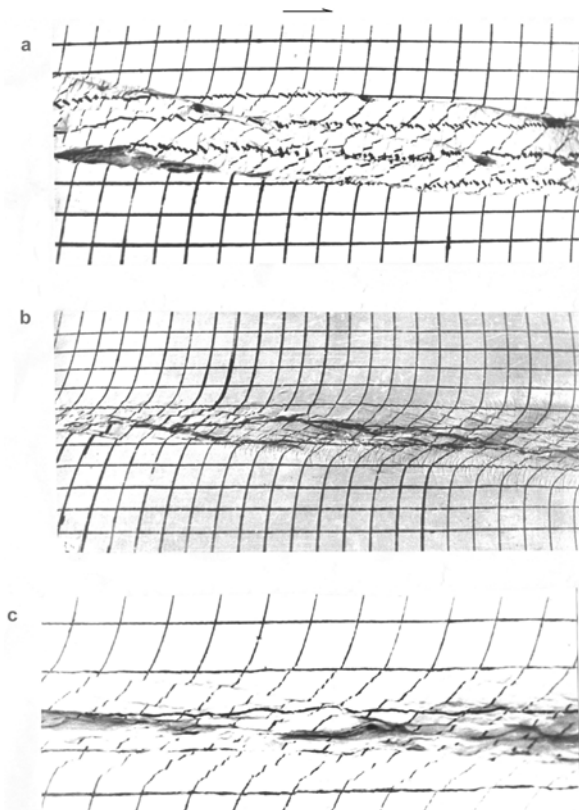


Рис. 14. Різні типи структур ЗГЗ, сформованих у результаті фізичного моделювання

У зв'язку з очевидною значимістю різних систем тріщин у формуванні ЗГЗ доцільно в подальшому поставити спеціальні експериментальні дослідження для в'яснення, зокрема, питання про те, якими реологічними параметрами середовища регулюється крок тріщин. Відповідь на це питання була б значним внеском і у вирішення глобальної проблеми геології про ієрархічну подільність (кускуватість) земної кори.

Використані для створення фізичних моделей пластичні пасти, що мають властивості коагуляційних структур, дали змогу відтворити ЗГЗ з процесами від крихкого руйнування до пластичних деформацій. Експерименти, що супроводжувались записом повних реологічних кривих, дали змогу простежити деформаційну поведінку коагуляційних структур, визначити їх основні реологічні параметри і оцінити деформаційний відгук (крихкий, пластичний) в моделі. При цьому вплив цих параметрів розглядався у їх взаємозв'язку, як здатність формувати коагуляційну структуру у руйнуватися.

Границі пластичності матеріалів паст кварцовий пісок + вазелінова олія і карборунд + вазелінова олія (рис. 10 і 11) з'являються на реологічних кривих зразу після пружної та незначної пластичної деформації і характеризують міцність структурного каркасу цих паст. Руйнування в пасті першого складу відбувається при поступовому спаданні напружень, не досягаючи постійного значення, значить, і пластичної текучості. Сфор-

мовані у цьому матеріалі ЗГЗ являють собою винятково системи тріщин (див., наприклад, розривну зону на рис. 9). Руйнування коагуляційної структури пасти карборунд + вазелінова олія відбувається при різкому спаді напружень з подальшою стабілізацією, зумовлюючи пластичну текучість. У такому матеріалі утворюються зони інтенсивної звивистої складчатості (див. рис. 12).

Границі пластичності глинистої пасти і пасти карборунд + вазелінова олія + аеросил близькі за величиною, обидві сформовано на реологічних кривих у процесі пластично-в'язкого зміцнення структурного каркасу, але характер руйнування цих структур істотно (хоча системи поперечних і поздовжніх тріщин з'явилися в обох випадках), а значення в'язкості різко відрізняються. Порівняння деформаційних структур модельних ЗГЗ показує – в глинистій пасті жорсткі блоки, обмежені великими тріщинами R, зазнають пластичних деформацій і витискання з утворенням горстових структур (рис. 5, б). Висока в'язкість глинистої пасти не допускає розвитку дрібноблоковості, а якщо дрібні тріщини і з'являються, вони заліковуються в процесі деформування. У ЗГЗ на матеріалі карборунд + вазелінова олія + аеросил ступінь блокової роздробленості вищий. Низька в'язкість матеріалу у цьому випадку зумовлює як вищий ступінь роздробленості, так і забезпечує легкість розворотів, обертання блоків з утворення характерних структур (рис. 13).

Природні зони зсуву

Природні зони зсуву давно досліджують геологи і геофізики у зв'язку з задачами тектоніки і геодинаміки, сейсмічності, проведенням гірничих робіт та їх безпекою, розв'язанням інженерно-геологічних задач, будівництвом важливих та екологічно небезпечних об'єктів тощо ([Гзовский, 1953, 1963; Копп, 1979, 1981; Лукьянов, 1963; Арефьев и др., 1985; Исай, 1989] та ін.). Такого роду дослідження, пов'язані з вивченням глибинної будови кори, геології осадових товщ та фундаменту, пошуком та дослідженням родовищ різних корисних копалин, проведено і в Карпатському регіоні України [Геодинамика..., 1985; Крупський, 2001; Бойко та ін., 2003; Гинтов, 2005; Гордиенко и др., 2011], зокрема, у Закарпатті [Чекунов и др., 1969; Хоменко, 1978; Бокун, 1981; Ковалишин, Братусь, 1984; Матковський, 1992; Григорчук, 1992; Скаун та ін., 1992; Колодій та ін., 1994; Гончарук та ін., 1994; Петрашкевич, Лозыняк, 1988].

Такі дослідження, пов'язані з вивченням особливостей місцевої тектоніки, геодинаміки та сейсмотектонічного процесу, провели у Закарпатті і автори, зокрема, у зоні Берегівського горбогір'я ([Назаревич, Назаревич, 2000, 2001, 2005, 2006, 2007, 2011, 2012; Дослідження..., 2005; Лозыняк та ін., 2011] та ін.).

Один з прикладів природних зон зсуву описано вище (див. рис. 7, в). Як інший приклад, наведемо зсувну зону у тілі масиву гірських порід (андези-

тів та ріолітових туфів) гори Ардово на північній околиці м. Берегове, де розташована режимна геофізична станція (РГС) “Берегове”. Унікальність цієї зони полягає в тому, що через неї проходить штольня РГС (тобто, вона розкрита гірською виробкою (див. рис. 12, б), хоча на поверхні перекрита шаром четвертинних глин товщиною порядку 30–40 см), а її геодинаміку контролюємо кварцовим деформографом (рис. 12, а) [Вербиць-

кий, Назаревич, 2005; Назаревич, 2011; Назаревич и др., 2011; Nazarevych et al., 2010] та нахиломіром (статичним маятником) (рис. 12, б), встановленим спільно з чеськими спеціалістами під керівництвом д-ра Павла Календи [Назаревич и др., 2011], який дає змогу контролювати взаємні зміщення бортів зони. Структуру та вигляд зони у штольні показано на рис. 12, б, дані деформографа і маятника (фрагменти) – на рис. 12, в та г відповідно.



Рис. 12. Кварцовий деформограф (а), нахиломір (статичний маятник) та контрольована зсувна зона (б) у тілі масиву гірських порід (андезитів) штольні РГС “Берегове” і зміщення бортів цієї зони за даними деформографа (в) та нахиломіра (г) під час сейсмічних подій

Бачимо, що зона є субвертикальною (кут падіння близько 75°) і являє собою цілу смугу тріщин шириною порядку 30–50 см, по яких відбуваються зміщення її бортів в основному паралельно до простягання. Зміщення бортів навхрест простягання зони (рис. 12, в) є у кілька разів меншими. Зазначимо, що геодинаміка цієї, на перший погляд локальної зони, тісно пов’язана з геодинамікою цілого породного масиву, а через неї – з геодинамікою літосфери цілого Закарпаття (про що свідчать зареєстровані тут провісники місцевих землетрусів), а також з напружено-деформованим станом тектоносфери цілої Землі. Про це свідчать зареєстровані нами за останні роки пре-, ко- і постсейсмічні деформації від низки найсильніших (з $M \geq 7$) світових землетрусів (Японія, Канада, Гватемала, Сахалін, Курілі та ін.) а також від менш сильних, але ближчих сейсмічних подій (див. запис відносних зміщень бортів цієї розломної зони під час турецького землетрусу 23.10.2011 р. на рис. 12, в). Як і на інших станціях Європейської нахиломірної мережі, у нас також фіксуються постсейсмічні в’язко-пружні деформаційні хвилі, пов’язані з процесами розрядки у вогнищевих зонах таких сейсмічних подій. Але всі ці питання вимагають окремого детального розгляду.

Висновки

За результатами проведеного фізичного моделювання зон горизонтального зсуву (ЗГЗ) по суб-

вертикальних розломах і тріщинах бачимо, що речовинний склад модельних матеріалів та їх реологічні властивості визначально впливають на особливості будови та структурну організацію ЗГЗ загалом.

Важливе значення у процесі розвитку модельних (як і природних) ЗГЗ належить різним системам тріщин. Послідовність виникнення у часі таких систем дає змогу виділити закономірні, описані вище стадії розвитку процесу.

З наведених прикладів фізичного моделювання видно, що вплив реологічних параметрів на характер деформацій (крихкий, пластичний) залежить від здатності модельного матеріалу формувати коагуляційну структуру, зміцнюватися і розуцільнюватися, втрачати і відновлювати структурні зв’язки під час деформування. Отже, реологічний аналіз коагуляційних структур дає змогу не тільки правильно інтерпретувати дані експериментів, але і регулювати модельований деформаційний процес, передбачити його результат.

Література

Арефьев С.С., Грайзер В.М., Заргарян Д.Н., Пленев К.Г., Рузайкин А.И., Шебалин Н.В., Шилова Е.Н. Разрыв в очаге и афтершоки Кум-Дагского землетрясения 14 марта 1983 года // Макросейсмические и инструментальные исследования сильных землетрясений (Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 26). – М.: Наука – 1985. – С. 8–27.

- Бойко Г.Ю., Лозиняк П.Ю., Заяць Х.Б., Анікеєв С.Г., Петрашкевич М.Й., Колодій В.В., Гайванович О.П. Глибинна геологічна будова Карпатського регіону // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2003. – № 2. – С. 52–61.
- Бокун А.Н. Зоны скалывания в однослойных моделях из влажной глины // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. – Л.: МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 83–85.
- Бокун А.Н. Соляные структуры Солотвинской впадины – К.: Наук. думка, 1981. – 135 с.
- Бокун А.Н. Структурообразование в слабokonсолидированных осадках северо-восточной котловины Тихого океана (по данным моделирования) // Механизмы структурообразования в литосфере и сейсмичность. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума “Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии”. – М.: ИФЗ, 1991. – С. 116–118.
- Бондаренко П.М. Моделирование полей напряжений и прогноз дислокаций в сдвиговых зонах // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. – Л.: МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 71–74.
- Борняков С.А. Динамические критерии самоорганизации системы разрывов в сдвиговой среде (по результатам физического моделирования) // Доклады РАН. – 2008. – Т. 420, № 6. – С. 822–824.
- Васильев Е.П. Модель присдвигового куполообразования // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых (Тезисы докладов Первого Всесоюзного совещания). Вып. 1. – Л.: ЛГИ, 1988. – С. 64–66.
- Вербицкий Т.З., Назаревич А.В. Деформографічні і геоакустичні дослідження у Закарпатті // Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. / Під ред. В.І. Старостенка. – К.: Наук. думка. – 2005. – С. 113–131.
- Геодинамика Карпат / Круглов С.С., Смирнов С.Е., Спитковская С.М., Фильштинский Л.Е., Хижняков А.В. – К.: Наук. думка, 1985. – 136 с.
- Гзовский М.В. Волнистость простирания крупных тектонических разрывов // Изв. АН СССР. – 1953. – № 2. – С. 101–114.
- Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. – М.: Изд. АН СССР. – 1963. – Ч. 3, 4. – 544 с.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – К.: Феникс, 2005. – 572 с.
- Гинтов О.Б., Исая В.М., Исая Л.В. Дилатансионное разуплотнение в сдвиговых зонах Украинского щита // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых (Тезисы докладов Первого Всесоюзного совещания). Вып. 1. – Л.: ЛГИ, 1988. – С. 88–91.
- Гончарук А.Ф., Степанов В.А., Веремеєнко Л.І., Кулібаба В.М., Шемякіна Т.І., Рудоконцентруючі структури й етапи вулкано-тектонічного розвитку Берегово-Беганської золотоносної зони Закарпаття // Вісн. ЛНУ імені Івана Франка: Сер. геол. – 1994. – Вип. 12. – С. 168–177.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.М., Усенко О.В. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). – К.: Логос, 2011. – 129 с.
- Григорчук Г.Ю. Геолого-структурна позиція золотого і поліметалевого зруденіння – критерій глибинного прогнозу руд // Вісн. ЛНУ імені Івана Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 153–159.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / Під ред. В.І. Старостенка. – К.: Наук. думка. – 2005. – 256 с.
- Исая В.М. Реологические свойства консолидированной коры и некоторые закономерности разломообразования (на примере Украинского щита) // Геофиз. журн. – 1989. – 11, № 3. – С. 40–52.
- Ковалишин З.И., Братусь М.Д. Флюидный режим гидротермальных процессов Закарпатья. – К.: Наук. думка, 1984. – 86 с.
- Колодій О.М., Матковський О.І., Зайцева В.М., Гожик М.Ф., Драчук В.П., Ліськевич Я.Б., Поморцева Т.П. Структура Берегівського рудного поля і прогноз нових рудовмісних зон за геоіндикацією аерокосмознімків і комплексом наявних геологічних даних // Вісн. ЛНУ імені Івана Франка. Сер. геолог. – 1994. – Вип. 12. – С. 177–185.
- Копп М.Л. Горизонтальное выдавливание при сжатии орогенических поясов // Бюл. МОИП. Отд. геол. – 1981. – Т. 52, № 2. – С. 14–28.
- Копп М.Л. О происхождении поперечных складчатых зон эпигеосинклинальных орогенических поясов (на примере восточной части Альпийского пояса Евразии) // Геотектоника. – 1979. – № 2. – С. 94–107.
- Крупський Ю.З. Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України. – К.: УкрДГРІ. – 2001. – 144 с.
- Литосфера Центральной и Восточной Европы // Под ред. А.В.Чекунова. – К.: Наук. думка, 1987–1993.
- Лозиняк П.Ю., Назаревич А.В., Назаревич Л.С. Неогенова та сучасна геодинаміка і сейсмічність літосфери Закарпаття // Геодинаміка. – 2011. – 2 (11). – С. 170–172.
- Лукьянов А.В. Горизонтальные движения по разломам, происходящие при современных катастрофических землетрясениях // Тр. ГИН АН СССР. – М.: Изд. АН СССР. – 1963. – Вып. 80. – С. 34–112.
- Матковський О.І. Родовища та рудопрояви золота Українських Карпат // Вісник ЛНУ імені Івана Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 96–120.

- Мерлич Б.В., Спитковская С.М. Глубинные разломы, неогеновый магматизм и оруденение Закарпаття // Проблемы тектоники и магматизма глубинных разломов. – Львов. – 1974. – С. 173–180.
- Михайлова А.В. Методика количественной оценки перемещений и напряжений в пластических непрозрачных моделях // Тектонофизика и механические свойства горных пород. – М.: Наука. – 1971. – С. 38–48.
- Назаревич А.В. Деформографічний метод у дослідженнях сейсмотектонічних процесів у вогнищевих зонах землетрусів Закарпаття // Геодинаміка. – 2011. – 1 (10). – С. 134–146.
- Назаревич А.В., Календа П., Мыщык Б.Г. Аппаратурное обеспечение и некоторые результаты деформографических и наклономерных наблюдений на РГС “Берегово” в Украинском Закарпатье // Геодинаміка. – 2011. – 2 (11). – С. 213–215.
- Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Геодинаміка і особливості сейсмотектонічного процесу Берегівської горстової зони (Закарпаття) // Геодинаміка. – 2000. – №1 (3). – С. 131–147.
- Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Геодинаміка і трицинуватість породи масивів (на прикладі Берегівського горбогір'я в Закарпатті) // Науковий вісник НГАУ. – 2001. – № 4. – С. 23–24.
- Назаревич Л.Є., Назаревич А.В. Особливості вогнища Берегівського землетрусу 1965 року за комплексом даних (геоінформаційні аспекти) // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2005. – Т.2. – С. 74–79.
- Назаревич Л.Є., Назаревич А.В. Особливості підготовки та характеристики вогнища Берегівського землетрусу 1965 року (за макросейсмічними даними) // Геодинаміка. – 2006. – 1 (5). – С. 61–74.
- Назаревич Л.Є., Назаревич А.В. Про сейсмічність і деякі особливості сейсмотектоники Українських Карпат // Геодинаміка. – 2012. – № 1 (12). – С. 145–151.
- Назаревич Л.Є., Назаревич А.В. Характерні риси сейсмотектонічного процесу в літосфері Буковини та прилеглих територій // Геодинаміка. – 2007. – 1 (6). – С. 49–54.
- Павленкова Н.И. Структура и динамика земной коры и верхней мантии континентов // Проблемы движений и структуры образования коры и верхней мантии. – М.: Наука. – 1985. – С. 58–72.
- Петрашкевич М.И., Лозыняк П.Ю. Структурное районирование основания Закарпатского прогиба // Региональная геология УССР и направления поисков нефти и газа. – Львов. – 1988. – С. 72–79.
- Семинский К.Ж. Моделирование крупных сдвиговых зон и специфика развития их крыльев // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. – Л.: МТК АН СССР. – 1988. – Вып. 1. – С. 74–77.
- Скакун Л.З., Матковський О.І., Гожик М.Ф., Ремещило Б.Г., Шклянка В.М. Золоте зруденіння Берегівського рудного поля (геолого-структурна позиція і мінералогічна типізація) // Вісник ЛНУ імені Івана Франка. Сер. геол. – 1992. – Вип. 11. – С. 128–145.
- Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
- Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы / В.Б. Соллогуб, А. Гутерх, Д. Просен и др. – К.: Наук, думка, 1978. – 272 с.
- Тектоническая карта Украинских Карпат / Под ред. В.В. Глушко и С.С. Круглова. – К., 1986.
- Хоменко В.І. Глибинна будова Закарпатського прогину. – К.: Наук, думка. 1978. – 230 с.
- Чекунов А.В., Ливанова Л.П., Гейко В.С. Глубинное строение и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба. – Сов. геология. 1969, № 10.
- Юрель Г.Н. Тектоническая трактовка результатов экспериментальной геомеханики // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых (Тезисы докладов Первого Всесоюзного совещания). Вып. 1. – Л.:ЛГИ. – 1988. – С. 68–71.
- Clayton L. Tectonic depression along the Hope fault, a transcurrent fault in North Canterbury, New Zealand // New Zealand Jour. Geol. and Geophys. – 1966. – Vol. 9, № 1-2. – P. 95-104.
- Graham R.H. Wrench faults, arcuate fold and deformation in the southern French Alps // Proc. Geol. Assoc. – 1978. – № 89. – P. 125–142.
- Harding T.P. Petroleum Traps associated with wrench faults // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. – 1974. – № 58. – P. 1290–1304.
- Nazarevych A., Nazarevych L., Nasonkin V., Boborykina O. Extensometric researches in Ukraine: methods, instruments, results // Геофіз. журн. – 2010. – 32, № 4. – С. 121–123.
- Odonne F. and Vialon P. Analogue models of folds above a wrench fault // Tectonophysics. – 1983. – № 99. – P. 31–46.
- Richard P. and Cobbold P.R. Structures en fleur positives et décrochements crustaux: modelisation analogique et interpretation mecanique // C. R. Acad. Sci. Paris. – 1989. – № 308, II. – P. 553–560.
- Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Zentral bl. Fur Mineralogie. Abt. Geol. Und Palaont. – Berlin. – 1929. – P. 354–368.
- Skempton A. Some observations on tectonic shear zones // Proc. Inst. Congr. Intern. Soc. Rock. Mech. – 1966. – Vol. 1. – P. 329–335.
- Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull. – 1988. – № 100. – P. 1666–1703.
- Tchalenko J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes // Geol. Soc. Am. Bull. – 1970. – № 81. – P. 1625–1640.
- Wilcox R.E., Harding T.P. and Seely D.R. Basik Wrench tectonics // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. – 1973. – № 57. – P. 74–96.
- Wilson G. Wrench movements in the Aristarchus region of the Moon // Proc. Geol. Assoc. – 1970. – № 81. – P. 595–608.

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ЗОН ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СДВИГА
(по результатам физического моделирования и полевых исследований)**

А.Н. Бокун, А.В. Назаревич

В работе представлены результаты исследований (в первую очередь, путем физического моделирования) распространенных тектонических процессов – образования и развития зон горизонтального сдвига (ЗГС). Как пластично-вязкие модельные материалы использованы специальные пасты с регулируемыми реологическими характеристиками, что дало возможность воспроизвести процессы хрупкого разрушения и пластических деформаций горных пород, а также процессы переходных типов. Воспроизведены характерные пространственно-временные закономерности моделированных процессов, выделены системы трещин, характеризующие их последовательные стадии, определена роль каждой системы в структурообразовании. Приведены примеры зон такого типа в геологических структурах Береговского холмогорья в Закарпатье и некоторые результаты геофизического мониторинга их современного геодинамического режима.

Ключевые слова: физическое моделирование тектонических процессов; зоны горизонтального сдвига (ЗГС); реологические характеристики; хрупкое разрушение; пластические деформации; системы трещин; структурообразование.

**STRUCTURE AND DYNAMICS OF HORIZONTAL SHEAR ZONES
(by results of physical modelling and field studies)**

A.N. Bokun, A.V. Nazarevych

In the paper results of studies (first of all by means of physical modelling) of prevalent tectonic processes of formation and evolution of the horizontal shear zones (HShZ) are presented. As the plastic-viscous modeling materials the special pasta with regulated rheological characteristics was used what making it possible to reproduce the processes of brittle fracture and plastic deformation of rocks and the processes of transition types. The typical spatial and temporal regularities of simulated processes were reproduced. The break systems were separated which characterize the serial phases of the processes and the role of each system in the structure formation was defined. Examples of such zones in geological structures of Beregovo hill area in Transcarpathians and some results of geophysical monitoring of its modern geodynamic regime are given.

Key words: physical modelling of tectonic processes; horizontal shear zones (HShZ); rheological characteristics; brittle fracture; plastic deformation; break systems; structure formation.

¹*Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, м. Львів*

²*Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Львів*