

ДВНЗ «Донецький Національний Технічний Університет»

(повне найменування інституту, назва факультету)

Факультет «Гірничий»

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра «Управління гірничим виробництвом»

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____/Ляшок Я.О/
(підпис) (ініціали, прізвище)
« » _____ 2020 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: *Геомеханічне обґрунтування стійкості очисних виробок в процесі експлуатації, з метою охорони здоров'я працівників вибою*

Виконав: студент 2 курсу, групи ОПГм-19і
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 184 «Гірництво», спеціалізація

«Охорона праці»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Скакун Дмитро Вікторович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., доц. Сергієнко О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає записок з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2020 р.

ДВНЗ «Донецький Національний Технічний Університет»
 Факультет Гірничий
 Кафедра Управління гірничим виробництвом
 Освітньо-кваліфікаційний рівень (освітній ступінь) Магістр
 Напрямок підготовки (спеціальність) 184 Гірництво
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Завідувач кафедри

_____/Ляшок Я.О/
 (підпис) (ініціали, прізвище)
 “ ____ ” ____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРУ

Скакун Дмитро Вікторович
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Геомеханічне обґрунтування стійкості очисних виробок в процесі експлуатації, з метою охорони здоров'я працівників вибою

керівник проекту (роботи) Сергієнко Олександр Іванович, к.т.н, доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від № ____ “ ____ ” ____ 2020 року

2. Строк подання студентом проекту (роботи) “ ____ ” ____ 2020 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) матеріали переддипломної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів підвищення стійкості очисних виробок 2. Лабораторні дослідження механічних властивостей гірських порід 3. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо очисних виробок 4. Геомеханічне обґрунтування критерію стійкості очисних виробок. 5. Рекомендації щодо стійкості очисних виробок в процесі їх експлуатації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) рисунки, графіки, фото процесів дослідження

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання “ ____ ” ____ 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	<i>Аналіз методів підвищення стійкості очисних виробок</i>	<i>22.09.20</i>	<i>Виконано</i>
2.	<i>Лабораторні дослідження механічних властивостей гірських порід</i>	<i>05.10.20</i>	<i>Виконано</i>
3.	<i>Чисельні дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо очисних виробок</i>	<i>15.10.20</i>	<i>Виконано</i>
4.	<i>Геомеханічне обґрунтування критерію стійкості очисних виробок</i>	<i>05.11.20</i>	<i>Виконано</i>
5.	<i>Рекомендації щодо стійкості очисних виробок в процесі їх експлуатації.</i>	<i>25.11.20</i>	<i>Виконано</i>
6.	<i>Оформлення роботи і підготовка до захисту</i>	<i>02.12.20</i>	<i>Виконано</i>
7.			
8.			
9.			
10.			

Студент _____ Скакун Д.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Сергієнко О.І.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Скакун Д.В. Геомеханічне обґрунтування стійкості очисних виробок в процесі експлуатації, з метою охорони здоров'я працівників вибою / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 184 «Гірництво» (спеціалізація «Охорона праці в гірництві»). – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2020.

Метою роботи є геомеханічне обґрунтування стійкості очисних виробок в процесі експлуатації.

Ідея роботи полягає в використанні у якості критерію утворення зон вивалу порід ефективного коефіцієнту інтенсивності напруження.

Для вирішення поставлених задач використані наступні методи дослідження: шахтні спостереження за обваленням покрівлі, методи лабораторних досліджень руйнування гірських порід; методи кінцевих елементів для чисельного моделювання напружено-деформованого стану порід покрівлі.

Вперше встановлений критерій вивалоутворення для плоского напруженого стану гірського масиву з урахуванням тріщиностійкості порід. Вперше встановлена залежність нормальних і дотичних напружень від кута нахилу площині зсуву. Вперше представлена методика по визначенню зон вивалоутворення з урахуванням критерію тріщиностійкості порід.

Ключові слова: пісковик, руйнування порід, вивалоутворення, критерій руйнування, напружено-деформований стан, тріщиностійкість, в'язкість руйнування.

SUMMARY

Skakun D. Geomechanical substantiation of the stability of sewage treatment plants during operation, in order to protect the health of workers of the face / Final qualification work for the degree of "Master" in specialty 184 "Mining" (specialization "Occupational Safety in Mining"). - SHEI DonNTU, Pokrovsk, 2020.

The purpose of the work is a geomechanical substantiation of the stability of treatment workings during operation.

The idea of the work is to use as a criterion for the formation of zones of rock fall an effective stress intensity factor.

The following research methods were used to solve the set tasks: mine observations of roof collapse, methods of laboratory research of rock destruction; finite element methods for numerical modeling of the stress-strain state of roof rocks.

For the first time the criterion of landslide formation for a flat stress state of a rock mass taking into account crack resistance of rocks was established. For the first time the dependence of normal and tangential stresses on the angle of inclination of the shear plane is established. For the first time the technique on definition of zones of falls of formation taking into account criterion of crack resistance of breeds is presented.

Keywords: sandstone, rock fracture, landslide formation, fracture criterion, stress-strain state, crack resistance, fracture toughness.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК.....	10
1.2. Аналіз заходів щодо запобігання обвалень покрівлі у очисному вибої.....	10
1.2. Досвід застосування хімічного анкетування у лавах з різною механізацією очисних робіт	14
1.3. Дослідження стійкості порід покрівлі у привибійному просторі.....	16
1.4. Технологічні схеми підготовки і нагнітання сумішей.....	20
1.5. Схеми зміцнення порід при переході очисними вибоями геологічних порушень.....	25
1.6. Стан робіт по анкеруванню порід, що закріплюються хімічними речовинами.....	27
2. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД	45
2.1. Методи лабораторного дослідження руйнуючих напружень при зсуві з стисненням	45
2.2. Лабораторні дослідження руйнуючих напружень при зсуві з стисненням	51
2.3. Визначення критерію руйнування порід з урахуванням їх тріщиностійкості	58
3. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАВКОЛО ОЧИСНИХ ВИРОБОК.....	59
3.1. Математична модель напружено-деформованого стану масиву що підробляється	59
3.2. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану масиву що підроблюється.....	62
4. ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК.....	70

4.1. Метод визначення положення головних площадок і головних нормальних напружень	70
4.2. Визначення положення головних площадок і головних нормальних напружень	71
5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	85
5.1. Параметри нагнітання скріплюючих складів	85
5.2. Параметри нагнітання для магнезійальних в'язучих сумішей.....	86
5.3. Техніко-економічна ефективність технології зміцнення порід	88
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	94

ВСТУП

Актуальність роботи.

На сьогодні при веденні очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах в основній покрівлі пласта залягають потужні і досить міцні породи, які зависаючи на великій площині привантажують приконтурну частину пласта. При цьому над опорним контуром пласта відбувається інтенсивне деформування безпосередньої покрівлі з розкриттям структурно-літологічних тріщин і утворення таких нових систем, як тріщини відколу, відриву, зсуву.

Незадовільний стан слабкої вивалонебезпечної покрівлі в значній мірі посилюється наявністю у гірському масиві різних плікативних, діз'юнктивних порушень, а також потужних і міцних літологічних окремоностей порід покрівлі, які важко піддаються прогнозуванню і попередньому виявленню. Вивали порід безпосередньої покрівлі у привибійний простір приводять до значних матеріальних витрат на ліквідацію їх наслідків та істотно знижують безпеку робіт у лаві.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є геомеханічне обґрунтування критерію стійкості очисних виробок в процесі експлуатації.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані наступні **задачі**:

- 1) Аналіз методів підвищення стійкості очисних виробок;
- 2) Лабораторні дослідження механічних властивостей гірських порід;
- 3) Чисельні дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо очисних виробок;
- 4) Геомеханічне обґрунтування критерію стійкості очисних виробок;
- 5) Рекомендації щодо стійкості очисних виробок в процесі їх експлуатації.

Ідея роботи полягає в використанні у якості критерію утворення зон вивалу порід ефективного коефіцієнту інтенсивності напруження.

Об'єкт дослідження. Процес руйнування порід і утворення вивалу безпосередньої покрівлі у зоні опорного тиску попереду очисного вибою.

Предмет дослідження. Породи покрівлі.

Методи дослідження: шахтні спостереження за обваленням покрівлі, методи лабораторних досліджень руйнування гірських порід; методи кінцевих елементів для чисельного моделювання напружено-деформованого стану порід покрівлі.

Новизна роботи:

1. Вперше встановлений критерій вивалоутворення для плоского напруженого стану гірського масиву з урахуванням тріщиностійкості порід.
2. Вперше встановлена залежність нормальних і дотичних напружень від кута нахилу площині зсуву.
3. Вперше представлена методика по визначенню зон вивалоутворення з урахуванням критерію тріщиностійкості порід.

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК

1.2. Аналіз заходів щодо запобігання обвалень покрівлі у очисному вибої

Аналіз виробничої діяльності шахт України, які ведуть розробку на великих глибинах в умовах слабких вміщуючих порід показує, що значна частина комплексно-механізованих вибоїв вимагає запобігання вивалоутворень нестійких порід покрівлі в цих вибоях.

Сьогодні ця проблема як ніколи актуальна, тому що на шахтах України продуктивність комплексно-механізованих вибоїв знижується в 2-3 рази [1, 2].

Таким чином на шахтах все більшого поширення набувають різні способи зміцнення слабких порід покрівлі, в тому числі і скріплюючі суміші забезпечують втраті плинності і їх затвердіння в масиві за час, обумовлене технологією виїмки вугілля.

Скріплюючі суміші можна розділити на три групи:

- водні суспензії тонких частинок, розміри яких обмежують можливість застосування їх для вузьких тріщин. До цієї групи належать водні розчини цементу і глини, що володіють швидкою седиментацією після припинення руху. Тому їх складно застосовувати при вузьких тріщинах. Більш стабільні розчини глини з сумішшю цементу і бентоніту або цементу з прискорюючими добавками, але вони мають низьку проникність по тріщинах;
- гелі, в'язкість яких поступово збільшується до повного затвердіння, наприклад, силікатні клеї, широко вживані для зміцнення ґрунтів і тампонажу обводнених пісків, проте вони повільно тверднуть і можуть бути використані тільки для профілактичного зміцнення порід;
- розчини на основі синтетичних смол, через деякий час твердіють під

впливом добавки або каталізатора. У порівнянні з силікатними і цементними дані розчини характеризуються кращою адгезією до породи і проникаючою здатністю в тонко тріщинуваті середовища, добре регульовані термінами гелеутворення і затвердіння, більшою механічною міцністю.

При розгляді властивостей закріплюючих розчинів на основі синтетичних смол можна зробити висновок, що їх основні складові мають переваги і недоліки. Епоксидні і поліефірні смоли володіють хорошими скріпними властивостями, але дорогі, з високою в'язкістю, чутливі до вологи. Мочевино-формальдегідні смоли обумовлюють дещо гірші фізико-механічні показники сумішей, але менш токсичні, дешевше, мають більш низьку в'язкість і забезпечену сировинну базу. Отже, такі смоли прийнятні для зміцнення порід методом нагнітання. Для цього використовуються нагнітальні установки з пневматичним приводом. Розглянемо технологію зміцнення порід покрівлі, розроблену у ФРГ, яка застосовується на деяких шахтах Донбасу.

Нагнітальне обладнання представлено насосною установкою, високо-напірними шлангами і герметизатором зі змішувачем. Максимальна продуктивність установки 10 л/хв, максимальний тиск 14 МПа, габаритні розміри 720×320×620 мм, маса 90 кг.

Насосна установка - компактна конструкція без редуктора, в ній співвісно з'єднані два шестеренних насоса і пневмодвигун, який дозволяє плавно регулювати подачу скріплюючого складу. Над насосами розташовуються дві витратні ємності з рідинами «Беведоль» і «Беведан». Від кожного насоса рідини надходять по шлангах до трійника, приєднаного до кінця трубки, яка виступає з шпуру. У трубці знаходиться пластмасовий змішувач статичного дії. Трубка з'єднана з герметизатором. Шпури глибиною 4 м бурять в породах під кутом 10-15° до нашарування на відстані один від іншого 3–5 м, ущільнення проводять на глибині 1,2–1,5 м. Герметизатор (разового користування) залишають в кожному шпурі. Застосовують

нормальні (час гелеутворення 20–30 хв) і прискорені (1,5 хв) суміші. При появі нормального складу через тріщини на оголеній поверхні масиву переключаються на нагнітання прискореного. Витрата поліуретанового складу на один шпур в середньому дорівнює 200 кг, на зміцнення 1 м² покрівлі – близько 15 кг. Тиск нагнітання не перевищує 5 МПа, середня продуктивність насосної установки 8,5 л/хв [3].

Технологія хороша, але використовувані смоли дорогі, токсичні. Тому вона навряд чи отримає широке застосування на шахтах Донбасу.

Зміцнення нестійких порід покрівлі в лавах анкерами, що закріплюються швидкотвердіючим поліуретановим складом, що спіюється по всій довжині шпуру, знаходить все більше поширення на шахтах Донбасу. Мета зміцнення – запобігти обвалення покрівлі до установки основного привибійного кріплення. У лавах з механізованими кріпленнями зміцнена покрівля повинна витримувати 4–6 циклів навантаження і розвантаження секцій при їх пересуванні.

Суть методу зміцнення покрівлі в очисних вибоях хімічним анкеруванням полягає в наступному. З боку площини обвалення порід з можливо великим випередженням очисного вибою встановлюють анкери на таку глибину, щоб після виїмки і зведення кріплення під зміцнену покрівлю передній кінець анкера знаходився над масивом вугілля. Поліуретановий скріплюючий склад подається в шпури в ампулах (рис. 1), що представляють собою запаяну поліетиленову оболонку зі скляною колбою.

У ній знаходиться один з компонентів – кодіцин, а в поліетиленовій оболонці – поліефірна суміш. Загальна маса складу в ампулі 170 м. На закріплення одного анкера витрачається 4–12 ампул в залежності від довжини шпуру, поперечного розміру стержня і ступеня тріщинуватості порід; на 1 м шпуру в середньому витрачається 3 ампули [4].

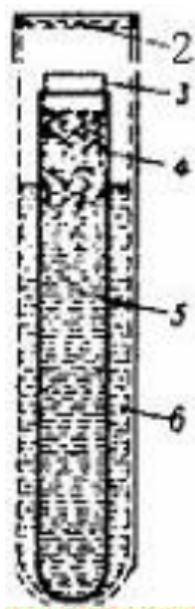


Рисунок 1.1 – Ампула зі скріплюючим складом: 1 - шов (спайка); 2 - поліетиленова оболонка; 3 - пінопластова пробка; 4 - скляна пробірка; 5 - кодичін; 6 - поліефірна суміш.

Для утворення якісного поліуретану вихідні компоненти, що знаходяться в ампулі, необхідно перемішати. Після укладання ампул в шпур вводиться анкер, який обертається за допомогою ручного електросвердла. При поступальному руху і обертанні анкера протягом 30 с пробірка і оболонка ампули руйнуються, і вміст їх добре перемішується. Отримана суміш спінюється за 30–40 с, збільшуючись в обсязі в 3,5–4 рази. Затвердіння відбувається через 1–3 хв, а через 10 хв анкер можна навантажувати. Завдяки застосуванню полістиролу (розширюваного) скріплюючого складу ефект зміцнення порід посилюється.

При спінюванні склад щільно заповнює простір між стінками шпуру і анкером і проникає на 10–15 см в великі тріщини навколо шпуру, скріплюючи навколишні породи. Питома міцність закріплення анкеру поліуретановим складом знаходиться в межах 137–178 кН на 1 м шпуру.

Поліуретановий склад утворюється в результаті хімічної реакції між кодичіном і поліефіром, інші добавки відіграють допоміжну, але дуже важливу роль (тріхло-ретілфосфат - пластифікатор, триетиламін - каталізатор

реакції, емульгатор КЕП-1 сприяє утворенню рівномірних по величині осередків пеноструктури; вода є спінювач, при її взаємодії з кодціном виділяється вуглекислий газ; варіюючи кількість води, можна змінювати кратність спінювання складу).

1.2. Досвід застосування хімічного анкетування у лавах з різною механізацією очисних робіт

У якості анкерів використовуються сталеві арматурні стержні діаметром 28 або 32 мм і клинові сталеві анкери, що серійно виготовляються діаметром 20 мм. Площина обвалення порід, як правило, закріплюється прогонами (дерев'яні бруси, розпили, стійки і сталеві швелери), які надягають на кінці стрижнів, які виступають з породного масиву. До породи прогони притискаються гайками, нагвинчують на кінці стержнів. Якщо покрівля представлена дрібно кусковою породою (розміром до 10 см), під прогони укладається дерев'яна затяжка, завдяки чому значно зменшується відшаровування і висипання порід убік виробленого простору (рис. 1.2).

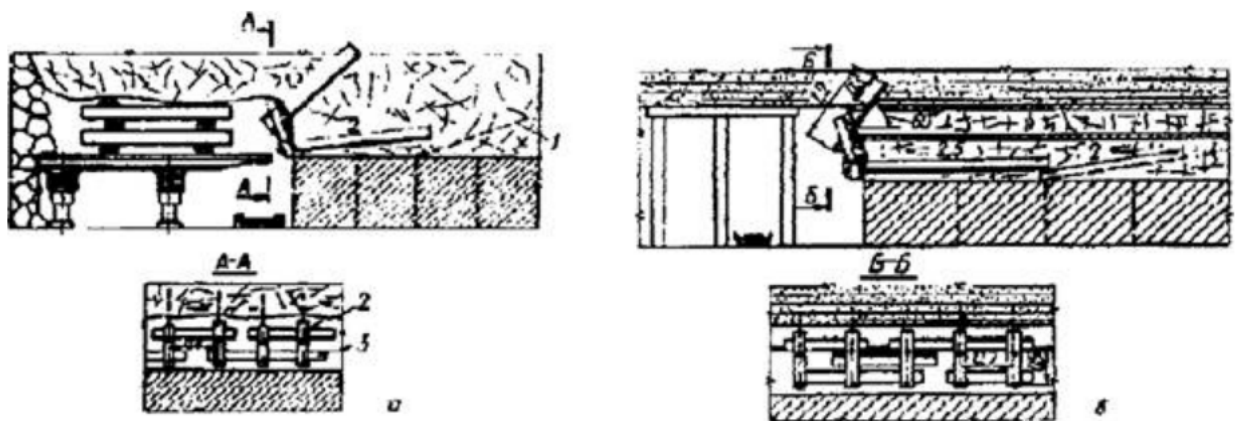


Рисунок 1.2 – Схема анкерування на шахтах ім. Кисельова (а) і «Жданівська» (б), 1 – профілактичний анкер; 2 - дерев'яна шпала; 3 - розпил.

Розглянемо досвід застосування хімічного анкерування у лавах з різною механізацією очисних робіт. На шахті ім. Кисельова об'єднання

Торезантрацит в 1-й східній лаві пласта обладнаної комплексом КМК-97, зона нестійкої покрівлі перебувала в нижній частині лави. Її довжина становила 20 м. Вивали порід відбувалися ділянками по 3-6 м, між якими залишалися проміжки зі стійкою покрівлею. Порода обвалювалась відразу за проходом комбайна на висоту 0,7-1 м. При плані 460 т за добу фактичний видобуток вугілля складав в середньому 350 т.

Після зміцнення порід методом хімічного анкерування (рис. 1, а) виникали вивали покрівлі в подальшому швидко ліквідовувалися. Середньодобовий видобуток зріс до 600 т, а в окремі дні досягав 800 т.

На шахті «Жданівська» (Шахтарськантрацит) хімічне анкерування проводилося в 6-й західній лаві пласта τ_9 , обладнаної комбайном «Донбас» з шириною захвату 1,6 м і індивідуальним кріпленням. На п'яти раніше відпрацьованих поверхах через ускладнення з підтриманням нестійкою покрівлі не вдавалося зробити виїмку вугілля до меж шахтного поля. У таку зону потрапила і 6-я західна лава. Порода покрівлі періодично обвалювалась на висоту 1,5-2 м ділянками по всій довжині лави. У деяких випадках зона обвалення перевищувала половину довжини лави. Зміцнення хімічним анкерування (рис.1, б) здійснювалося ділянками довжиною 7–8 м без припинення робіт з виїмки вугілля.

В результаті застосування зазначеного методу 6-й поверх був відпрацьований до меж шахтного поля. При виїмці вугілля із закладкою виробленого простору стан і стійкість покрівлі в лаві набагато краще, ніж при повному обваленні. Це обумовлено меншими проявами зсувів покрівлі по нормалі до нашарування і зміною механізму взаємодії вміщуючих порід з закладним масивом. В натурних умовах вивчити особливості цього механізму практично не можливо через неможливість розташування відповідної вимірювальної апаратури в товщі гірських порід.

Дослідженнями ДонУГІ на моделях з еквівалентних матеріалів з використанням ультразвукових вимірювань встановлено, що тріщини з'являються в породах покрівлі привибійного простору [5]. У міру переходу

цих порід в зону підтримки закладних масивом тріщини закриваються, щільність порід покрівлі досягає щільності непорушеного масиву. Проте процес утворення тріщин в покрівлі пласта при різних способах управління покрівлею залишається поки недостатньо вивченим.

1.3. Дослідження стійкості порід покрівлі у прівибійному просторі

Дослідження на моделях з оптично чутливих матеріалів дають можливість встановити картину розподілу напружень у пружному середовищі, яка формується в породах, лише в перший період після виїмки вугілля. У якості оптично чутливого матеріалу використаний ігдантін. При моделюванні повної закладки виробленого простору усадка закладного матеріалу склала 25% потужності пласта. Потужність порід безпосередньої покрівлі брали рівною шестиразовій потужності пласта.

Порівняння вихідних картин розподілу дотичних напружень у пружному середовищі показує, що при повній закладці в породах покрівлі концентрація напружень набагато менше, ніж при повному обваленні. Найвищий рівень напружень в обох випадках розташований у кромки очисного вибою. Проте при повному обваленні напруження неподалік об'єкта кромки приблизно в 1,5-1,8 рази більше, ніж при закладці.

Крім того, крайова частина масиву вугілля на більшій площі привантажена додатковим (опорним) тиском внаслідок більшого прогину товщі, що осідає на хаотично завалені шари порід безпосередньої покрівлі. Все це дає підставу стверджувати, що за інших рівних умов ймовірність появи тріщин гірського тиску в породах попереду лави буде завжди більшою при управлінні покрівлею повним обваленням, ніж при закладці. Цьому сприяє також наявність більшої довжини зони опорного тиску попереду лави (зростає час сприйняття породами покрівлі опорних навантажень, які до того ж в реальних умовах мають знакозмінний характер).

Стійкість порід покрівлі у привибійному просторі істотно залежить від ступеня їх попередньої трещиноватости, що сформувалася попереду очисного вибою під впливом опорного тиску, а також від величини осідань над виробленим простором прилеглих порід підробленої товщі. Позаду лави породи покрівлі розшаровуються, ростуть величини їх осідання і тріщинуватість породних шарів в результаті дії значних згинальних (розтягувальних) напружень.

Отже, в порівнянних умовах при закладці виробленого простору складається більш сприятлива геомеханічна обстановка в околиці очисного вибою. Очевидно, при відпрацюванні лав на глибоких горизонтах роль фактора управління покрівлею буде зростати в комплексі заходів щодо запобігання негативних проявів гірського тиску. Особливо позитивний вплив повної закладки буде позначатися при виїмці пластів потужністю понад 0,9–1 м, в безпосередній покрівлі яких залягають відносно слабкі аргіліти або алевроліти (потужність шарів до 2–3 м), а основна покрівля представлена міцними пісковиками значної потужності.

Підроблювані породи безпосередньої і основної покрівлі, які осідають на хаотично завалений шар або на закладку, являють собою блоковий масив типу безрозчинної цегляної кладки. Причому в міру віддалення від пласта розміри блоків в площині нашарування збільшуються. Щоб простежити в першому наближенні механізм розкриття і закриття торцевих міжблочних тріщин над привибійним і виробленим просторами, в моделях відтворені розрізи порід покрівлі по нормалі до нашарування.

Взаємодія блоків і розподіл в них напружень в цілому відповідають поведінці суцільного пружного середовища, є можливість представити загальну механічну картину осідання підробленої товщі.

При наявності в породах покрівлі деякої блокової структури при закладці виробленого простору концентрація максимальних дотичних напружень поблизу кромки масиву вугілля набагато менше, ніж при повному обваленні покрівлі. Характерно, що при обваленні покрівлі в міру віддалення

від очисного вибою збільшується розкриття міжблокових тріщин. В реальних умовах це супроводжується руйнуванням порід на торцевих поверхнях блоків. Чим інтенсивніше процеси розшарування і руйнування порід, тим гірше їх стан у лаві.

Викладені геомеханічні особливості поведінки порід покрівлі при обваленні практично повністю усуваються або зводяться до мінімуму, якщо у лаві застосовується повна закладка виробленого простору, коли усадка закладного масиву не перевищує 20–25% виймальної потужності пласта, а відставання закладки від забою не більше 3–3,5 м.

Породи покрівлі при цьому не втрачають своєї суцільності. Якщо в довколишніх шарах безпосередньої покрівлі і утворюються тріщини гірського тиску, то інтенсивність і глибина їх набагато менше, а процес розкриття та закриття тріщин не носить явно вираженого характеру.

Щоб при повному обваленні забезпечити хорошу стійкість покрівлі у призабойному просторі, потрібно різко зменшити прогин і опускання покрівлі не тільки поблизу вибою, а й в межах зони активних зрушень порід над виробленим простором. Довжина цієї зони стосовно до типових середніх гірничо-геологічних умовам Донбасу приблизно дорівнює подвоєному місячному посуванню лави.

Контактуючи між собою призматичні блоки створюють стійку систему, яка являє собою пакет шарів (типу розрізних балок), що мають в площині нашарування різну довжину блоків. Область трещиноватости порід, розташованих над очисною виробкою, за своєю формою наближається до склепіння, в вершині якого залягає плита з великим кроком обвалення.

Чим менший відсоток усадки закладного масиву, тим менше ширина і висота переміщається склепіння утвореної області тріщинуватих порід. За рахунок збільшення сил тертя і зачеплення торців блоків підвищується стійкість покрівлі у привибійному просторі лави. Однак у випадку великого відставання закладного масиву від вибою (більше 6 м) переваги цього методу у частині компенсації негативних впливів гірського тиску істотно

зменшуються.

Застосування закладки виробленого простору знижує концентрацію напружень у породах, що вміщують і підвищує їх стійкість у приви́бійному просторі і в околиці очисного вибою.

Механізм поліпшення стану покрівлі полягає у зменшенні експлуатаційної тріщинуватості порід попереду і позаду лави, у збереженні суцільності, збільшенні сил тертя і зачеплення між осідаючими породними блоками. У порівнянних умовах геомеханічні показники застосування закладки поліпшуються в міру збільшення жорсткості закладного масиву і зменшення ширини підтримуваного приви́бійного простору. Закладка виробленого простору знижує порушенність підробленої товщі і сприяє збереженню навколишнього середовища. На деяких шахтах Донбасу відпрацьовуються лави з використанням щитових кріплень. І для таких вибоїв існують способи, при яких щитове кріплення дозволить домогтися гарних результатів при управлінні нестійкою покрівлею [6].

Відомо, що через порушення стійкості щитове кріплення не в змозі підтримувати покрівлю при утворенні вугільним забоєм укусу. Великі вивали породи з покрівлі у цих зонах можуть істотно знизити швидкість посування очисного вибою. У цьому плані цікавим є досвід ФРГ. Лава з щитовим кріпленням відпрацьовувала пласт Дікебанк виймаємою потужністю 220 см. Безпосередня покрівля пласта у нижній частині представлена сланцюватою глиною. Вище неї залягає шар породи з вугільними прошарками змінної потужності, і на відстані від пласта приблизно 130 см проходить шар сланцюватої глини з включеннями глинистого залізняку. При повороті лави поблизу точки повороту утворювалися вивали породи висотою до 10 м, що пояснювалося підробітком ліній очисних вибоїв і установкою лави по напрямку основного кліважу.

Досвід показав, що нагнітання ангідриту дозволяє механічному кріпленню долати ділянки лави з великими вивалами породи з покрівлі. Перемичка висотою близько 1,5 м з природного ангідриту перекриває вивал з

боку лави, забезпечує відновлення розпору шарів покрівлі паралельно нашарування і запобігає подальшому розпушенню порід покрівлі над ще не відпрацьованим вугільним забоєм.

Завдяки високій міцності ангідритна перемичка створює жорстку опору пересовуваного під нею щитового кріплення і захищає від обвалених шматків породи гірників, що працюють під вивалом. Також слід зазначити, що нестійка покрівля у більшості лав зустрічається не на всьому протязі виїмкового поля, а періодично і на обмежених ділянках по довжині лави. Перехід цих ділянок без заходів по зміцненню порід покрівлі завжди пов'язаний з погіршенням техніко-економічних показників.

Незважаючи на відносно високі витрати, за допомогою всіх вище наведених способів зміцнення покрівлі можна отримати економічний ефект. У кожному конкретному випадку, виходячи з гірничо-геологічних умов, вирішується питання про ефективність застосування зміцнення порід покрівлі у очисному вибої шляхом нагнітання в них зміцнюючих сумішей або хімічного анкерування, а при великій висоті вивалам – споруди ангідритових перемичок. Застосування повної закладки виробленого простору поряд із запобіганням вивалам порід покрівлі дозволяє за рахунок залишення породи в шахті поліпшити екологічну обстановку в Донбасі і зменшити площу родючих земель, що відводяться під породні відвали.

1.4. Технологічні схеми підготовки і нагнітання сумішей

Періодична схема підготовки і нагнітання скріплюючих сумішей є найбільш простий, але при її застосуванні не в повній мірі використовуються переваги хімічного способу зміцнення порід і вугілля в зоні дії очисних робіт (рис. 1.3).

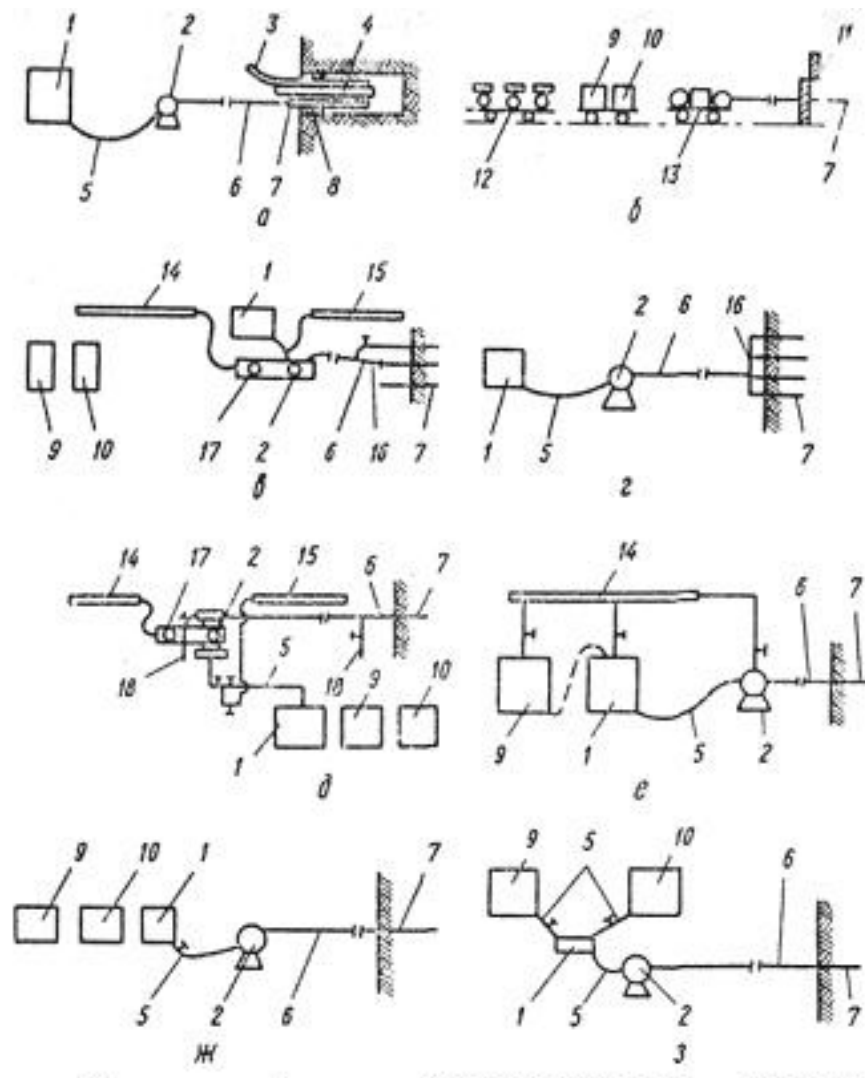


Рисунок 1.3 – Технологічні схеми нагнітання скріплюючих сумішей при одно розчинної схемі їх підготовки:

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. змішувальний бак; | 10. ємність з затверджувачем; |
| 2. насос; | 11. перемичка |
| 3. трубка; | 12. електрообладнання; |
| 4. штанга, | 13. нагнітальне обладнання; |
| 5. шланг; | 14. підведення повітря; |
| 6. високонапірний шланг; | 15. підведення води; |
| 7. ін'єктор; | 16. колектор; |
| 8. швидкотвердіюча суміш; | 17. пневмодвигун; |
| 9. ємність зі смолою; | 18. скидання; |

Сутність цієї схеми (рис. 1.3, е и ж) полягає в наступному. В змішувальному баку ретельно перемішують смолу і затверджувач, взяті в певному співвідношенні. Підготовлений склад насосом 2 під тиском по високонапірним шлангах 6 подають у шпур. Час нагнітання приймається на

10-15 хв менше часу гелеутворення складу, оскільки при невиконанні цієї умови відбувається різке збільшення в'язкості і затвердіння складу і система нагнітання виходить з ладу.

Така схема підготовки скріплюючого складу (рис. 1.3, а) [7] застосовувалася у 1971 р. на шахтах Великобританії. Скріплюючий склад нагнітали ручним діафрагмовим насосом з подачею 27 л/хв при тиску 1,4 МПа. Надалі насос наводився у дію електродвигуном.

Технологічні схеми, розроблені ІГД ім. А.А. Скочинського, відрізняються тим, що після насосів дозаторів і змішувача безперервної дії було встановлено високонапірне нагнітальне обладнання 13 (рис. 1.3, б). Електрообладнання 12, ємності зі смолою 9 і затверджувачем 10 і насос встановлювалися на платформах, за рахунок чого досягалася транспортабельність установки. На рисунку 1.3, в, наведена схема, в якій застосовані шестерні насоси з подачею 70 л/хв суміші під тиском до 1,5 МПа.

Схеми нагнітання водорозчинних смол, силікатних клеїв і магнезійних розчинів показані на рисунку 1.3, г, д, е. Підготовлений скріплюючий склад до насосу подається під дією стисненого повітря шахтної магістралі. Промивання нагнітальної системи після роботи проводиться шахтної водою. Насоси обладнані пневмодвигунами, що дає можливість змінювати продуктивність установки в процесі нагнітання.

На рисунку 1.3, з, приведена схема з двома ємностями, з самопливним живильником і одним насосом. Співвідношення компонентів розчину регулюється запірними пристроями. Компоненти складу надходять у насос через змішувач. Така схема може бути застосована при наявності робочих з великим досвідом застосування синтетичних смол.

Схема (рис. 1.4, а) в нашій країні була застосована для нагнітання скріплюючого складу одночасно у декілька свердловин. За цією схемою смола і затверджувач насосами-дозаторами по високонапірним шлангах надходять у змішувач безперервної дії, з якого після змішування - до ін'єкторів.

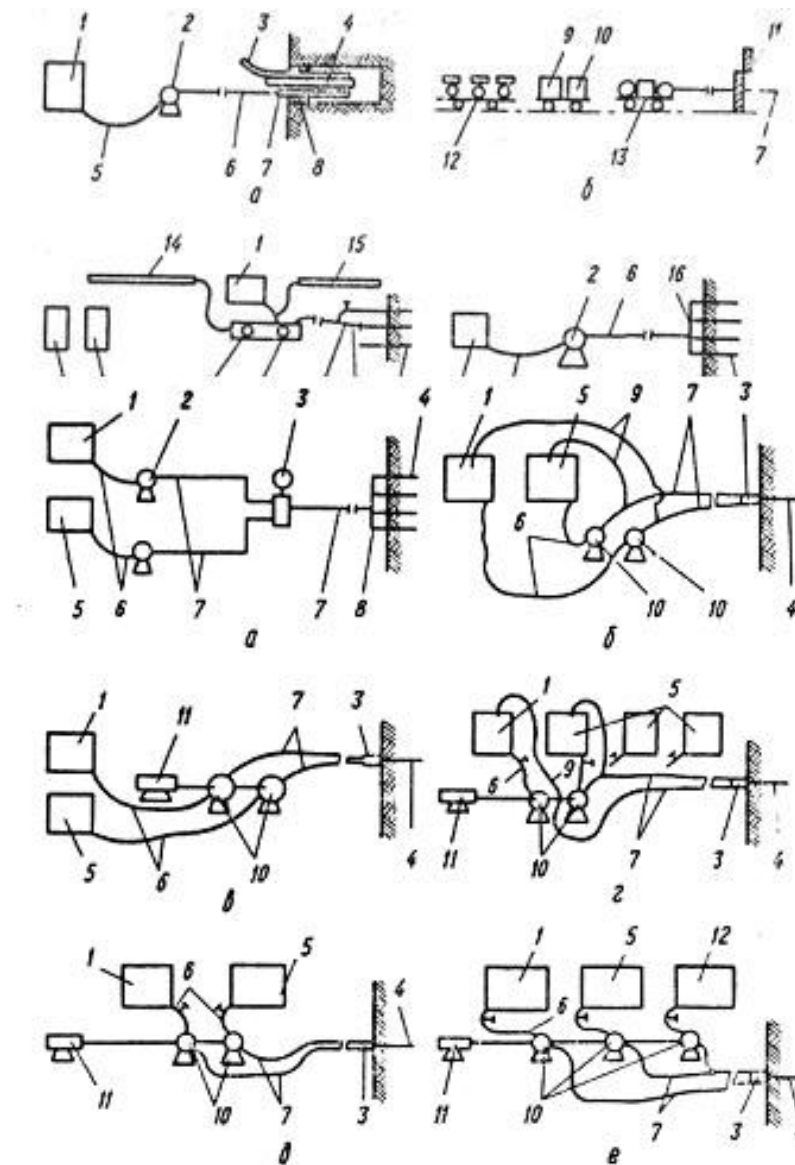


Рисунок 1.4 – Технологічні схеми нагнітання скріплюють складів при двох розчинній схемі їх підготовки:

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1. ємність зі смолою; | 8. колектор; |
| 2. насос дозатор; | 9. шланг для рециркуляції розчину; |
| 3. змішувач; | 10. насос; |
| 4. ін'єктор; | 11. пневмопривід; |
| 5. ємність з затверджувачем; | 12. інгібітор. |
| 6. шланг; | |
| 7. високо напірний шланг; | |

Схема, наведена на рисунку 1.4, б, характерна тим, що з боку високого тиску в обох насосах є пристрої для рециркуляції компонентів, завдяки чому можливо регулювати подачу і тиск нагнітання.

На шахтах Німеччини при зміцненні порід і вугілля [7] застосовуються технологічні схеми (рис. 1.4, в), що відрізняються тим, що обидва насоса з рівною подачею працюють від одного двигуна, а змішування компонентів складу здійснюється в змішувачі безпосередньо перед шпуром.

Більш досконалою є схема, наведена на рисунку 1.4, в. Вона має більшу гнучкість в роботі за рахунок декількох ємностей, що містять каталізатор різної концентрації [8]. Проте така установка може бути застосована при обслуговуванні її робітниками, що мають великий досвід роботи на подібних установках.

У схемах, подібних наведених на рисунку 1.4, д, гнучкість в роботі досягається за рахунок зміни подачі насоса, що нагнітає розчин затверджувача. Аналогічну схему застосувала американська фірма "Америкасайанамідкомпані", але в її схемі використовуються насоси з незалежними приводами. У деяких випадках виникає необхідність застосувати схеми з трьома насосами (рисунк 1.4, е), один з яких призначений для подачі у скріплюючий склад стабілізаторів або інших добавок.

У схемах безперервного нагнітання найчастіше застосовуються безприводні змішувачі, що розміщуються перед герметизатором у устя шпура.

Скріплюючий склад при застосуванні періодичної схеми нагнітання (або один з компонентів при безперервному нагнітанні) має значну в'язкість, тому для забезпечення заданого режиму нагнітання необхідно здійснювати примусову подачу його до насоса. Принципово для підпору високонапірних насосів можна застосувати вихрові насоси, але така схема буде складною. У практиці нагнітання скріплюючих складів частіше зустрічається примусова подача в'язких компонентів і складів стисненим повітрям, що поступає з шахтного повітропроводу.

У світовій практиці явно простежується тенденція до застосування для роботи високонапірних насосів пневмоприводів. Основною перевагою

пневмоприводу є здатність у процесі роботи змінювати швидкість обертання валу насоса, крім того, він має високу надійність при змінному навантаженні і перевантаженнях.

При виборі насосів для нагнітання скріплюючих складів основною вимогою є рівномірність потоку (мінімальна пульсація). При безперервному нагнітанні всі насоси повинні працювати з різною подачею, але при рівному тиску, тому їх треба підбирати так, щоб вони працювали як єдина установка, тобто бажано від одного приводу. Для хімічного зміцнення порід застосовуються поршневі насоси, проте кращими для нагнітання скріплюючих складів визнані насоси непультсуючої конструкції поступальної дії - гвинтові і шестерні [9]. Гвинтові насоси можуть забезпечити нагнітання як в'язких, так і малов'язких розчинів при тиску до 7МПа. Шестерні насоси можуть забезпечити тиск до 45МПа.

1.5. Схеми зміцнення порід при переході очисними вибоями геологічних порушень

У практиці зміцнення порід у шахті багато прикладів успішного нагнітання скріплюючих сумішей. Склави у шпури нагнітають із застосуванням штанг або з подальшою установкою в ці ж шпури анкерів. Бурят шпури безпосередньо в зміцнюючому масиві або через вугільний пласт.

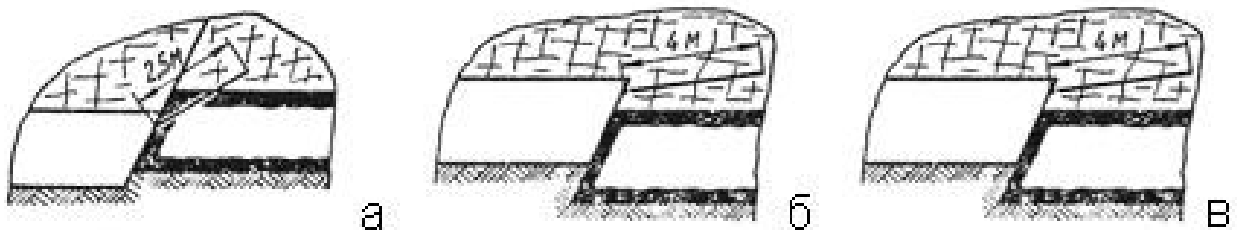


Рисунок 1.5 – Схеми зміцнення зон нестійких порід і вугілля

При переході очисними вибоям геологічних порушення у вигляді скидів з невеликою амплітудою шпури бурили так, щоб можна було

одночасно зміцнити і породу, і вугілля (рис. 1.5, а). Конкретні геологічні умови визначають не тільки необхідність, а й можливість зміцнення порід або вугілля. На шахтах в Лотарингії при переході геологічного порушення породи покрівлі зміцнювали нагнітанням складу в шпури довжиною 4м (рис. 1.5, б), а при зміцненні верхньої пачки вугільного пласта – через шпури довжиною 2м (рис. 1.5, в).

При зміцненні потужних обвалів шпури розташовують в два і більше рядів. Дворядне розміщення шпурів в Донбасі було застосовано при зміцненні порід покрівлі (ІГД ім. А. А. Скочинського).

Герметизацію устя шпуру при нагнітанні скріплюючих сумішей виробляють як механічними, так і автоматичними (шланговими) герметизаторами устя шпуру. На шахтах Донбасу випробували механічні, шлангові і автоматичні герметизатори типу ГАМ.

Практика показала, що при зміцненні порід в очисних вибоях доцільніше застосовувати шлангові герметизатори, а в місці їх з'єднання з високонапірним шлангом встановлювати пристрій скидання тиску у системі нагнітання для видалення герметизатора зі шпуру після нагнітання.

Тиск в системі нагнітання контролюють манометрами, які встановлюють на прямоточних камерах з мембраною. Витрата скріплюючого складу або його компонентів контролюють витратомірами або мірними ємностями.

При періодичній схемі підготовки і нагнітання скріплюючого складу змішування компонентів можна здійснювати вбудованими в ємність лопатевими мішалками, обертання яких протягом хвилини виробляють вручну або за допомогою ручного електросвердла. При безперервній схемі змішування компонентів можна здійснювати в герметичних змішувачах, що працюють від зовнішнього джерела енергії, або в безприводних змішувачах. Більш раціонально застосовувати безприводні змішувачі, що змішують компоненти за рахунок турбулентного потоку компонентів складу у лабіринтах і системах пружин.

1.6. Стан робіт по анкеруванню порід, що закріплюються хімічними речовинами

Роботи з підвищення стійкості порід шляхом їх армування сталевими або дерев'яними стержнями, що закріплюються у масиві за допомогою твердіючих хімічних складів (хімічне анкерування), за останні роки набули поширення як на шахтах вугільної промисловості, так і в рудниках чорної і кольорової металургії. У вугільній промисловості хімічне анкерування систематично застосовується у Донбасі.

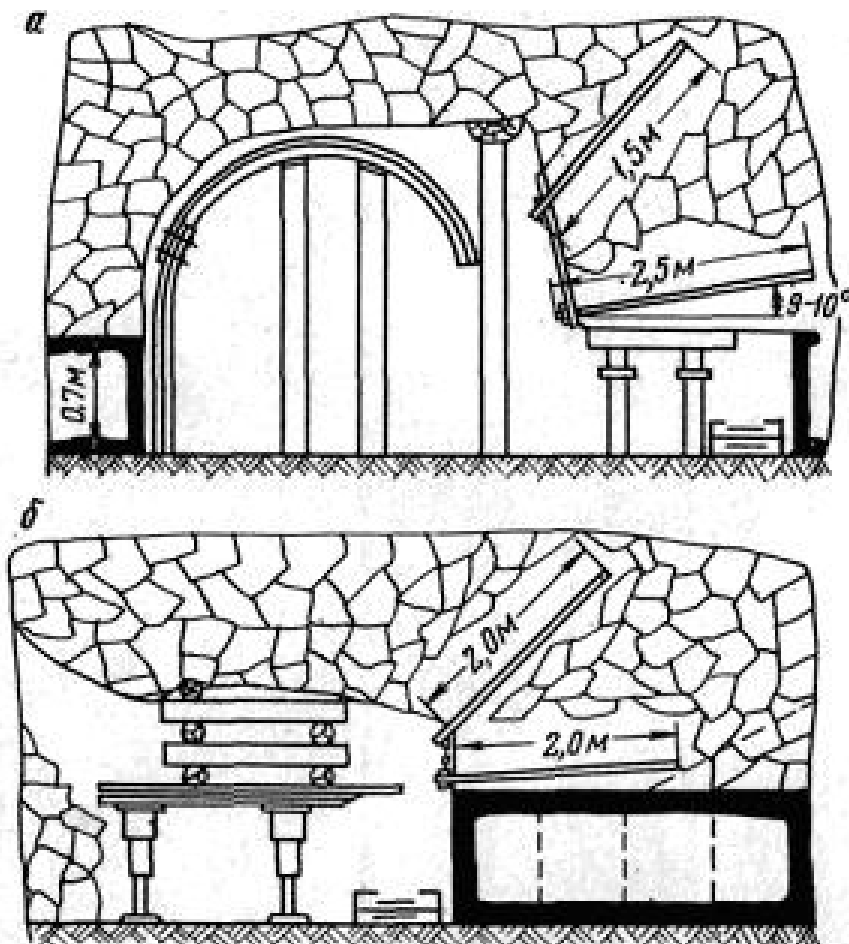


Рисунок 1.6 - Схеми зміцнення покрівлі очисних вибоїв шляхом анкерування з використанням спінюючих поліуретанових сумішей

Система стержнів, по всій довжині закріплених у порушеному тріщинами масиві, виконує роль арматури, підвищуючи жорсткість і несучу

здатність гірського масиву і знижуючи його деформації.

Твердіючи хімічні композиції для закріплення стержнів у породах подаються у шпури, найчастіше за все в попередньо виготовлених патронах (ампулах) діаметром 38–40 мм і довжиною 30–35 см, що заповнюються двома рідкими компонентами – смолою і затверджувачем, які при розриві оболонки ампули (скляній поліетиленовій) і перемішуванні обертним анкером закріплюють його по всій довжині шпуру.

ДонВУГІ розроблена і впроваджена технологія випереджаючого зміцнення (перед вийманням вугілля) нестійких (до 1м) покрівель очисних вибоїв сталевими армуючими стержнями довжиною 1,5-3м з використанням 2-3 ампул на поліуретановій основі.

Оболонка ампули зазвичай виготовляється з матеріалу, що легко руйнується – скла, плівки, паперу, тендітної пластмаси. Компоненти скріплюючої композиції (наприклад, смола і затверджувач) розміщуються у ампулі ізольовано один від одного. Руйнування ампул і перемішування тих, що знаходяться в них хімічних композицій проводиться обертанням армируючого стержня при його подачі у шпур. Отвердіння складу по всій довжині стержня і утворення, таким чином, жорсткої арматури відбувається через 2–3хв після руйнування ампули.

Залежно від призначення, умов зберігання, транспортування та застосування розроблено кілька конструкцій ампул, що розрізняються як за зовнішнім виглядом, так і розмірами. Під анкерне кріплення зазвичай буряться шпури діаметром 42-43 мм, відповідно і ампули виготовляють діаметром 39-40 мм і довжиною 300 мм. Економічно це не виправдовує себе, так як розмір анкерів по діаметру зазвичай обмежується межею 20-22 мм.

У більшості зарубіжних країн під анкери бурять шпури діаметром 28–32 мм, що дозволяє випускати більш економічні ампули – діаметром 24–20 мм). По довжині ампули в залежності від необхідності можуть виготовлятися розміром 25–60 см.

Останнім часом в ІГД ім. Сковинського, ВНІГідроугле і деяких інших

організаціях проводяться пошукові роботи по технології закріплення анкерів без ампул, тобто дозованою подачею хімічних композицій у шпур нагнітання і без патронів. Ефект підвищення стійкості покрівлі забезпечується як її армуванням стержнями, так і за рахунок проникнення у великі тріщини навколо шпуру скліюючих хімічних складів.

Стержні анкерних кріплень у більшості випадків виготовляються із сталевих прокатних профілів – круглої або арматурної сталі (періодичний профіль).

З технологічних та економічних міркувань у ряді випадків застосування сталевих анкерів не тільки не ефективно, але й не доцільно. По-перше, анкери які відпрацювали свій термін з гірських масивів, як правило, не витягають і повторно не використовують, тобто метал втрачається безповоротно. По-друге, сталеві анкери можна застосовувати, наприклад, у таких випадках, як підвищення стійкості що підлягають згодом відпрацюванню потужних вугільних пластів або ціликів, для попередження спучування ґрунту, зміцнення вуглеспускних печей та інших випадків, коли закріплюється масив в майбутньому може зазнати впливу ріжучих органів комбайнів.

У цих випадках замість сталевих доцільно застосовувати стержні, що володіють високою міцністю на розтягування, але слабким опором на зріз. До таких матеріалів відносяться одновісні орієнтовані склопластики, пресована і пластифікована деревина, спеціальні композити.

Анкери зі склопластиків розроблені в ІГД ім. Скочинського. Конструктивно анкер є склопластиковий стержень, армований на вихідному кінці спіраллю із сталевго дроту, другий кінець анкера закладається у сталеву втулку, що має зовнішню різьбу під гайку. У комплект анкера входять гумова ущільнювальна манжета і сталева опорна плитка.

Манжета застосовується для запобігання витікання з шпуру рідкого складу у перший момент його розкриття з ампули. У шпурах, пробурених горизонтально або з ухилом униз, необхідність у манжеті відпадає. Несучий

склопластиковий стержень анкера виготовляється способом протягання пучка скложгута ЖС-1 (пасмо орієнтованих, рівномірно натягнутих первинних алюмоборосилікатних ниток), просочених сполучною на основі поліефірної смоли, через калібровані отвори фільтрів і камеру полімеризації ($t = 130\text{--}140^\circ\text{C}$) на протяжній машині 4УПС-12. Діаметр стержня $19 \pm 0,5$ мм, довжина – в залежності від призначення анкера, проте найбільш часто в межах 1000–2000 мм.

Металеве обплетення служить для підвищення надійності закладення гладкого анкера у шпурі. Обшивка, як і сталева втулка, з'єднуються із склопластиковим стержнем за допомогою епоксидного клею. Межа міцності склопластикового матеріалу стержня на розтягування $\sigma_{\text{ср}} \geq 500$ МПа, на зріз $\tau_{\text{с}} \leq 80$ МПа.

Закріплення склопластикових анкерів у шпурах масиву здійснюється виключно хімічними складами в ампулах. Для поліпшення процесу руйнування ампули стержень має скос під кутом 45° . Цьому ж служить виступаючий носик обплетення.

Новокузнецьким інститутом ВНІГідроуголь розроблено кілька нових варіантів склопластикових анкерів, загальною відмітною ознакою яких є наявність пінопластового заповнювача. Дійсно, з метою економії як склопластику, так і хімічної закріплюючої речовини (особливо при великому діаметрі шпурів 42–44 мм), цей захід доцільний.

Одна з конструкцій анкера є трубчаста склопластикова оболонка (основа), заповнена пінопластом. Вихідна частина анкера (головка) виготовлена з міцного полімербетону. Інший тип анкера - полімерний, конструктивно виконаний у вигляді стержня з арматурної сталі, укладеного в полімербетонне оправлення, кінцева частина якого розвинена в притискну головку, необхідну для кріплення склопластикових затяжок до боків гірничих виробок. Анкери призначені для приконтурного кріплення масиву навколо виробок і виготовляються довжиною 1,6–3 м.

Представляють також інтерес полімерні анкери для глибокого

зміцнення масиву (довжиною 3-4м), які зводяться Безпосередньо в шпурі або свердловині шляхом розмотування склопластикової стрічки із рулону. В якості наповнювача у внутрішній простір арматури вкладається кілька (на довжину свердловини) сердечників з жорсткого пінопласту.

ІГД ім. А.А. Скочинського для підвищення міцності зчеплення з твердіючими хімічними складами розробив кручені склопластикові анкери. Відмінною особливістю анкера є його петлевий вузол, виконаний у вигляді петлі, що обгинає сталевий коуш, подібний канатному.

Шаруватий матеріал одновісної орієнтації працює у петлі на вигин, як у кривому брусі, у той час як всі інші традиційні методи з'єднання деталей (клейові, різьбові, шпонкові, заклепочні і ін.) трансформують прикладене розтягувальне навантаження у напруження зсуву вздовж шарів матеріалу.

Головна частина анкера є два розбіжних у різні боки зрізу джгута (вуса), а на відстані 15-20 мм від вузлів поперек джгутів анкеру протягується відрізок сталевго дроту діаметром 4 мм (шплінт). Функції вусів і шплінта однакові – руйнування ампул в шпурі.

Анкери виготовляють за допомогою спеціального механізму, заснованого на використанні токарного верстата, у такій послідовності. Просочена синтетичною смолою заготовка склоровінгу (джгута) накидається петлею на закріплений у патроні коуш. Обертанням задньої головки установки досягається скручування пасми на заданий крок.

Дотримання точності кроку і регулювання подачі пасма здійснюється спеціальним пристроєм. Готовий анкер підвішується у вертикальному стані для полімеризації смоли, яка виробляється при кімнатній температурі. Для прискорення процесу полімеризації підбирається система ініціювання.

Описана технологія вимагає застосування смол так званого контактного типу, у процесі полімеризації яких не виділяються побічні продукти і не потрібен зовнішній тиск. До таких смол відносяться ненасичені поліефірні, а також епоксидні і деякі інші.

При виборі полімерних матеріалів для виготовлення анкерів виходили з

того, що міцність анкера на розтягнення мало залежить від типу застосовуваної смоли, а майже повністю визначається скловолокнистим армируючим наповнювачем. Для виготовлення анкерів було випробувано три види освоєних вітчизняною промисловістю склоровінгу (джгутів) на поліефірних сполучних: РБН 10-2520-289А; РБР 10-42х60-9; РБН 13-2520-4п.

Випробування показали, що найбільш високою несучою здатністю володіють анкери з склоровінгу РБН 13-2520-4п, апретовано спеціальним гідрофобною-адгезійним складом і просоченого ненасиченою поліефірною смолою загального призначення (НПС-609-21М).

Крок навивки пасма анкеру з умов забезпечення максимальної міцності на розрив і міцності закладення в шпурі, за результатами випробувань, рекомендується приймати близько 100 мм для анкера з поперечним перерізом 200 мм². Для анкерів іншого розміру крок навивки вибирається з умов подібності. Несуча здатність анкеру з рекомендованого типу ровінгу 120–130 кН.

Армополімерне анкерне кріплення складається з арматурного стержня, що закріплюється у тильній частині свердловини або по всій довжині розчином смоли. Виступаючий у виробку кінець анкеру оформляється так само, як у звичайних анкерів і найчастіше має різьбу для нагвинчування гайки з метою створення у стержні попереднього натягу.

Армополімерні анкери використовуються на шахтах як привибійне кріплення при виїмці вугілля горизонтальними смугами з повною закладкою виробленого простору. Дане кріплення – ефективне і перспективне.

З питань вдосконалення і конструювання анкерного кріплення приділяється велика увага. Армуючий стержень простий по конструкції (рис. 1.7) [9]. Може виготовлятися з різних матеріалів: металу різного профілю, скловолокна, деревини та інших матеріалів.

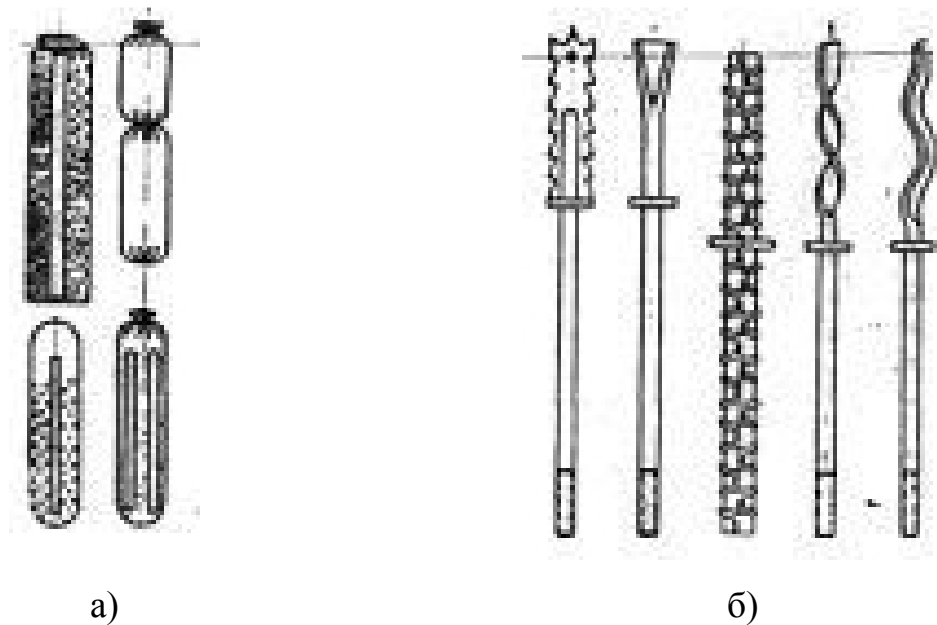


Рисунок 1.7 – Різновиди ампул (а) і армуючих стержнів (б) армополімерного анкерного кріплення (ампули у скляній і плівково-полімерній оболонці)

Використання звичайного дроту діаметром 5-6 мм з кінцем у вигляді петлі також дає хороші результати. У свердловині стержень закріплюється за допомогою ампул, а також шляхом подачі розчину в неї під тиском.

У 1956 році у США проведені дослідження в лабораторних і шахтних умовах щодо застосування смол для кріплення гірничих виробок. Встановлено, що шаруваті сланці скріплені смолами перевищують свою міцність в 3-4 рази. Завдяки ампулам з анкерним кріпленням повністю усунути обвали дуже тріщинуватої покрівлі.

Смоли повністю захищають арматурний стержень від корозії, добре протистоять дії агресивних вод і мають високу міцність (межа на розрив 140–560, на стиск 700–1400 кгс/см²). У разі застосування смоли зі звичайними анкерами значно підвищується міцність їх закріплення в слабких породах.

У Німеччині щорічно встановлюється понад 200 тисяч армополімерних анкерів. Суміш зі смоли, заповнювач (зазвичай пісок), затверджувача і у ряді випадків прискорювача доставляється у вибій в ампулах, виготовлених зі скла або з м'якого матеріалу, які не взаємодіють з компонентами ампули.

Значний обсяг застосування армополімерних анкерів має місце і у Франції. Зовнішня оболонка ампул – плівка або папір, просочений спеціальними речовинами. Амбула міститься у кожусі з пластикової сітки, що робить оболонку жорсткою і полегшує введення у свердловину.

У ЦЕММ № 1 об'єднання Прокопьевсквугілля оболонки для ампул виготовляються зі скляних трубок, поміщених одна у іншу, або з поліетиленової плівки товщиною 100-120 мкм. Запропоновано ряд способів зведення армополімерного анкерного кріплення.

Так, в Німеччині кріплення зводиться із застосуванням суміші синтетичних смол з інертним заповнювачем і затверджувачем. Цей спосіб відрізняється тим, що з метою підвищити міцність закріплення арматурного стержня і знизити вартість кріплення затверджувача і прискорювач вводять у свердловину окремо за допомогою капсул, розміщених одна у іншій.

У Франції запатентована амбула, що складається з поліефірної смоли і каталізатора (у вигляді суміші з перекису бензолу з дібутилфталатом), які розподіляються між собою паперовою стрічкою, що покриває спочатку стержень з поліефірної смоли, а потім каталізатор, розташований навколо стержня.

Колишнім Ленінградським гірничим інститутом для прискорення процесу твердіння компонентів рекомендовано ампули і сталеві арматурні стержні попередньо нагрівати до 30°–50°С. У Кузбасі ампули з поліетиленової плівки виготовляються з двома відділеннями; в одному поміщається смола і інертний заповнювач – пісок, у іншому – затверджувач. У ІГД ім. Скочинського в цілях прискорення процесу твердіння запропоновано наступне співвідношення компонентів за масою (табл. 1.1).

Крім того, розроблені і випробувані суміші розчинів на основі епоксидної смоли з короткими (1–2 хв.) і більш тривалими (30–40 хв.) термінами затвердіння; перші для сухих порід, другі для сухих і вологих. Склади відрізняються високою міцністю; анкер закріплений даними розчинами, витримував навантаження до 18–20 т., бували випадки при

випробуванні, що розривався сам анкер, а смола витримувала велике навантаження.

Таблиця 1.1 –

Співвідношення компонентів за масою за процесом твердіння

Компоненти	Співвідношення компонентів по масі, %:
Поліефірна смола	20-40
Стирол	2-12
Перекис метилетилкетону	0,2-1,2
Ванадій	0,4-2,8
Наповнювач (пісок)	77,4-44

Такими розчинами було закріплено понад 90 тис. анкерів на шахтах об'єднань Ростовуголь, Укрзахідвугілля, Донецьквугілля і тресту Горлівськвуглебуд (на об'єктах останнього ці анкери були застосовані також в поєднанні з набризг-бетоном).

У складі (для заповнення свердловин під анкерне кріплення) на основі водного розчину карбомідної смоли 30-45%, коагулятора використовується етиловий спирт і соляна кислота (міцність зчеплення зі стінками свердловини склала 42-48 кг/см²). ВНПгідровугілля для підвищення міцності закріплення арматурного стержня у свердловині рекомендує інгредієнти в таких пропорціях (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 –

Інгредієнти для заповнення свердловин під анкерне кріплення

Фенольно-формальдегідні смола	100
Наповнювач	50-200
Затверджувач	10-30

Наповнювачем служить кварцовий пісок, який повинен мати глинистих

включень не більше 10%. Перед вживанням пісок просушується у шафі при температурі 250°-300°С. Затверджувач складається з двох компонентів – бензосульфокислоти (28,5%) і ортофосфорної кислоти (71,5%).

Для закріплення стержнів у свердловині використаний хімічний склад СШ-1; основа його – синтетичний полімер з високими адгезійними когезійними властивостями. Для додання складу СШ-1 необхідних фізико-механічних властивостей у полімер вводилися низькомолекулярні тіосполуки. Межа міцності затверділої суміші з кварцовим піском крупністю до 0,5 мм при розтягуванні досягав 700, при вигині 800, стисненні 1260 і зсуві 1400 кгс/см². Міцність закріплення стержнів у свердловинах перевищувала 13 т.

У Німеччині рекомендується застосовувати смоли для армополімерних анкерів, які вступають у реакцію, що твердіє лише при температурі 600С (переважно епоксидні і поліуретанові смоли або їх суміші). При цьому необхідна для затвердіння компонентів температура у свердловині досягається в основному за рахунок теплоти тертя, яка виникає при обертальному введенні арматурного стержня з частотою обертання 900-1000 хв⁻¹ і з тиском на стержень 1 т.

Товариством хімічних заводів Франції "Рон Пулянс" запатентована ампула з поліефірної смоли, оболонка якої складається з паперу (маса 1м² становить 10–20 г).

У найбільш поширених ампулах з поліефірною смолою у якості затверджувача застосовується перекис бензолу, який забезпечує схоплювання протягом 30 с (що швидко) і 2–3хв (повільно схоплюється).

Німецькою фірмою "Бергверкофербанд" запропонована ампула зі скляною оболонкою, вміст якої береться в залежності від температури у шахті. Як заповнювачі ампул для анкерів, що встановлюються у скельних породах, використовується кварцовий пісок або корунд, а у слабких породах – порошкоподібні сланці. Тієї ж фірмою розроблена ампула, що включає заповнювач 50-80, смоли 20-50, затверджувача по відношенню до

смоли 2-10 частин (смола поліефірна, епоксидна, поліуретанова).

Акціонерним товариством "Косенталл Ательє де Каршпаш" (Франція) створена ампула з циліндричною гнучкою або жорсткою оболонкою, закритою з обох сторін. Вона містить синтетичну смолу, заповнювач, затверджувач і має всередині поршень для перемішування компонентів.

Фірмою "Сельфікс" (Франція) розроблені ампули з поліефірною смолою (суміш ефіру, фталевої кислоти і стиролу). Заповнювач – дрібний пісок, затверджувач-перекис метилетилкетону з піском. До складу ампули входить 28% смоли, 3% затверджувача, 69% заповнювача. Суміш після перемішування твердне через 15-20 хв (межа міцності при розтягуванні 200 кгс/см², при стисненні 1200 кгс/см², модуль пружності при розтягуванні 129,4 тис. кгс/см² лінійна усадка 0,8-1%, опір зрушенню 250 кгс/см², опір удару 7-8 кгс/см²).

Для прискорення установки армополімерних анкерів з використанням машин обертальної дії у Франції рекомендується у якості сполучної деталі з патроном машини застосовувати натяжну гайку анкера, що має відповідну пластину, яка обмежує хід гайки вчасно зануреного стержня у смолу і відділяється від неї, коли стержень продовжують обертати тієї ж машиною в напрямку загвинчування гайки після схоплювання смоли. З огляду на те що один різновид смоли не може задовольняти всім гірничо-геологічними умовами, компанією "Амерікен Сінамід" розроблено три типи смол. В Англії в якості основного компонента ампул використовують епоксидні і поліефірні смоли. Перевагою ампул з поліефірною смолою є те, що вони досягають 80-90% їх максимальної міцності за кілька хвилин змішування. Міцність закріплення стержня анкеру у свердловині за допомогою епоксидної смоли досягає великої величини.

У ІГД ім. Сковчинського розроблені розчини на основі епоксидної смоли з більш високою міцністю, ніж поліефірна смола; розчин твердіє як у сухих, так і у вологих породах. Одним з важливих властивостей розчинів є зміна в'язкості їх у період між перемішуванням складових і початком

затвердіння. Для анкерів, закріплених розчином на всю довжину, бажаний розчин з більш тривалим часом затвердіння, у якого наростання в'язкості відбувається у останній період. Для анкерів, у яких закріплюється тільки хвостова частина, бажано мати коротший термін затвердіння і більш високу в'язкість.

Армополімерне анкерне кріплення почало застосовуватися у Англії з 1967 р. Стержні анкерів мали натягувальний пристрій і встановлювалися у свердловинах діаметром 43 мм. Анкер, широко застосовуваний у вугільних шахтах, показаний на рисунку 1.8, а.

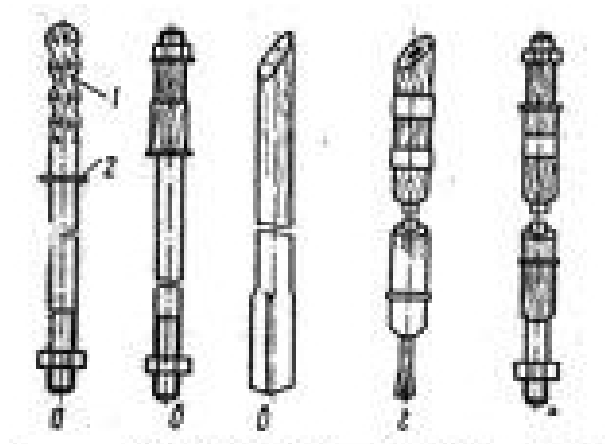


Рисунок 1.8 – Різновиди стержнів армополімерних анкерів, що застосовуються в Англії

Кінець 1 стержня розплющений у вигляді лопатки; кільце 2 втримання смоли приварене або притиснуте до стержня на відстані 20 см від його кінця. Для закріплення стержня у свердловині використовувалися дві ампули масою по 373 г на поліефірній смолі. Щоб зменшити витрату смоли, була зроблена спроба перейти на свердловини діаметром 28 мм, але ще не вирішена проблема буріння свердловин малого діаметра по м'якій породі. Тому в Англії металеві стержні армополімерних анкерів стали обшивати деревом або укладати у пластмасу і закріплювати у свердловини діаметром 43 мм. В цьому випадку дерев'яна або пластмасова обшивка довжиною 25 см і зовнішнім діаметром 36 мм прикріплюється до кінця стержня (рис. 1.8, б). Ефективними також виявилися дерев'яні анкери, що закріплюються смолами

(рис. 1.8, в), а також стержні, армовані на всю довжину (рис. 1.8, г, д). Щоб визначити надійність армополімерного кріплення, що закріплюється у свердловинах із застосуванням поліефірної смоли, в Англії проведені порівняльні дослідження. Виявилося, що у даних анкерів велика несуча здатність, ніж у металевих при меншій їх деформації.

В умовах шахт Кузбасу КузНІУІ проводилися випробування на міцність закріплення фенольнорезольною смолою дерев'яних анкерів різної конструкції. Для випробувань анкери виготовлялися з конусоподібною головкою без кільцевих і з кільцевими канавками, кінець зрізаний навскіс, головка чотиригранна з клиноподібним списом. Стержень останньої конструкції забезпечував найкраще перемішування компонентів ампули і найбільш високу міцність їх закріплення. Випробування показали, що міцність закріплення дерев'яних анкерів смолою перевищує 5 т (у вугільному і у породному масивах) і залежить від якості перемішування складу ампули.

ВНІГідровугіллям запропонована армополімерне анкерне кріплення: ампули 1 зі смолою і інертним заповнювачем у проміжок з ампулами з затверджувачем; склад їх перемішується змішувачем 2 під час руху стержня 3 у сторону дна свердловини (рис. 1.9, а). На стержні 1 (рис. 1.9, б) армополімерного анкера розташовані кліноконічеській конус 2, полувтулка 3 і кільце ущільнювача 4. У верхній частині стержня нанесено різьба для кращого зчеплення з компонентами суміші і для пересування конуса.

Фірмою "Бергверкофербанд" розроблений армополімерний анкер зі стержнем 1 (рис. 1.9, в), який з'єднується з головкою 2 анкеру за допомогою різьби 3. Головка закінчується конусом 4 і має паз 5 для гарного перемішування компонентів. У нижній частині головки розташовується кільце ущільнювача 6 з манжетами 7. Відмінною особливістю армополімерного анкеру (рис. 1.9, г), також розробленого в Німеччині є те, що на кінці стержня 1 є косий зріз 2, на бічній поверхні косі виступи 3 з лівою різьбою.

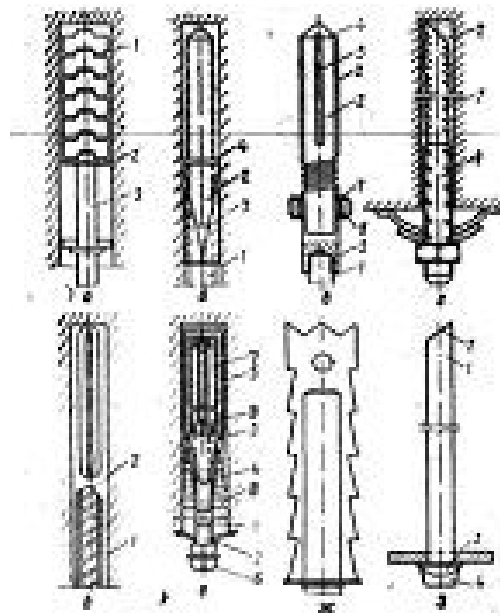


Рисунок 1.9 – Різновиди армополімерних анкерів і їх стержнів вдосконаленої конструкції

В Англії запропонували у якості арматурного використовувати трубчатий стержень 1, заповнений цементним розчином (рис. 1.9, д), з кінцем 2 неправильної клиноподібної форми. Анкер, застосовуваний в США, складається з стержня 1 з різьбою 2 на обох кінцях (рис. 1.9, е). На одному кінці стержня діаметром 18-20 мм монтується конусна гайка 3 з виступами, на ній фіксуються дві полувтулки 4, з'єднані між собою пластинчатою скобою 5.

З протилежного боку стержня знаходиться опорна опукла шайба і гайка з контргайкою 6. Перед введенням анкера у свердловину в торцевій її частині поміщається ампула 7 зі смолою і капсулою з затверджувачем. Для запобігання витікання зі свердловини розчину передбачено гумове ущільнення 8. Ампула закріплюється на кінці стержня, при його обертанні руйнується перемичка 9 ампула з затверджувачем, розчин надходить у замок анкера, через що і збільшується міцність його закріплення в породах.

Замість конусної полувтулки можуть застосовуватися анкери з чотирьохпир'яною гільзою і інших різновидів. Для кращого перемішування компонентів патрона в США запропонований стержень зі спеціальною

головкою (рис. 1.9, ж). У Франції рекомендують виготовляти арматурні стержні 1 зі зрізом 2 під кутом 45° і головкою 3 з підсилючим виступом 4, за допомогою якого здійснюється обертання стержня з метою переміщення компонентів патрона (рис. 1.9, з).

В області армополімерних анкерів також використовують ампули з різьбою у нижній частині для нагвинчування на стержень і подачі у свердловину.

Технологія зведення армополімерного кріплення найбільш повно розроблена в США. При виготовленні ампул з плівки використовують два способи їх формування: зі швом 1 з трьох сторін (рис. 1.10, а) і чотирьох (рис. 1.10, б). Амбула з затверджувачем поміщається в всередині ампули 3 зі смолою і інертним заповнювачем. Для доставки у свердловину на ампулі відігнутий кінець 1 перев'язаний джгутом 2, утворюючи кишеню, у яку вставляється стержень 3 (рис. 1.10, в). У США також розроблений безампульний спосіб подачі розчину смоли у свердловину. Розчин 1 за рахунок вакууму, що створюється ежектором 2, при проходженні стиснутого повітря від магістралі 3, засмоктується у передаточну трубку 4 (рис. 1.10, г), а з неї досилається у свердловину поршнем 5 з повстяною або розрізною манжетою 6, яка після подачі розчину залишається у свердловині і герметизує її на час введення арматурного стержня.

На рисунку 1.10, д показаний спосіб подачі у свердловину розчину смоли насосом. З метою створення щільного контакту між опорною шайбою 1 і нерівній покрівлею 2 рекомендується розташовувати кільцеподібну ампулу 3 з отвором для пропуску стержня 4 (рис. 1.10, е). При закручуванні гайки 5 верхня поверхня ампули 3 з оболонкою з плівки приймає форму покрівлі, а нижня - опорної шайби. Після затвердіння розчину щільний контакт між опорною шайбою і нерівній покрівлею зберігається протягом усього терміну служби армополімерного анкеру.

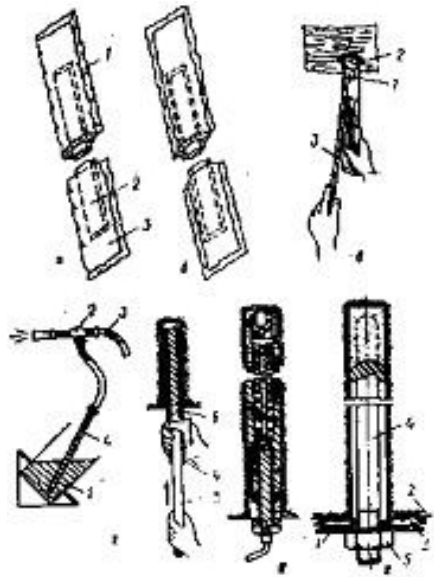


Рисунок 1.10 - Конструкція ампул і способи впливу армополімерних анкерів, розроблених в США

Таким чином, армополімерне кріплення застосовується в ряді розвинених країн – Франції, Англії, США, Німеччині. Розроблено різні склади, які міцно закріплюють армуючі стержні у свердловинах, в тому числі склади, виготовлені з деревини. У вітчизняній гірничій практиці дане кріплення може знайти більш широке застосування при анкеруванні тріщинуватих гірських порід, а також тектонічно порушених ділянок з подачею розчину смоли під тиском для заповнення тріщин.

Основні галузі ефективного застосування хімічного армування порід:

- сталевими анкерами – зміцнення сухих шаруватих порід, зруйнованих тріщинами на блоки розміром 10-50 см;
- склопластиковими анкерами – зміцнення вугільних ціликів і стелин потужних пластів, для боротьби з обдиманням ґрунту;
- дерев'яними анкерами – зміцнення верхньої частини потужних пологих пластів для боротьби з віджиманням і кліважем.

Застосовуваний для зміцнення порід в очисних вибоях спосіб хімічного анкерування дозволяє істотно знизити втрати видобутку і скоротити простой механізованих комплексів у складних гірничо-геологічних умовах.

Аналіз стану вугільного масиву після проходження комбайну показав,

що основною причиною обвалення нестійкого вугільного масиву є руйнування безпосередньої покрівлі по тріщинах тиску, які перетинають всю покрівлю паралельно лінії вибою.

У сформованих гірничо-геологічних умовах найбільш перспективним є підтримка помилкової покрівлі за рахунок створення стійкої підпокрівельної пачки і запобігання віджиму вугілля у лаву за допомогою хімічного анкерування на основі фуріловоформальдегідних смол виробництва Ферганського заводу Узбекистану.

Технологія хімічного анкерування передбачала установку дерев'яних анкерів розміром $30 \times 30 \times 1800$ мм, які закріплювали по всій довжині хімічним складом на основі смоли ФФ-1Ф і кислотного затверджувача. Буріння шпурів під анкери проводили по вугіллю з інтервалом 1-1,5 на відстані 0,6-0,8 м від границі порода-вугілля, під кутом $10-15^\circ$ щодо площині пласта.

При проходженні комбайну частина дерев'яного анкера зрізається, а підпокрівельна пачка і помилкова покрівля пласта не обвалюються, стійко підтримуються частиною анкеру що залишилася на всьому протязі закріпленої за ним ділянки. Анкерування проводили у два ряди в шаховому порядку з інтервалом в 1 м між рядами і 1-1,5 м між анкерами.

Площа поперечного перерізу анкера визначалася з умови адгезійної міцності закріпленого стержня при наявності деформацій розтягу та зсуву.

Попередні лабораторні дослідження адгезійної здатності застосовуваного хімічного складу на основі смоли ФФ-1Ф показали, що властивості міцності затверділого складу досягають свого максимального значення 18 МПа.

Важливою характеристикою складу є здатність твердіти у присутності вологи, що дозволяє широко застосовувати цей тип закріплювача у вологих масивах.

Мінімальні витрати праці і часу необхідні на установку анкерів, а також високі властивості міцності закріплювача на основі смоли ФФ-1Ф, що випускається Ферганським заводом фуранових з'єднань, дозволяють

рекомендувати хімічне анкерування як найбільш вживаний спосіб зміцнення вугільного масиву при інтенсивному віджиманні вугілля.

Виходячи з досвіду і практики, можна стверджувати, що область і обсяги хімічного анкерування порід і вугілля на шахтах і рудниках будуть безперервно зростати. Крім того, важливими областями підземних робіт, які вимагають застосування хімічного зміцнення вміщуючих порід, є:

- зони порушень у лавах, зміцнення тектонічно порушених породних шарів;
- вугільні укosi при комбайновому вийманні на потужних пластах;
- зруйновані шари покрівлі, зміцнення яких сприяє підтримці покрівлі лав, кріпленням без попередньої виїмки вугілля вручну.

2. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Метою лабораторних досліджень є визначення в'язкості руйнування зразків пісковику при руйнуючих напруженнях зсуву з стисканням.

2.1. Методи лабораторного дослідження руйнуючих напружень при зсуві з стисненням

Показник міцності на зрушення (тимчасовий опір зрушенню), також як і межа міцності на стиск, широко застосовується для оцінки опірності гірських порід і вугілля руйнуванню, зокрема при визначенні опірності руйнуванню різальним інструментом [10].

Тимчасовий опір зрушенню зазвичай визначається при випробуванні зразків гірських порід на зріз, випробування зразків на крутіння не набуло поширення.

Для визначення тимчасового опору зрушенню випробуванням зразків на зріз із стисненням у ВВугГІ запропонований прилад (рис. 2.1) [11], який є деякою видозміною приладу, описаного Г.Л. Фісенко [12].

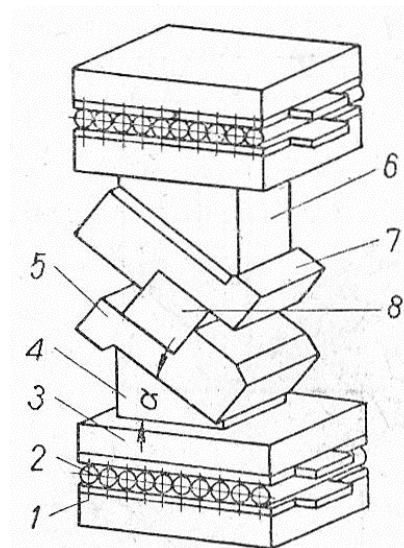


Рисунок 2.1 – Прилад ВВугГІ для одиночного зрізу: 1 - тонка шліфувана пластинка; 2 - роликові катки; 3 - шліфувана плитка; 4 і 6 - клини; 5 і 7 - г-образні плити; 8 - зразок.

Наявність в комплекті приладу трьох пар металевих клинів з кутами

нахилу 20° , 30° і 40° і пари клинових металевих прокладок з кутом 5° дозволяє встановлювати зразок при випробуваннях під кутами від 20° до 70° з інтервалами через 5° . Для зменшення тертя при випробуваннях в приладі застосовані дві пари металевих не шліфованих плит (розміром 170×210 мм), між якими міститься по 13 катків (сталь У7) діаметром 14 мм і довжиною 140 мм. Наявність між плитами і катками додаткових плит (сталь Ст. 5), а також рясне змащення катків і плит під час випробувань зводять вплив тертя до мінімуму.

Граничні нормальні σ_{np} і дотичні τ_{np} напруження, що діють в площині зсуву, обчислюють за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{np} &= \frac{P}{F} (\cos \alpha + f_k \sin \alpha) \\ \tau_{np} &= \frac{P}{F} (\sin \alpha - f_k \cos \alpha) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де P – зусилля, що розвивається пресом, кН;

F – площа поверхні сколювання зразка, м^2 ;

α – кут установки зразка;

f_k – коефіцієнт тертя кочення при наявності катків або коефіцієнт тертя спокою при відсутності катків і мастила.

Повне напруження σ_o , діє на площину зрізу, визначається формулою

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{np}^2 + \tau_{np}^2} = \frac{P}{F} \sqrt{1 + f_k^2}. \quad (2.2)$$

Коэффициент трения вычисляется из соотношения

$$f_k = \frac{f_1 + f_2}{n \cdot d} \quad (2.3)$$

де f_1 і f_2 – коефіцієнти тертя кочення відповідно між плитою преса і катком і між катком і приладом;

n – число катків;

d – діаметр катків, мм.

У разі, коли катки, плити і прилад зроблені зі сталі, можна прийняти

$f_1 = f_2 = 0,5$, і формула для визначення коефіцієнта тертя має вигляд:

$$f_k = \frac{1}{n \cdot d}$$
 Для сухих поверхонь і тертя стали по сталі без катків коефіцієнт тертя $f_k = 0,15$.

Описаний прилад дозволяє виконати випробування на зріз на зразках, виготовлених із кернів. Для цього зрізують бічні стінки керна. Висота зразка повинна бути дорівнювати відстані між отриманими паралельними бічними площинами.

Дещо видозмінений прилад (рис. 2.2) для визначення тимчасового опору зрушенню копалин вугілля застосовується в методиці, розробленій в ІГД АН [13]. Відмінність цього приладу від приладу, що застосовується у ВНІМІ [3] для визначення тимчасового опору зрушенню гірських порід, полягає в тому, що в цьому приладі для зменшення опору горизонтальному зсуву матриць і забезпечення правильного напрямку стискаючої сили, навантаження передається через довгий стержень з кульками.

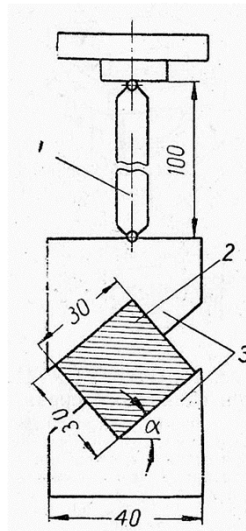


Рисунок 2.2 – Схема випробувань вугільних зразків на одиничний зріз із стисненням за методом ІГД АН: 1 - стержень; 2 - зразок; 3 - матриці.

Дослідження виконуються на кубічних зразках з довжиною ребра 3 см. Зразки вирізаються з вугілля тонким наждаковим диском і піддаються шліфуванню (в дослідях ВНІМІ застосовувалися зразки породи розміром

10×10×15 см). Випробування зразків з одного і того ж вугілля при різних кутах (в даному випадку $\alpha_1 = 40^\circ$ і $\alpha_2 = 60^\circ$) нахилу матриці дозволяє побудувати паспорт міцності даного вугілля, а також визначити коефіцієнт внутрішнього тертя μ і граничного опору зсуву τ_{np} за формулами:

$$\mu = \frac{q_1 \sin \alpha_1 - q_2 \sin \alpha_2}{q_1 \cos \alpha_1 - q_2 \cos \alpha_2}, \quad (2.4)$$

$$\tau_{np} = \frac{q_1 q_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{q_1 \cos \alpha_1 - q_2 \cos \alpha_2}, \quad (2.5)$$

У цих формулах

$$q_1 = \frac{P_1}{F_1} \text{ та } q_2 = \frac{P_2}{F_2}$$

де P_1 і P_2 – руйнівні навантаження, відповідно при кутах нахилу матриць α_1 і α_2 , Н;

F_1 і F_2 – відповідні площі зрізу при тих же кутах нахилу, м².

Визначення показників μ і τ_{np} може бути виконано також на кернах, вибурених зі шматків вугілля [2]. Керни діаметром 30 мм в спеціальних матрицях випробовуються на зрушення як по торцю (рис. 2.3, а), так і по утворюючій (рис. 2.3, б). Трудомісткість робіт при випробуванні за даною методикою значно знижується.

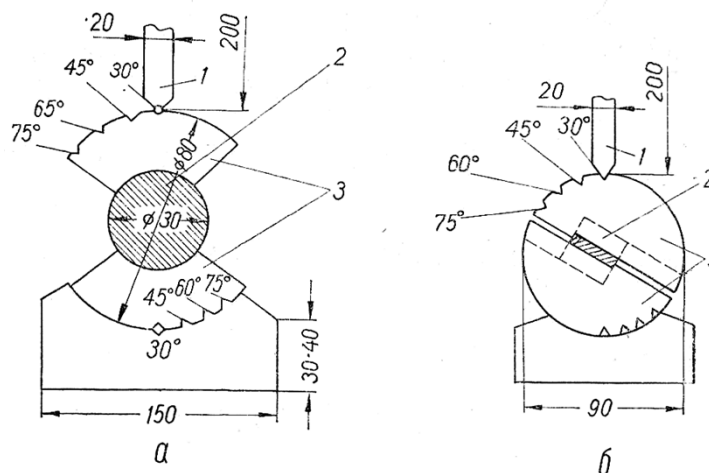


Рисунок 2.3 - Схема випробувань на одиночний зріз із стисненням зразків з керна: 1 - стержень; 2 - зразок, 3 - матриці.

Методика випробування на зсув із стиснення і розрив зразків довільної форми запропонована лабораторією руйнування вугілля і порід ВВугГІ [14, 15].

Досліджувані зразки породи або вугілля, орієнтовані потрібним чином (по простяганню, по падінню або нашаруванню), зміцнюють в бетонних блоках розміром $200 \times 200 \times 200$ мм (рис. 2.4, а), між якими під час заливки зберігають за допомогою картонних прокладок зазор Δ .

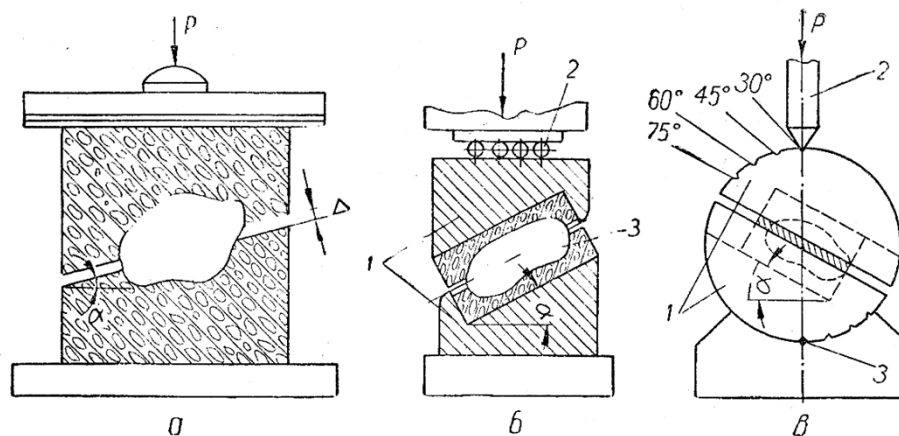


Рисунок 2.4 – Визначення механічних характеристик гірських порід на зразках неправильної форми:

а – схема випробувань ВВугГІ;

б – схема приладу Фісенко Г.Л., 1 - матриці; 2 - ролики; 3 зразок;

в – схема приладу Ільницької Є.І., 1 - матриці; 2 - стержень; 3 - вкладиш.

Перед випробуванням видаляють картонні прокладки, потім піддають зразки відповідному навантаженню – на зрушення із стисненням або розрив. Під час випробувань фіксують зусилля P_p , при якому сталося руйнування (зрушення або розрив), потім після руйнування за допомогою планіметрирования визначають площу поверхні руйнування.

За отриманими під час дослідів даними визначають граничні напруження в момент руйнування за формулами

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{np} &= \frac{P_p \cos \alpha}{F_{yc}} \\ \tau_{np} &= \frac{P_p \sin \alpha}{F_{yc}} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

де σ_{np} – граничні нормальні напруження в площині руйнування;

τ_{np} – граничні дотичні напруження в площині руйнування;

F_{yc} – проекція площі поверхні руйнування на площину роз'єму цементних блоків.

При випробуваннях на зрушення (рис. 2.4) кут площини роз'єму блоків α може змінюватися в широких межах, що забезпечує можливість проведення випробувань при різних співвідношеннях нормальних і дотичних напружень, що виникають в площині руйнування.

Під час випробувань зразків на розрив кут α нахилу площини роз'єму блоків приймається рівним нулю, і тоді напруження розриву визначається за формулою

$$R_{расп} = \frac{P_p}{F} \quad (2.7)$$

Проведені ВВугГІ [14] досліді з визначення механічних характеристик вугілля методом випробування необроблених зразків на розрив і зрушення показали хороший збіг отриманих результатів з даними випробувань зразків правильної форми.

Для визначення показників міцності гірських порід σ_{np} і τ_{np} при випробуванні зразків неправильної форми на зрушення із стисненням можуть бути використані прилади, запропоновані Г.Л. Фісенко (рис. 2.4, б) [12], Є.І. Ільницькою (рис. 2.4, в) [13, 16], а також прилад ВвугГІ (рис. 2.1).

При випробуваннях на цих приладах виготовляється потрібна (стандартних) розмірів формочка з двох половин. Будь-яка половина формочки заливається розчином цементу високої марки і в неї вкладається зразок породи довільної форми, так щоб задана орієнтована площина зсуву

збіглася з поверхнею цементного розчину у півформі. Після того як цемент схопився, на його поверхню накладають шар тонкого паперу з вирізом для пропуску частини зразка.

Потім друга півформа заливається також цементом і накладається на першу, так щоб краї їх збігалися, а виступаюча частина зразка занурилася в цемент, що заповнює другу півформу. Виготовлені таким чином зразки витримуються до тих пір, поки розчин набуває встановленої для нього міцності, і потім піддаються випробуванню на зрушення із стисненням звичайним способом. Показники σ_{np} і τ_{np} визначаються за вищенаведеними формулами (2.6); площа зсуву - планіметрированием.

2.2. Лабораторні дослідження руйнуючих напружень при зсуві з стисненням

Підготовка зразків гірської породи для лабораторних досліджень.

Із зразків пісковика неправильної форми за допомогою верстата для різання каменю (рис. 2.5) були підготовлені зразки кубічної форми розміром 50×50×50 мм.

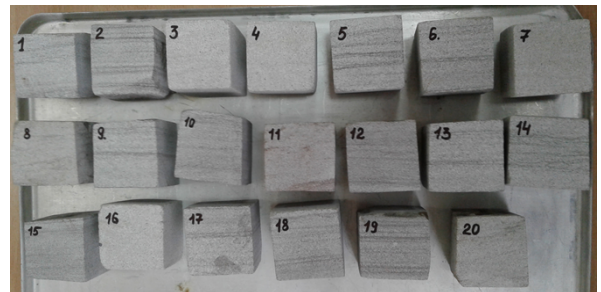


Рисунок 2.5 – Каменерізний верстат і підготовлені зразки пісковика кубічної форми.

Висушування зразків проводилося за допомогою сушильної шафи при температурі 115–120°C, а остигання зразків здійснювалося в ексикаторі з додавання хлористого калію (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Сушильна шафа з термометром і ексикатор

Усі зразки були зважені на електронних вагах ФЕН ДНЕПРОВЕС® (рис. 2.7, а) з точністю 0,01 гр. Виміри геометричних параметрів зразків проводилися електронним штангенциркулем (рис. 2.7, б) з точністю до 0,01 мм.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Електронні ваги Фен ДНЕПРОВЕС® (а), Електронний штангенциркуль (б)

У якості установки випробування використовувався гідравлічний прес П-50 (рис. 2.8), з максимальним зусиллям 50 тонн.



Рисунок 2.8 – Гідравлічний прес П-50 з максимальним зусиллям 50 тонн

Для реалізації експерименту «зсув з стисненням» були виготовлені окремо металеві матриці з кутом нахилу 15° , 30° та 45° (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Металеві матриці з кутом нахилу 15° , 30° та 45° .

До експерименту були вибрані 3-и зразки пісковику: №19 з кутом нахилу матриць – 15° , №2 з кутом нахилу матриць – 30° , і №18 з кутом нахилу матриць – 45° . Виконання експерименту фіксувалося на фото і відео спостереження. Були отримані максимальні руйнуючі навантаження (табл. 2.1).

Граничні нормальні σ_{np} і дотичні τ_{np} напруження, що діють в площині зсуву, обчислюють за формулами (2.1):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{np} &= \frac{P}{F} (\cos \alpha + f_k \sin \alpha) \\ \tau_{np} &= \frac{P}{F} (\sin \alpha - f_k \cos \alpha) \end{aligned} \right\},$$

де P – зусилля, що розвивається пресом, кН;

F – площа поверхні сколювання зразка, м^2 ;

α – кут установки зразка;

f_k – коефіцієнт тертя кочення при наявності катків або коефіцієнт тертя спокою при відсутності катків і мастила $f_k=0,15$.

Таблиця 2.1 –

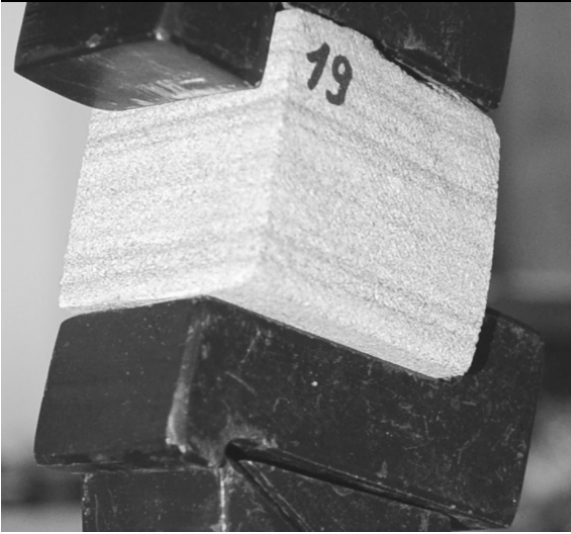
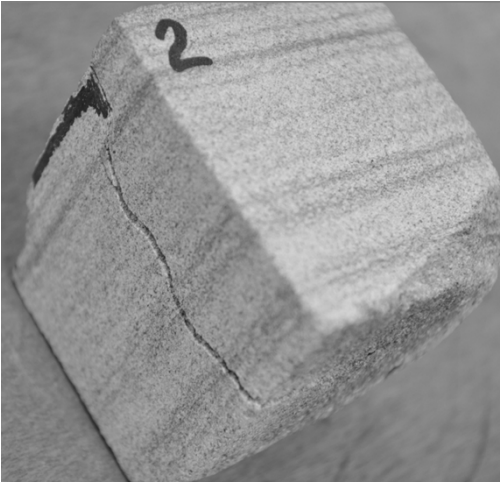
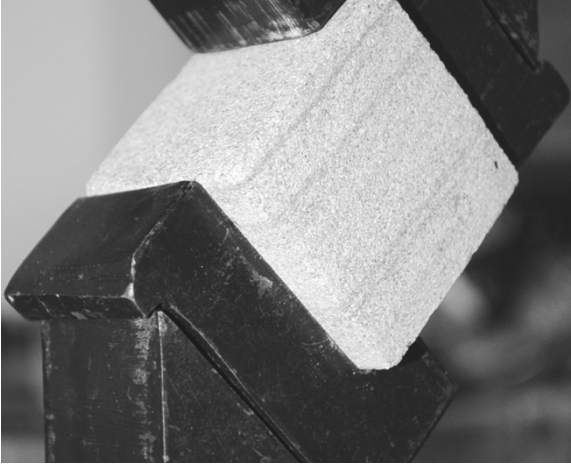
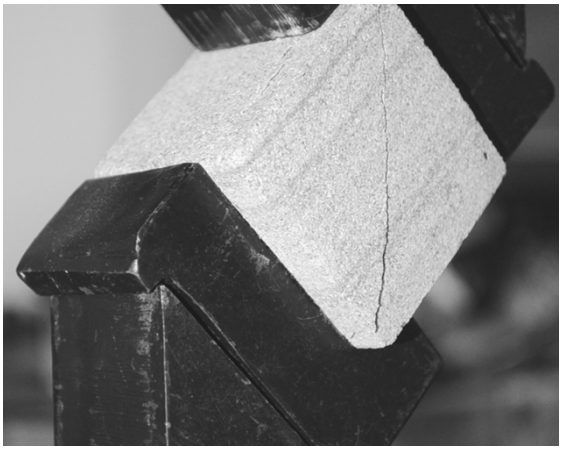
Результати граничних нормальних σ_{np} і дотичних τ_{np} напружень

№ зразка	Кут нахилу $\alpha, ^\circ$	Максимальне навантаження P , кН	Граничні нормальні напруження σ_{np} , МПа	Граничні дотичні напруження τ_{np} , МПа
19	15	46,65	19,76	2,24
2	30	34,99	13,85	5,45
18	45	37,16	12,14	8,97

Процес руйнування зразків пісковику при випробуванні на зсув з стисненням за різним кутом нахилу металевих матриць відображено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 –

Руйнування зразків пісковику при випробуванні на зсув з стисненням

Кут нахилу	Зразок перед випробуванням	Зразок після випробування
15°	 A photograph of a light-colored, rectangular sandstone sample labeled '19' in black ink. The sample is positioned between two dark, metallic-looking loading blocks. The sample appears intact and is slightly tilted.	 A photograph of the same sandstone sample '19' after a shear test. A distinct vertical crack is visible on the right side of the sample, indicating failure.
30°	 A photograph of a light-colored, rectangular sandstone sample labeled '2' in black ink. The sample is held between dark loading blocks at a 30-degree angle. It appears intact.	 A photograph of the same sandstone sample '2' after a shear test. A diagonal crack is visible on the front face, indicating failure.
45°	 A photograph of a light-colored, rectangular sandstone sample held between dark loading blocks at a 45-degree angle. The sample appears intact.	 A photograph of the same sandstone sample after a shear test. A vertical crack is visible on the right side, indicating failure.

Зі збільшенням кута нахилу зразка при випробуванні маємо тенденцію зменшення нормальних руйнуючих напружень (рис. 2.10)

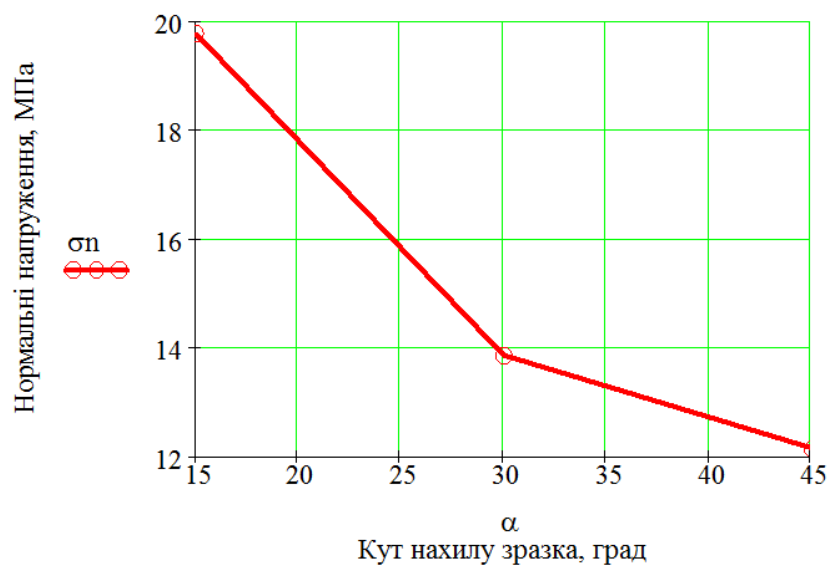


Рисунок 2.10 – Залежність нормальних напружень від кута нахилу зразка

Зі збільшенням кута нахилу зразка при випробуванні маємо тенденцію лінійного зростання дотичних руйнуючих напружень (рис. 2.11).

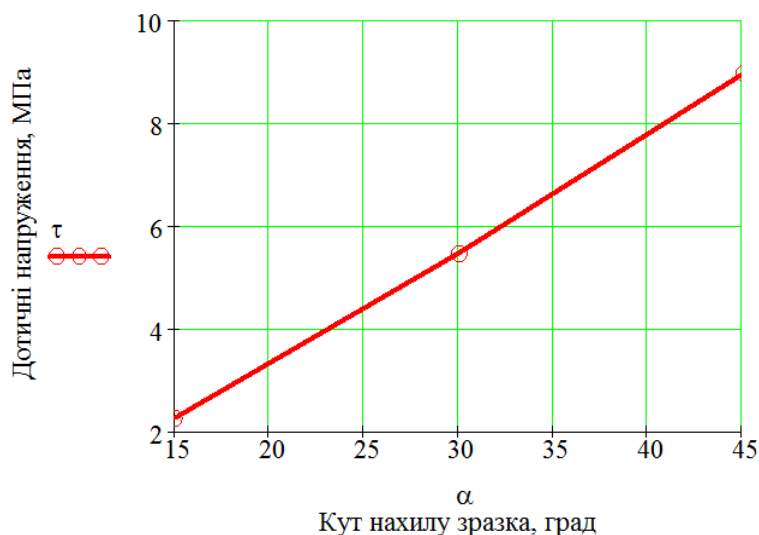


Рисунок 2.11 – Залежність дотичних напружень від кута нахилу зразка

От же зміна кута нахилу зразка змінює долю участі руйнуючих напружень –перетворюючи стискаючи напруження у дотичні і навпаки (рис. 2.12)

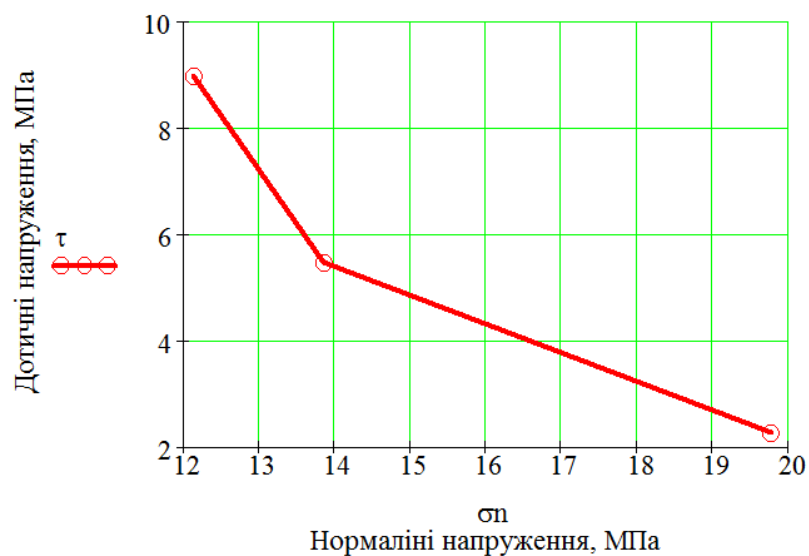


Рисунок 2.12 – Залежність дотичних від нормальних напружень

Лабораторними дослідженнями було встановлено, що при руйнуванні пісковика на стискання з зсувом, зі збільшенням стискаючих напружень зменшуються дотичні напруження і, навпаки, чим менше стискаючі напруження тим більше дотичні напруження.

2.3. Визначення критерію руйнування порід з урахуванням їх тріщиностійкості

Визначимо в'язкість руйнування зразків пісковику при руйнуючих напруженнях зсуву з стисканням. Для цього знайдемо ефективний коефіцієнт інтенсивності напруження по формулі [17]:

$$K_{ef} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}, \text{ МПа} \sqrt{м} \quad (2.8)$$

де K_I і K_{II} – коефіцієнти інтенсивності напруження по схемам відриву і зсуву відповідно.

Знайдемо коефіцієнти інтенсивності напруження при знайдених максимальних нормальних і дотичних напруженнях:

$$\begin{cases} K_I = \sigma_{np} \sqrt{\pi \cdot l} \\ K_{II} = \tau_{np} \sqrt{\pi \cdot l} \end{cases}, \text{ МПа} \sqrt{м} \quad (2.9)$$

де σ_{np} , τ_{np} – граничні нормальні і дотичні напруження, МПа;

l – довжина тріщини, м.

Результати розрахунку запишемо до таблиці 2.3.

№ зразку	Граничні нормальні напруження σ_{np} , МПа	Граничні дотичні напруження τ_{np} , МПа	Коефіцієнти інтенсивності напруження по схемі відриву K_I , МПа $\sqrt{м}$	Коефіцієнти інтенсивності напруження по схемі зсуву K_{II} , МПа $\sqrt{м}$	Ефективний коефіцієнт інтенсивності напруження K_{ef} , МПа $\sqrt{м}$
19	19,76	2,24	2,477	0,281	2,493
2	13,85	5,45	1,736	0,683	1,865
18	12,14	8,97	1,521	1,124	1,891
середнє			1,911	0,696	2,083

Отриманий ефективний коефіцієнт інтенсивності напруження K_{ef} уявляє собою в'язкість руйнування пісковику на площадці руйнування при дії нормальних та дотичних напруженнях. У цьому випадку можемо записати критерій руйнування порід у масиві:

$$K_{d.ef} \leq K_{ef} \quad (2.10)$$

де $K_{d.ef}$ – діючий ефективний коефіцієнт інтенсивності напруження.

3. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАВКОЛО ОЧИСНИХ ВИРОБОК

Метою чисельного дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо очисних виробок є визначення послідовності обвалення шарів покрівлі.

3.1. Математична модель напружено-деформованого стану масиву що підробляється

Згідно з даними геологічного розрізу гірський масив уявляється у вигляді шаруватої структури різноманітних типів порід різної потужності.

Відомо, що при веденні очисних робіт відбувається зрушення гірського масиву над виробленим простором. В результаті відбувається зміна напружено-деформованого стану породних шарів, пов'язаного з посуванням очисного вибою і відповідно зі збільшенням виробленого простору. Крім того, на перерозподіл напружено-деформованого стану впливають як обвалені, так і породні шари які зависли. Взаємодія породних шарів супроводжується розшаруванням, групуванням і обваленням порід покрівлі.

Як відбувається перерозподіл напружень в породах покрівлі над очисним забоєм в результаті їх обвалення можна з'ясувати, використовуючи фізико-механічну модель шаруватого гірського масиву.

Математично плоско-напружений стан гірничого масиву (рис. 3.1) можна описати таким чином [18, 19]:

умови рівноваги, описуються виразами:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \rho \cdot g &= 0,\end{aligned}\tag{3.1}$$

де ρ – щільність речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – прискорення вільного падіння m/c^2 ;

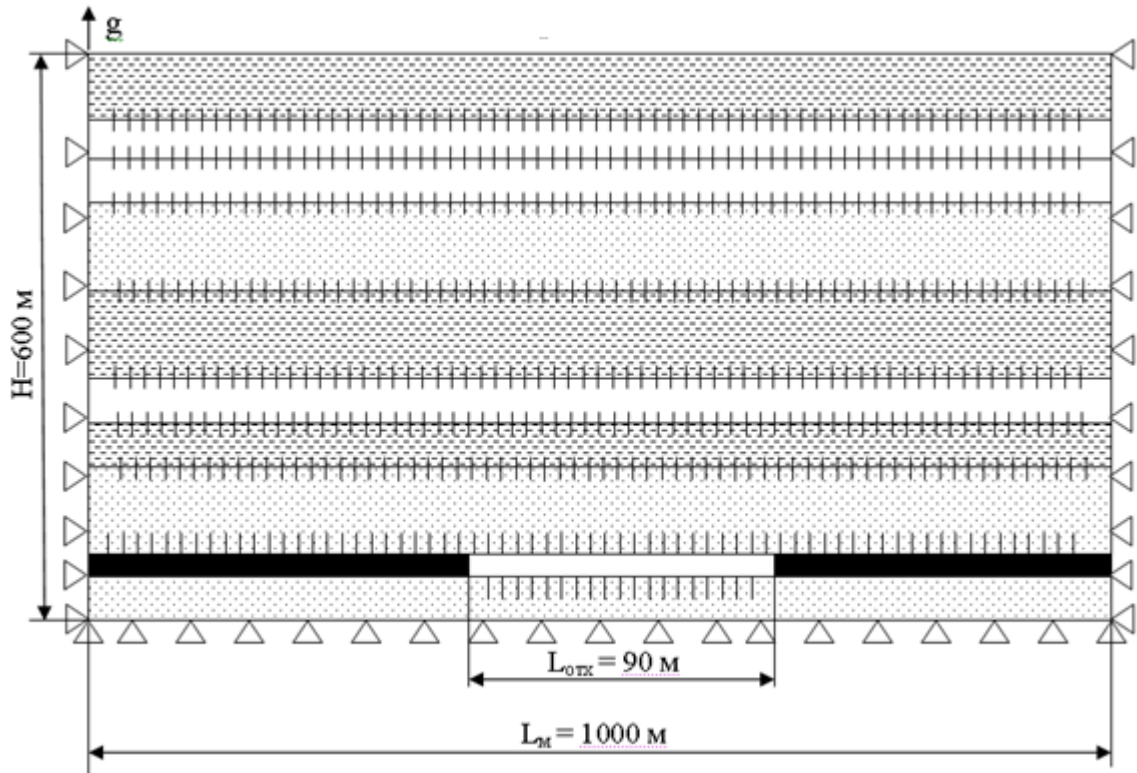


Рисунок 3.1 – Фізико-механічна модель шаруватого гірського масиву.

Рівняння нерозривності деформацій, які відображають те, що в процесі деформацій суцільність середовища не порушується:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (3.2)$$

Співвідношення між деформаціями і зсувами:

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

Основна і обов'язкова умова справедливості цих рівнянь – це суцільність або нерозривність середовища, як до початку деформації, так і в процесі деформації.

Додаткові рівняння, що зв'язують деформації з напруженням, що відображають фізичні особливості розвитку деформацій для ізотропного

середовища (узагальнений закон Гука):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \bar{\mu} \cdot \sigma_y] & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \bar{\mu} \cdot \sigma_x] \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$$\text{де } \bar{E} = \frac{E}{1 - \mu^2}, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad \bar{G} = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Математичне моделювання відшарування і взаємодії шарів вимагає опису граничних умов контакту між шарами (рис. 3.2).

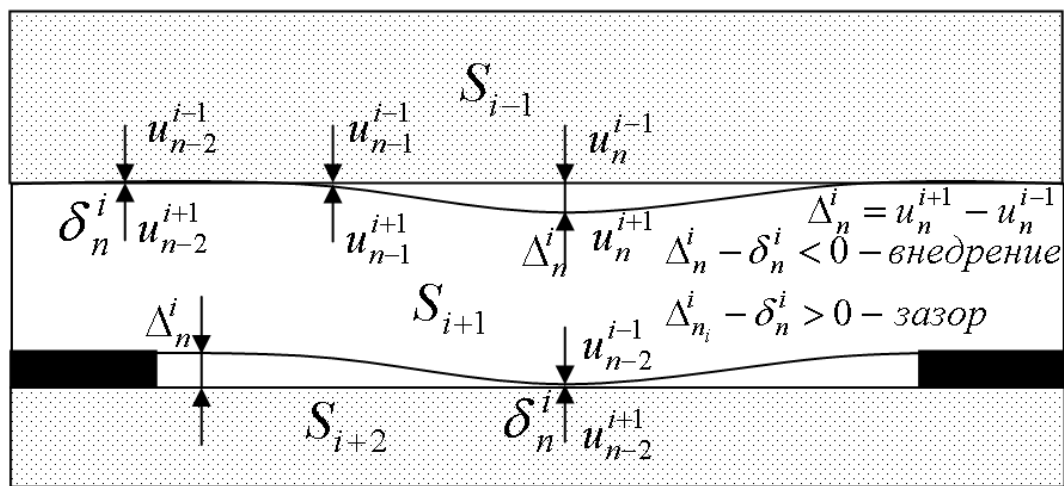


Рисунок 3.2 – Граничні умови контакту між шарами.

Граничні умови для точок, що лежать на лінії розділу контактуючих абл. пластей не можуть бути заздалегідь задані, так як формуються в процесі вирішення, і описуються нерівностями [20]:

$$u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i \leq 0; \quad \sigma_n^i \leq 0; \quad (u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i) \sigma_n^i \leq 0, \quad (3.4)$$

де u_n^{i-1} , u_n^{i+1} и δ_n^i – переміщення точок абл. пластей S_{i-1} , S_{i+1} і початковий зазор (натяг) у напрямку позитивних нормалей контактуючих ділянок, нахил яких збігається з напрямком загальної нормалі n ;
 σ_n^i – напруження взаємодії тіл у напрямку нормалі n .

Умови фрикційної взаємодії на точках контакту приймаються у формі закону Кулона. При цьому нормальні σ_n^i і дотичні τ_n^i напруження

підпорядковані співвідношенню [11]:

$$|\tau_n^i| \leq f_{mp} \sigma_n^i, \quad (3.5)$$

де f_{mp} – коефіцієнт сухого тертя.

Співвідношення (3.5) виконується за рахунок проковзування контактуючих поверхонь відносно один одного, стримуються фрикційними дотичними напруженнями.

Граничні умови на кордонах моделі [18, 19]:

геометричні умови

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad (3.6)$$

статичні умови $M_x = 0, \quad M_y = 0$ або

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0, \quad (3.7)$$

де u_x, u_y – переміщення точок поверхні у напрямку осей x, y ;

M_x, M_y – згинальні моменти точок поверхні у напрямку осей x і y , H/m .

З метою визначення моменту початку обвалу породних шарів для першого наближення, скористаємося критерієм граничного стану Кулона-Мора для плоско-напруженого стану [19].

4. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану масиву що підроблюється

Чисельні дослідження напружено-деформованого стану породного масиву виконаємо по 1 північній лаві блоку № 3 ПАТ ШУ «Покровська», використовуючи дані геологічного розрізу геологорозвідувальної свердловини № 3393 (□абл.. 3.1).

Таблиця 3.1 –

Характеристики міцності порід покрівлі.

№	Порода	Потужність шару, h_i , м	Глибина залягання H , м	Характеристики міцності	
				σ_c , Мпа	σ_p , Мпа
1	Пісковик	15,1	567.20	80,8	8,6
2	Сланець піщаний	5,1	552.10	43,2	6,1
3	Сланець піщаний	7,1	547.00	43,2	6,1
4	Пісковик	4,9	539.90	80,8	8,6
5	Пісковик	7,5	535.00	80,8	8,6
6	Пісковик	3,6	527.50	80,8	8,6
7	Пісковик	12,35	523.90	80,8	8,6
8	Сланець глинистий	13,05	511.55	34,3	5,1
9	Сланець піщаний	26,9	498.50	43,2	6,1

Згідно шахтної документації (актів обвалення основної покрівлі) – відомо, що на даній ділянці первинна посадка основної покрівлі становить 91 м, періодичні посадки складають 10-15 м.

Простежимо, які шари беруть участь у обваленні при первинній посадці основної покрівлі. Задаємо модель у вигляді шаруватого масиву, з граничними умовами контакту між шарами. Відхід лави задамо 90 м і визначимо, які породні шари обрушаться при даному відході. Виконавши аналітичний розрахунок напружень з використанням програмних комплексів ANSYS і Mathcad [21, 22], і встановивши області що мають перевищення граничного стану (критичні області), згідно з фізичними властивостями гірських порід, визначаємо породні шари, які обвалюються на даний момент (рис. 3.3).

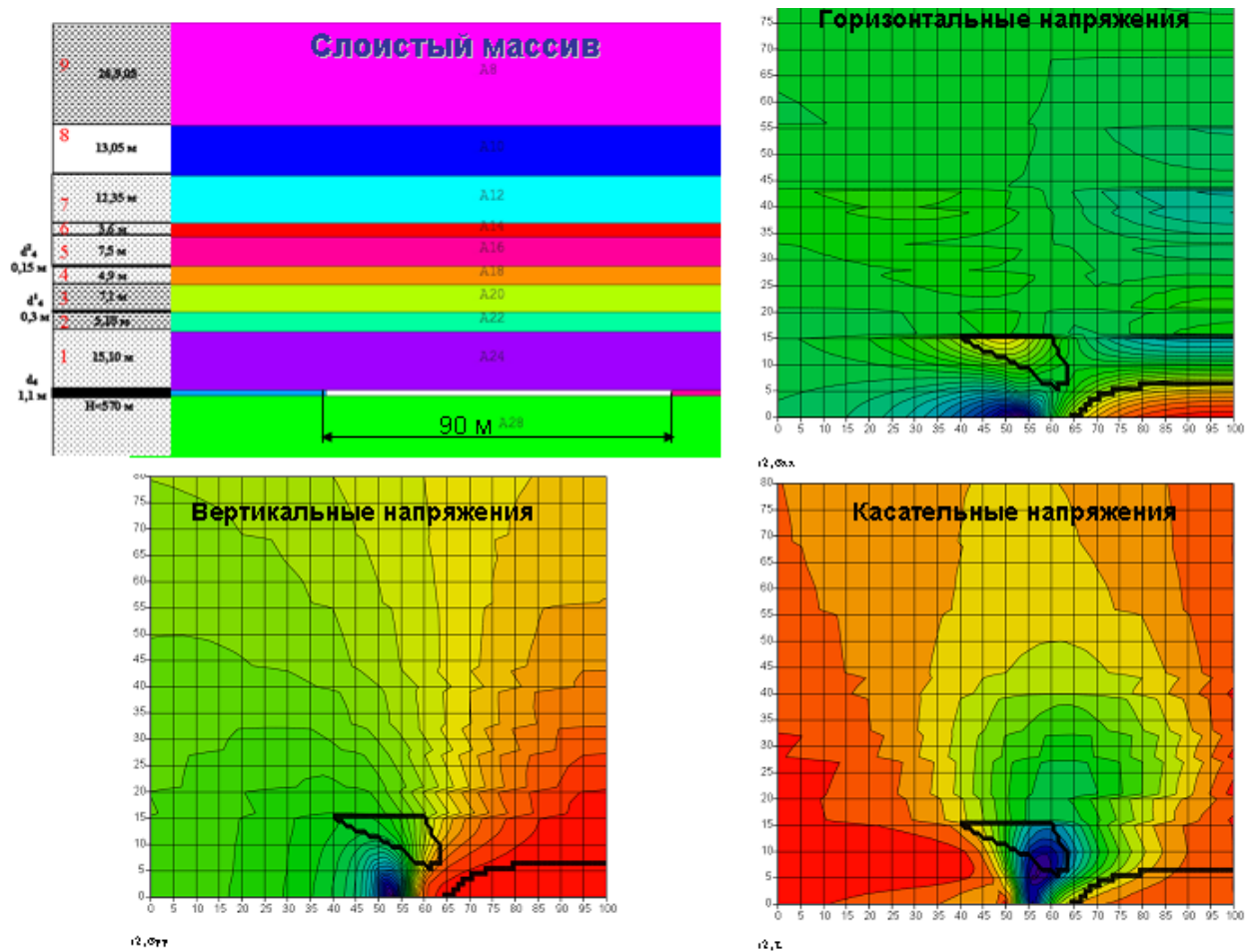


Рисунок 3.3 – Стан основної покрівлі до первинної посадки.

Відповідно до рисунку 3.3 встановлено, що обрушується породний шар основної покрівлі, який є пісковиком, потужністю 15,1 м. При цьому основними руйнівними напруженнями є максимальні розтягувальні горизонтальні напруження у верхній і нижній частині породного шару.

У подальших розрахунках цей породний шар виключаємо з моделі, так як після обвалення він вже не буде впливати на напружений стан порід покрівлі навколо очисного вибою. Обвалення моделюємо, згідно зі встановленим кутом обвалення гірських порід рівним 75° . Після обвалення основної покрівлі, необхідно заново визначити напруження в моделі і встановити області, що перевищують граничнодопустимі напруження (рис. 3.4).

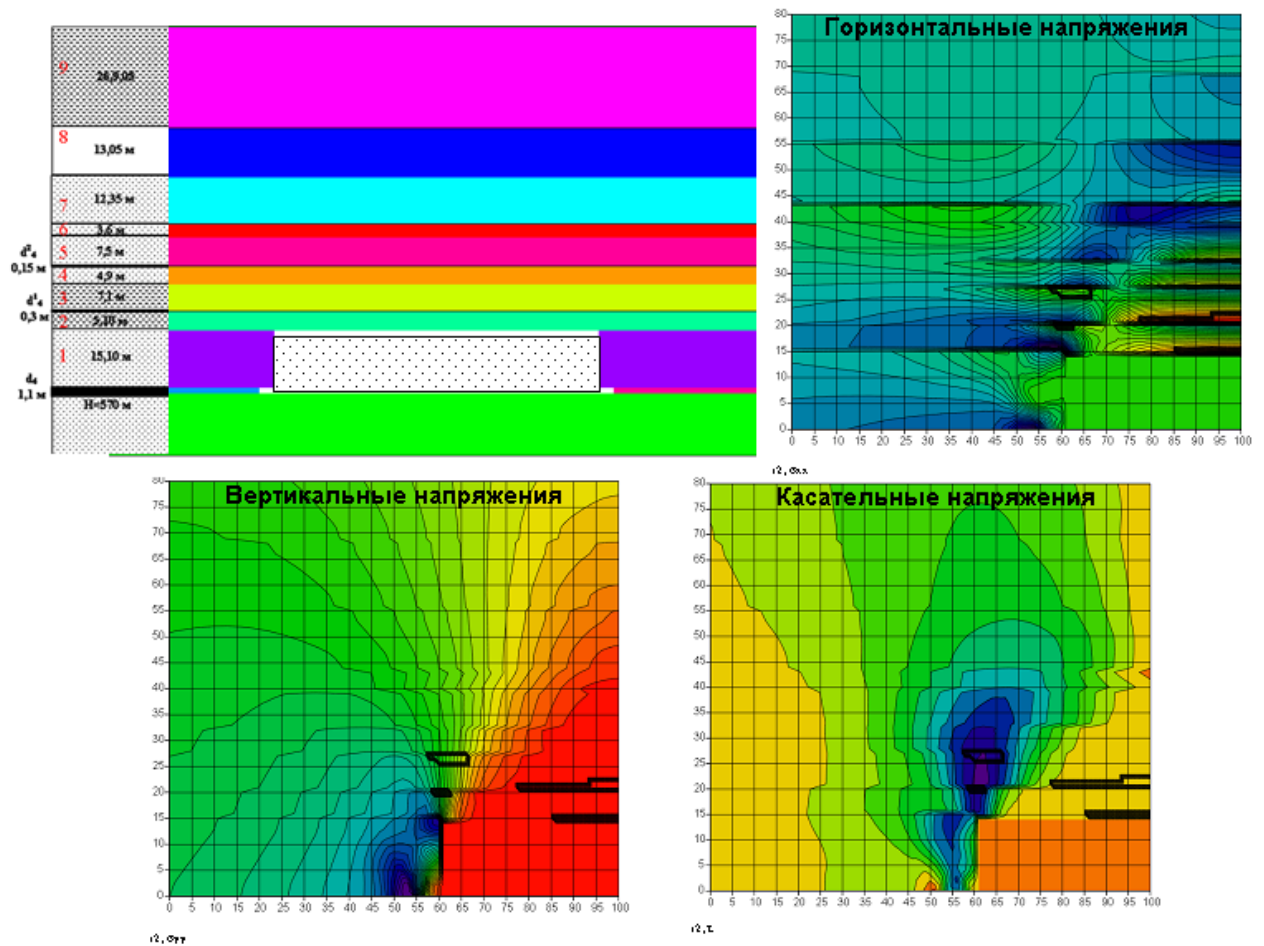


Рисунок 3.4 – Стан основної покрівлі після обвалення потужного пісковика.

Після обвалення маємо області, що перевищують граничний стан у верхніх породних шарах (сланці піщані потужністю 5,1 м і 7,1 м). Очевидно, що до обвалення нижче розташованого пісковика основної покрівлі в цих породних шарах були відсутні критичні області напружень. Це пояснюється тим, що втративши опору нижчого шару, породні шари збільшили свій прогин і тим самим збільшилися діючі в них горизонтальні напруження. Вважаємо, що сталося обвалення цих породних шарів. При перерахунку напружень встановлюємо, що критичні області відсутні, так як система прийшла у стабільний стан і обвалення породних шарів вже не спостерігається.

Таким чином, маємо подібне склепіння обвалення породних шарів на момент первинної посадки основної покрівлі (рис. 3.5).

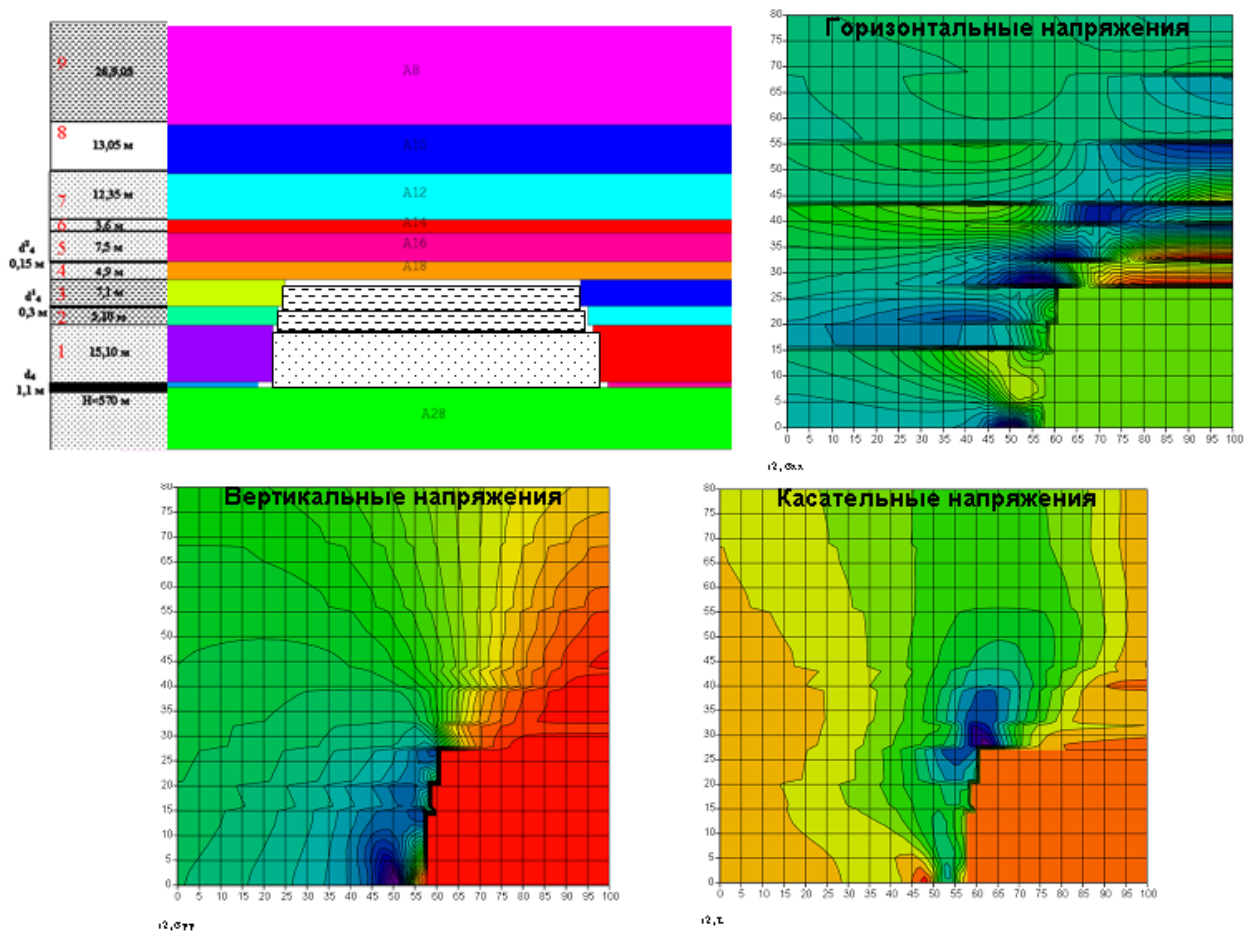


Рисунок 3.5 – Стан основної покрівлі після первинної посадки.

На даному етапі ми встановили крок первинної посадки і кількість породних шарів, які беруть участь у обваленні.

Визначимо періодичні посадки основної покрівлі. Моделюємо відхід лави ще на 10 м (рис. 3.6). Обчисливши напруження, встановлюємо критичні області. На основну покрівлю пласта діє вага відшарованих породних шарів, що формують склепіння зрушення гірського масиву. Створюється додаткове навантаження з боку верхніх породних шарів. Утворюються критичні горизонтальні розтягувальні напруження, в результаті яких відбувається обвалення (рис. 3.7).

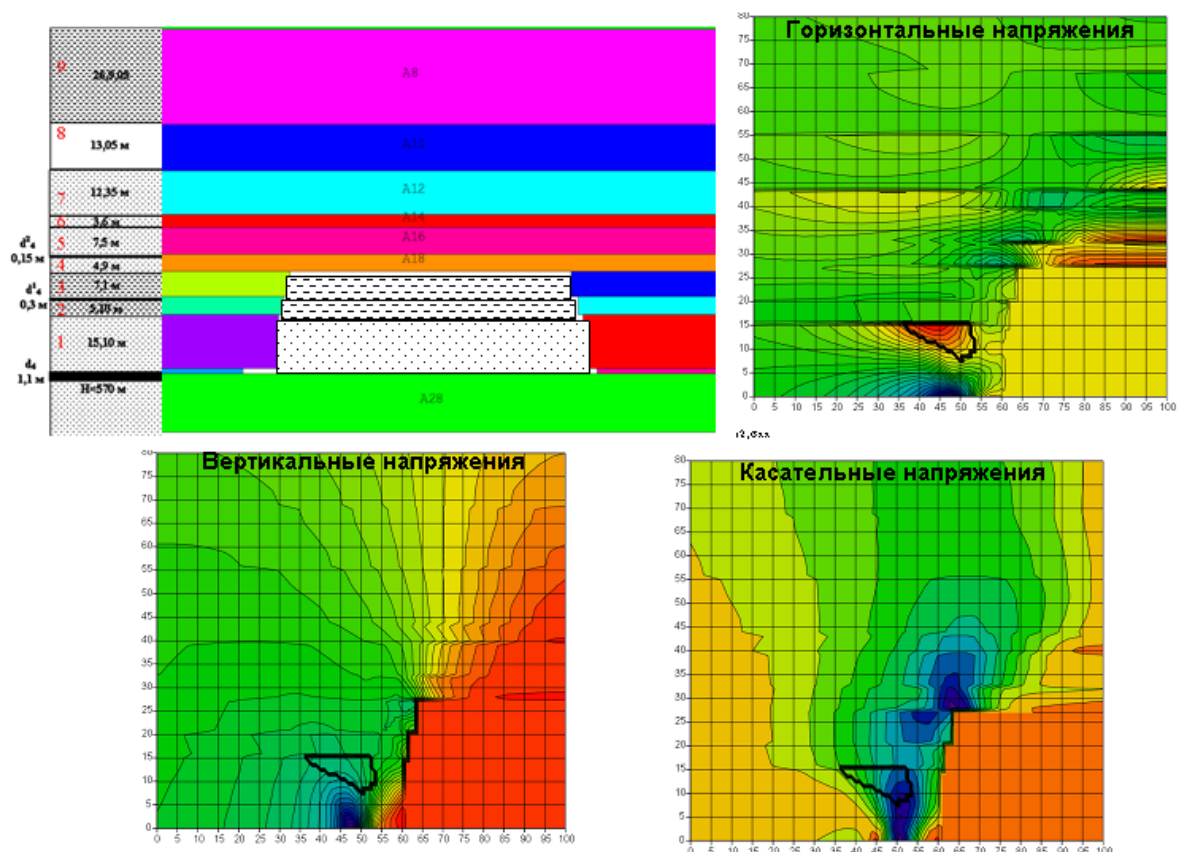


Рисунок 3.6 – Стан основної покрівлі до періодичної посадки.

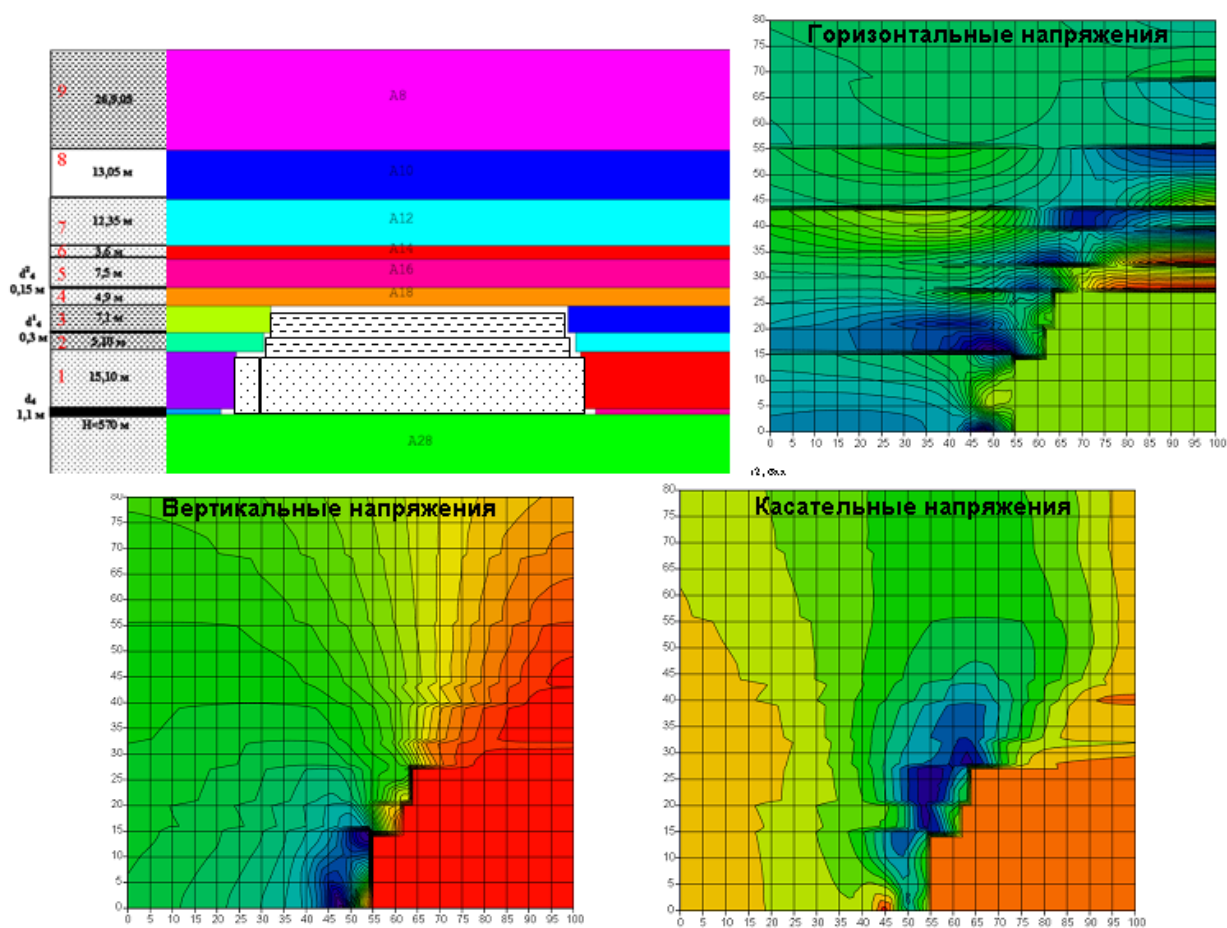


Рисунок 3.7 – Стан основної покрівлі після періодичної посадки.

Після обвалення консолі критичні області відсутні, система стабілізувалася. Таким чином, можна встановити наступний крок обвалення основної покрівлі. У всіх випадках крок періодичної посадки, згідно з розрахунками, складе 10 м (рис. 3.8).

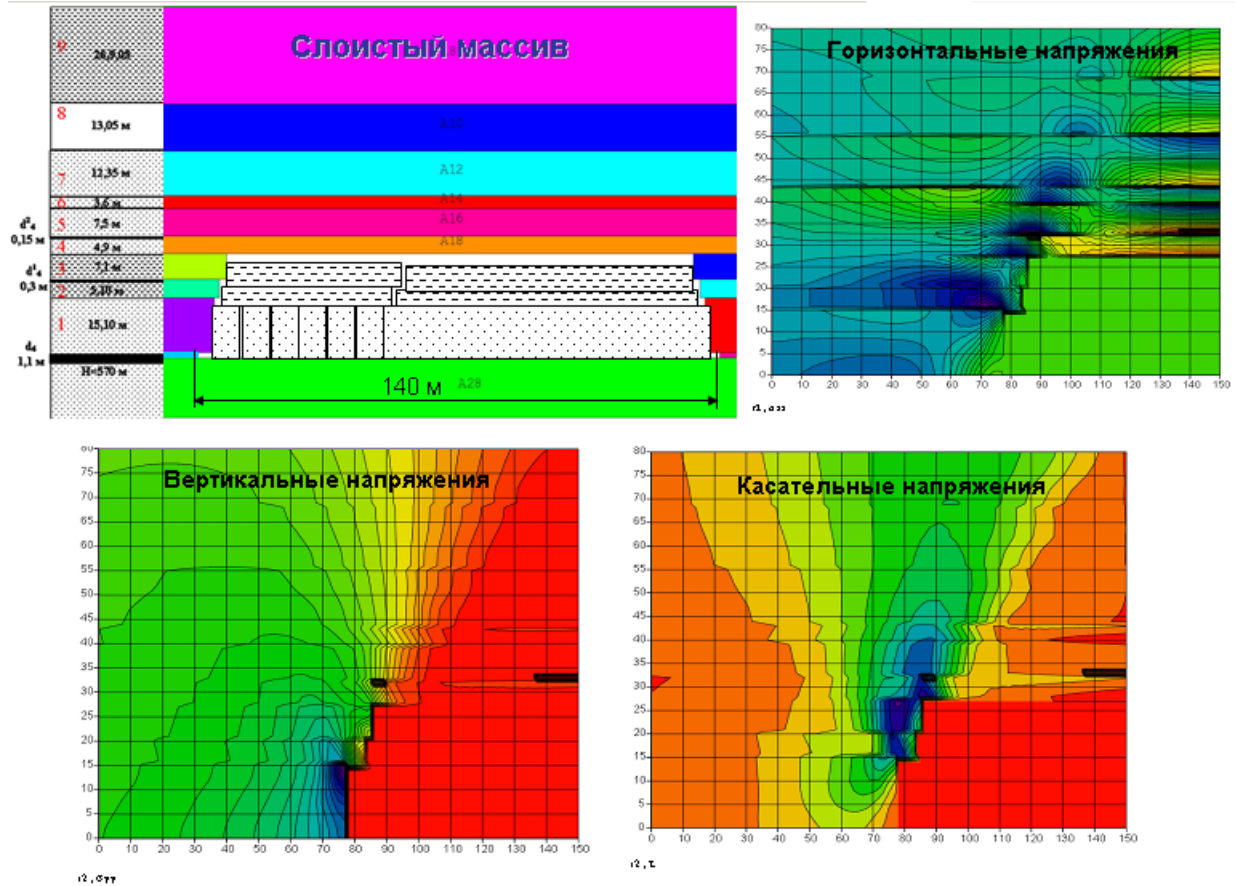


Рисунок 3.8 – Стан основної покрівлі після відходу лави на 140 м.

Відмінною особливістю обвалення породних шарів полягає в різниці кроку обвалення основної покрівлі від верхніх породних шарів, пов'язане з поточним розподілом напружень у породах покрівлі (рис. 3.9).

На обвалення верхніх породних шарів впливає їх власна вага, так як вони відшарувалися і не мають контакту з встановленими вище шарами, крім того що утворилася консоль основної покрівлі є «амортизатором» для верхніх породних шарів. Тобто критичні напруження у верхніх шарах будуть утворюватися від подальшого збільшення розмірів виробленого простору.

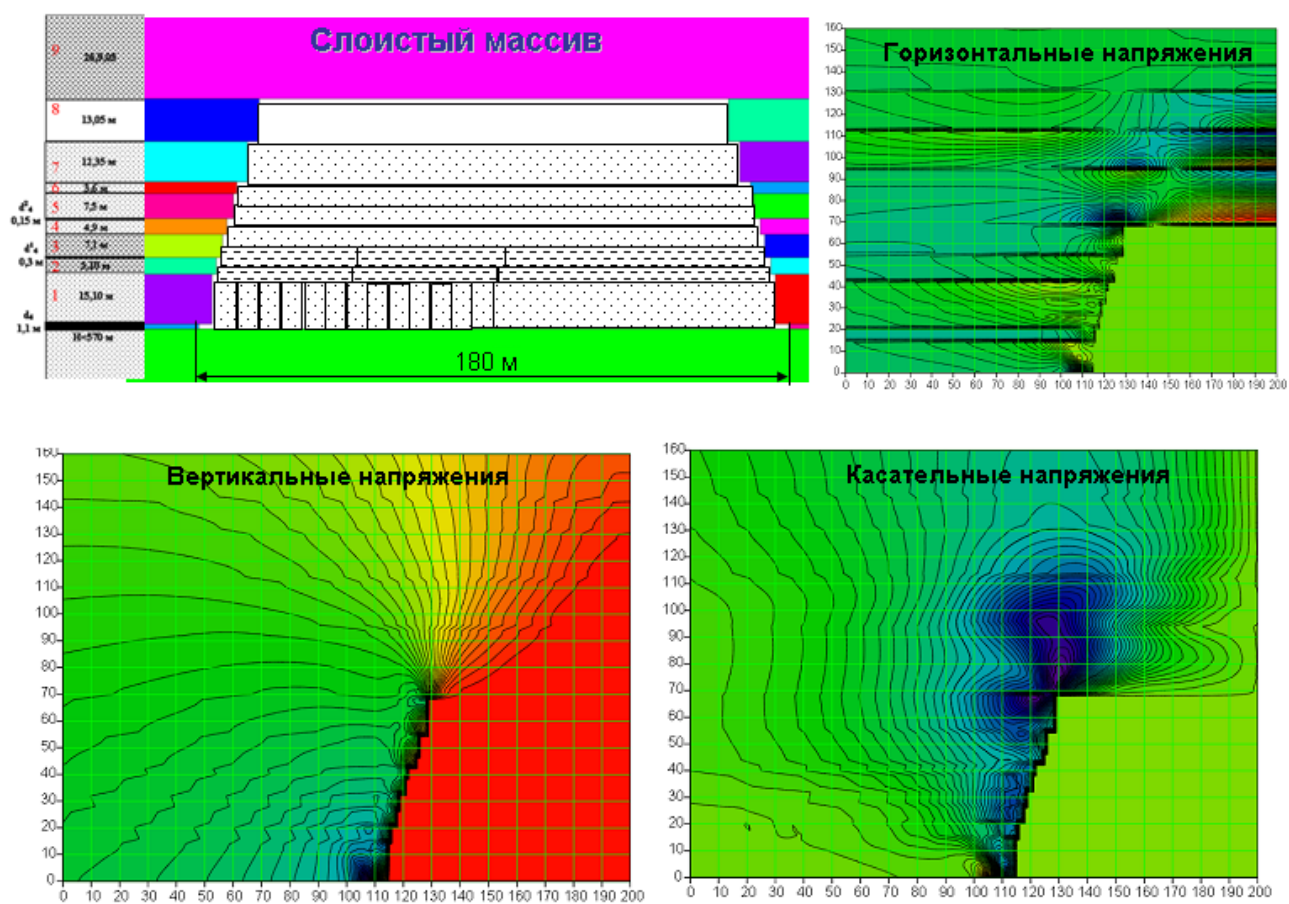


Рисунок 3.9 – Стан порід покрівлі після відходу лави на 180 м.

4. ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК

4.1. Метод визначення положення головних площадок і головних нормальних напружень

Величини і напрямки дії головних нормальних напружень становить найбільший інтерес з точки зору міцності елемента (рис. 4.1).

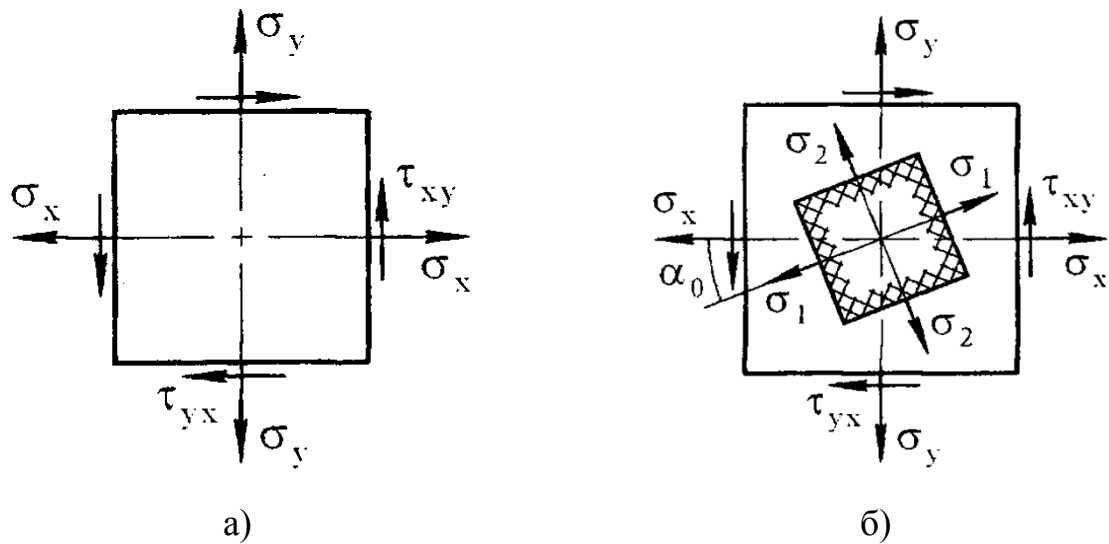


Рисунок 4.1 – Визначення положення головних площадок і головних нормальних напружень для плоского напруженого стану

Так як головні площадки є площадками поверненими по відношенню до вихідної системи координат $X-Y$, то для визначення їх положення використовуємо формули [23]:

$$\begin{aligned}\sigma_{x1} &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \sigma_{y1} &= \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \tau_{x1y1} &= \tau_{y1x1} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha.\end{aligned}\tag{4.1}$$

Знаючи, що в головних площадках дотичні напруження дорівнюють нулю:

$$\tau_{x1y1} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha_o + \tau_{xy} \cos 2\alpha_o = 0\tag{4.2}$$

Звідси після перетворення отримуємо формулу для визначення положення головних площадок:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_o = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}. \quad (4.3)$$

При цьому, кут α_o – кут повороту головних площадок щодо вихідної системи координат $X-Y$ – при розрахунку його за формулою (4.3) може приймати як позитивне, так і негативне значення, що залежить від величини і знака напружень σ_x , σ_y , τ_{xy} .

Тому, при визначенні положення головних площадок будемо дотримуватися наступних правил (рис. 4.1 б):

- кут α_o слід відкладати від алгебраїчно більшого заданого нормального напруження;
- якщо α_o позитивний, його слід відкладати проти годинникової стрілки.

І навпаки.

Підставляючи значення α_o (4.3) у вирази σ_{x1} і σ_{y1} (4.2), після перетворення, отримуємо формулу для визначення головних нормальних напружень в даній точці:

$$\sigma_{\frac{\max}{\min}} = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \quad (4.4)$$

де індекс головним напруженням призначається залежно від отриманого знака і числового значення.

4.2. Визначення положення головних площадок і головних нормальних напружень

Визначимо для кожної моделі напружено-деформованого стану при різних відходах лави від монтажного ходку, головні нормальні напруження та кут положення головних площадок.

Отримаємо графічні залежності кута положення головних площадок

для нижнього шару основної покрівлі. Зробимо це у масштабі і поділимо кожний кут на 45° , тобто величина кута буде змінюватися від -1 до $+1$ (-45° до $+45^\circ$). Це потрібно для того, щоб побачити зміну кута на кожному метрі висоти шару основної покрівлі. Висота нижнього шару основної покрівлі складає 15 м, отже графічні залежності побудуємо до центру моделі через кожний метр її висоти.

Модель №1 – ситуація до первісного обвалення основної покрівлі (рис. 4.2). Відхід лави від монтажного ходка – 90 м, згідно актам про первісне обвалення основної покрівлі.

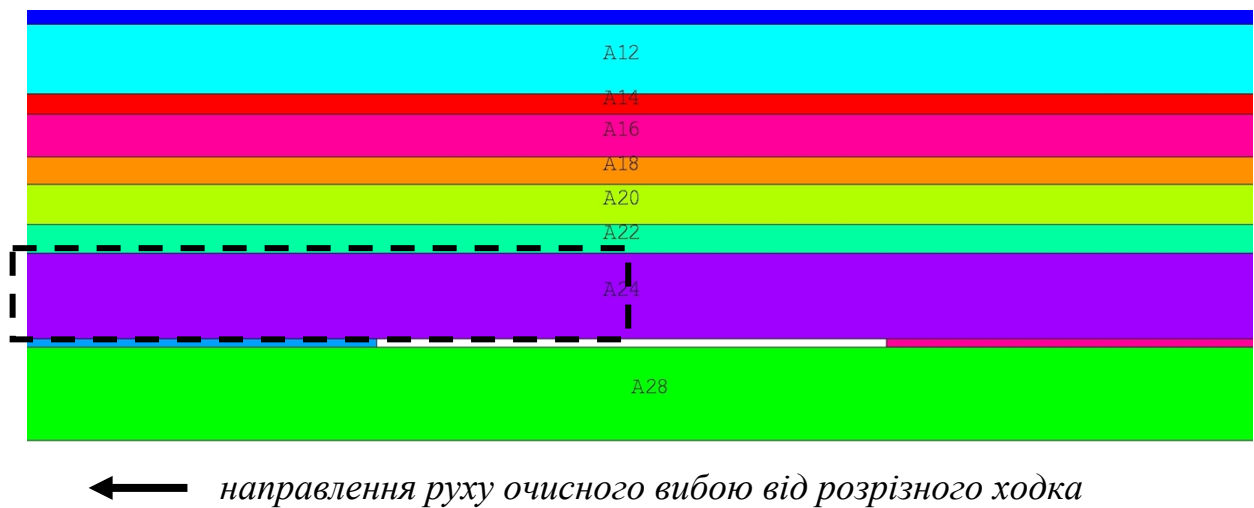


Рисунок 4.2 – Модель №1: Відхід лави на 90 м (до первісного обвалення основної покрівлі)

Розрахунок кута положення площадок головних напружень для моделі №1 (рис. 4.3) показав, що попереду лави у нижній частині дуже різко змінюється кут повороту декілька раз. Це залежить від концентрації напружень як осьових так і дотичних. Це вказує на те що тріщини зсуву будуть мати різні наклони і це говорить про утворення зони вивалу. Також у верхній частині виникає перепад кута, і тільки у центрі шару покрівлі він плавно змінюється.

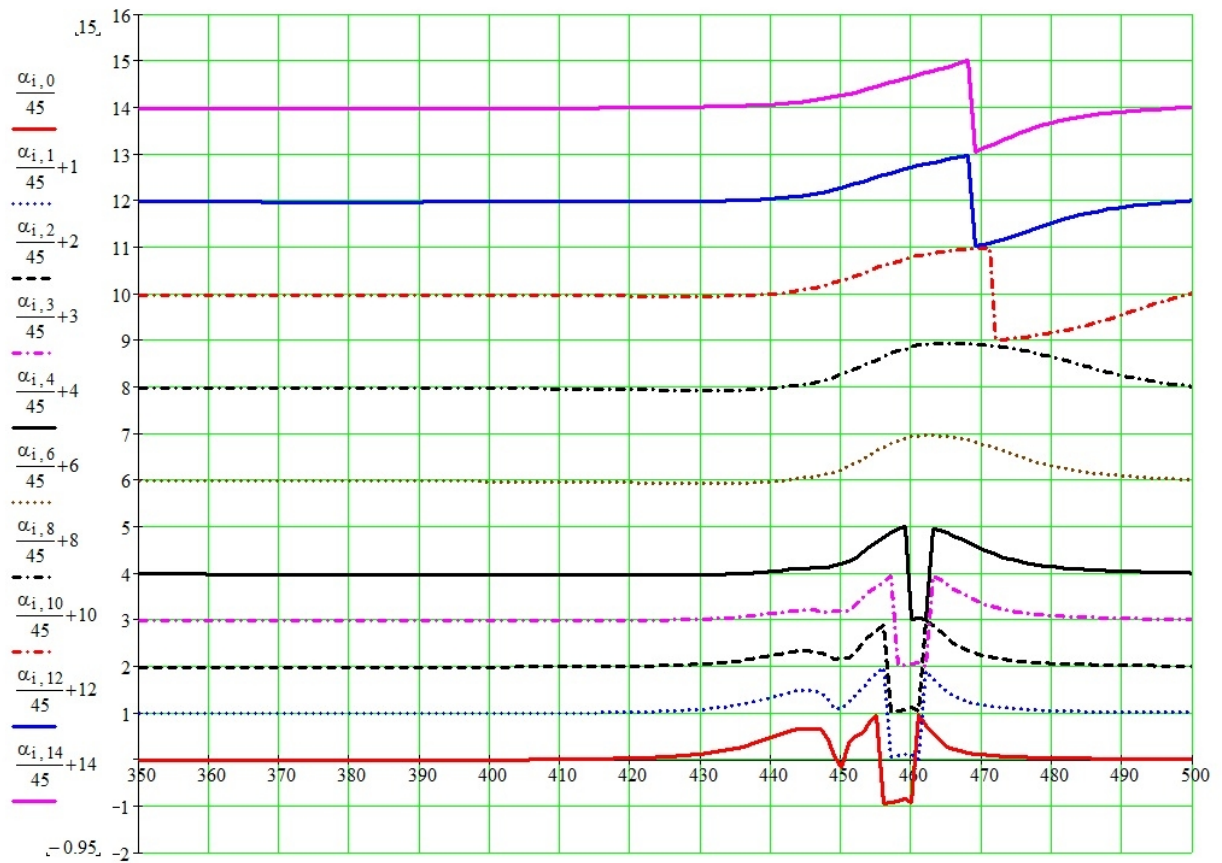


Рисунок 4.3 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №1 на кожному метрі основної покрівлі

Для визначення зони руйнування шару основної покрівлі використаємо прийнятий критерій тріщино-утворення (2.8) – (2.10). Отже якщо критерій (2.10) не виконується призначаємо, що у цьому випадку почалось руйнування.

Запишемо процес роботи критерію таким: 0 – умова (2.10) виконується, 1 – умова (2.10) не виконується. Таким чином ми будемо бачити зони руйнування основної покрівлі (рис. 4.4).

Згідно картині руйнування основної покрівлі бачимо, що відбулося руйнування основної покрівлі попереду лави і над виробленим простором. На момент руйнування породного шару утворилася зона вивалу висотою до 5 м і шириною 20 м. Руйнування відбулось по всій висоті шару основної покрівлі.

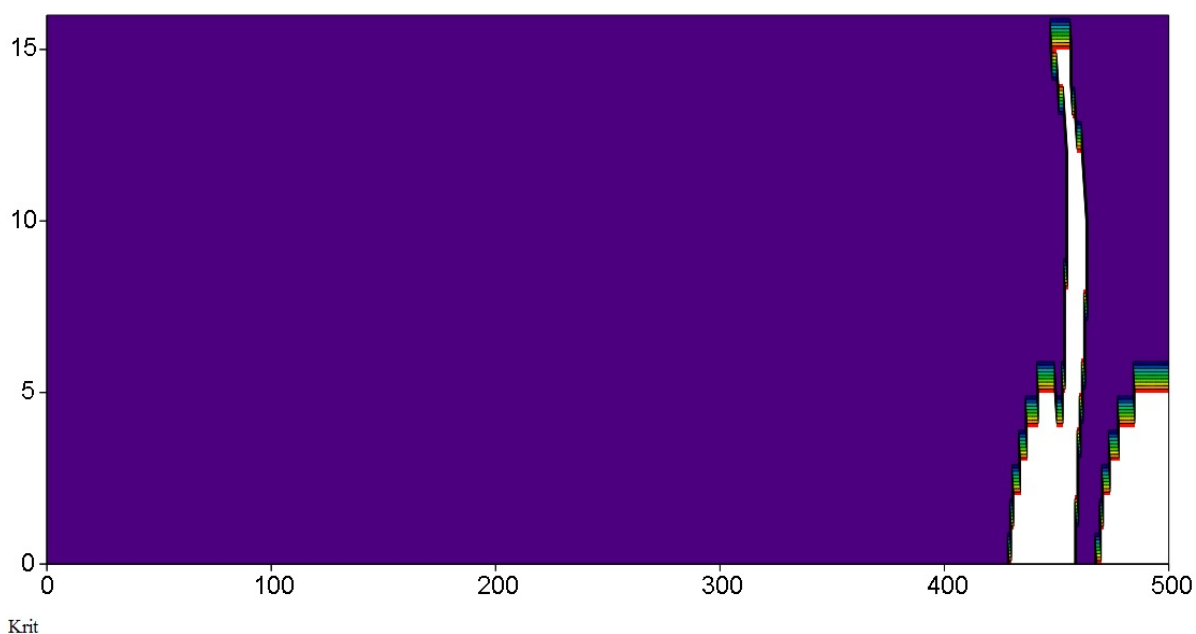


Рисунок 4.4 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №1 (Білим визначена – зона руйнування)

Після обвалення нижнього шару основної покрівлі (Модель №2, рис. 4.5) кут положення площадок головних напружень змінюється плавно, тільки на висоті 0 м, 4 м і 12 м спостерігається перепад (рис. 4.6).

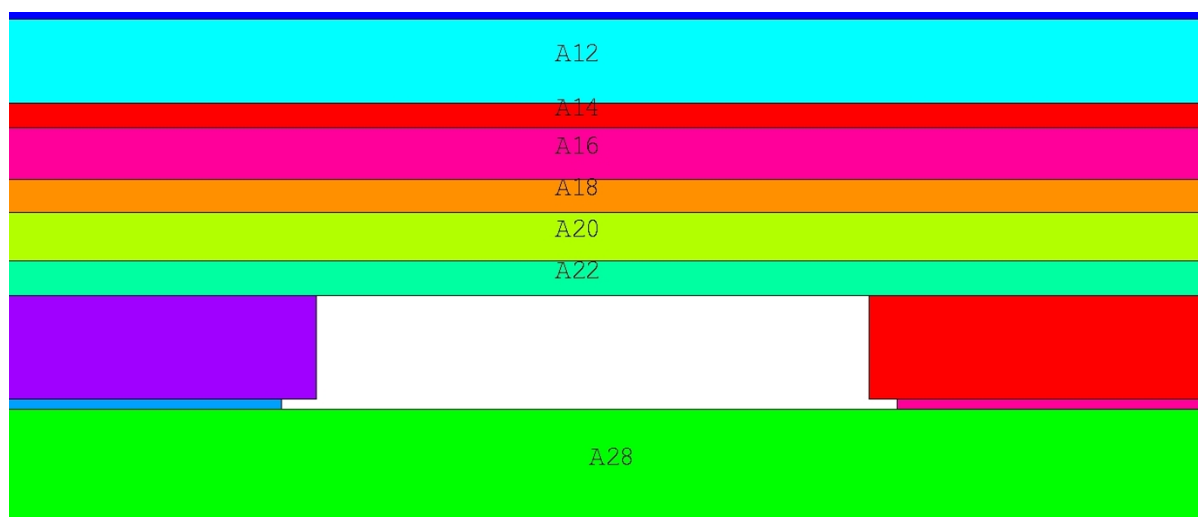


Рисунок 4.5 – Модель №2: Момент первісного обвалення нижнього шару основної покрівлі

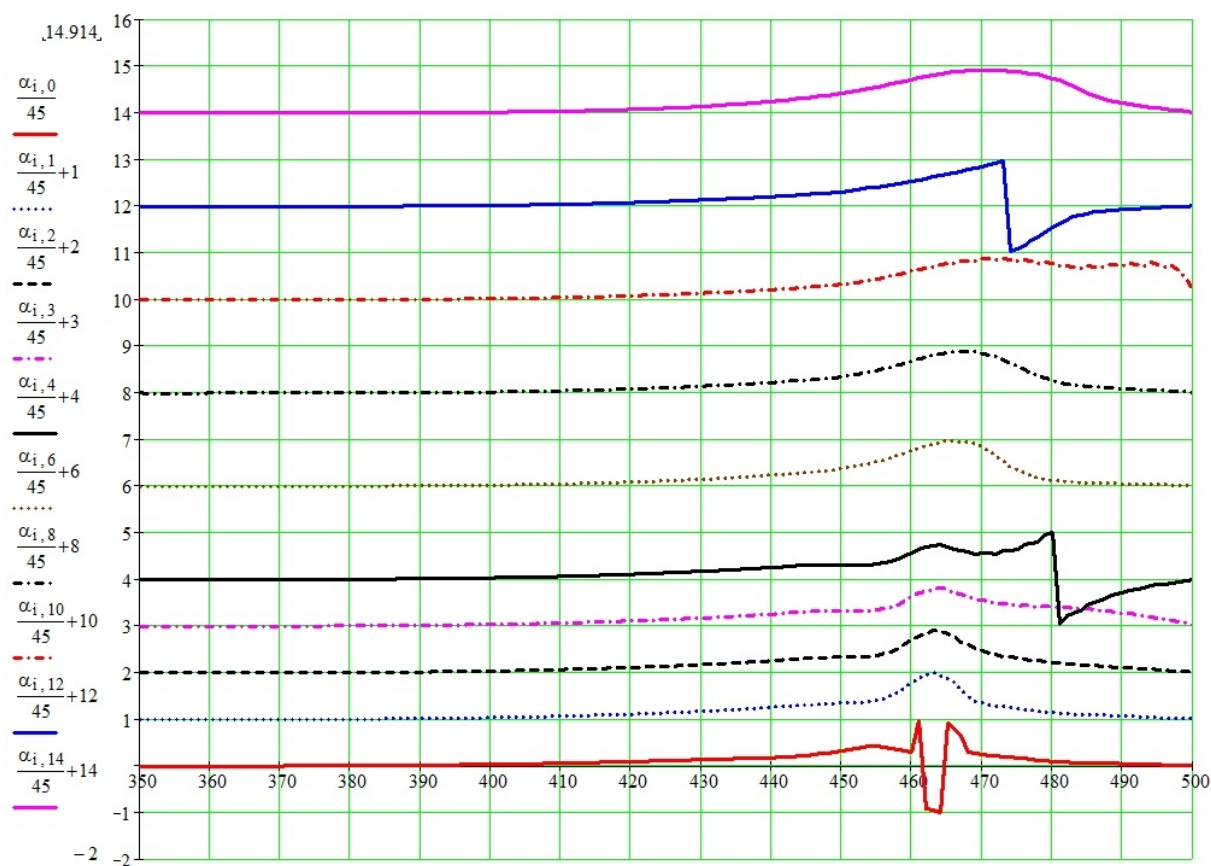


Рисунок 4.6 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №2

Спостерігаються незначні зони руйнування шару основної покрівлі (рис. 4.7)

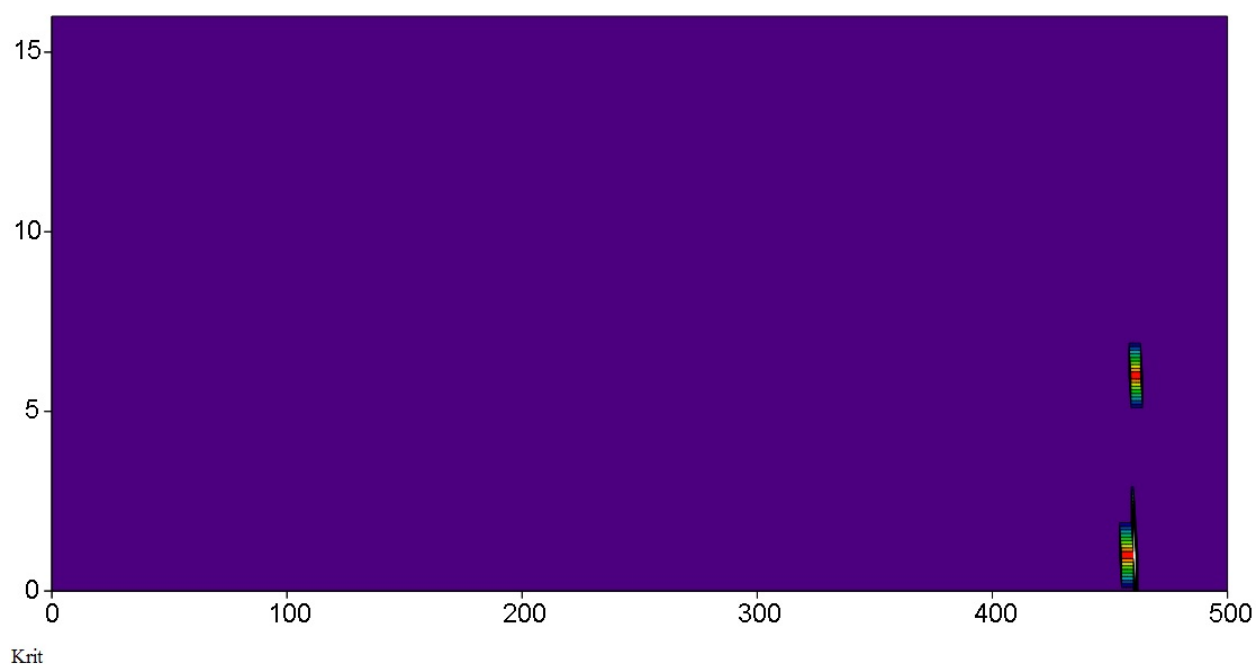


Рисунок 4.7 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №2

Після обвалення несучого шару основної покрівлі слідком обвалилися верхні шари «навантаження» основної покрівлі – Модель №3 (рис. 4.8).

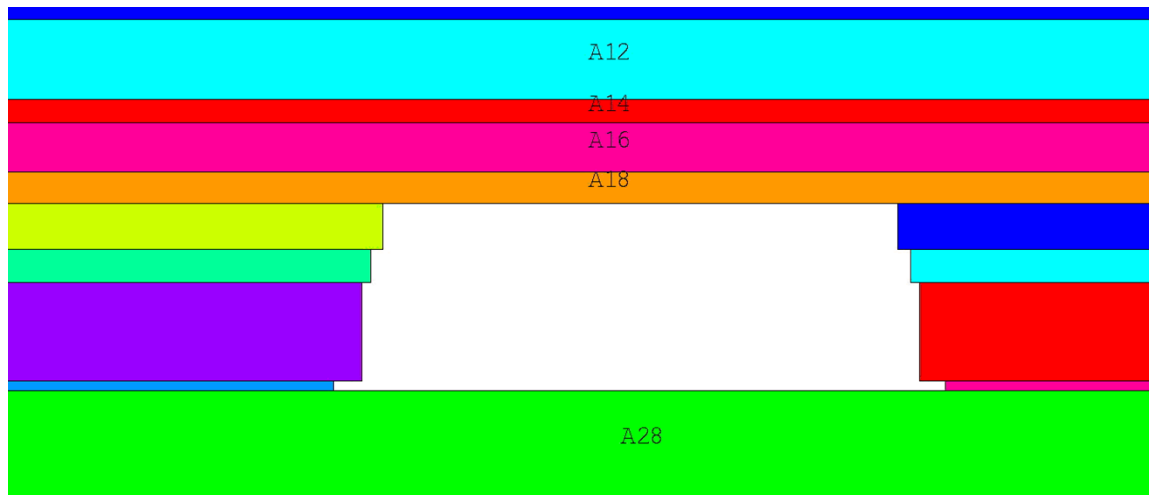


Рисунок 4.8 – Модель №3: Момент повного первісного обвалення основної покрівлі

Після первісного обвалення основної покрівлі відбувся перерозподіл напруженого стану. Кут положення площадок головних напружень плавно підвищується на самій консолі основної покрівлі (рис. 4.9).

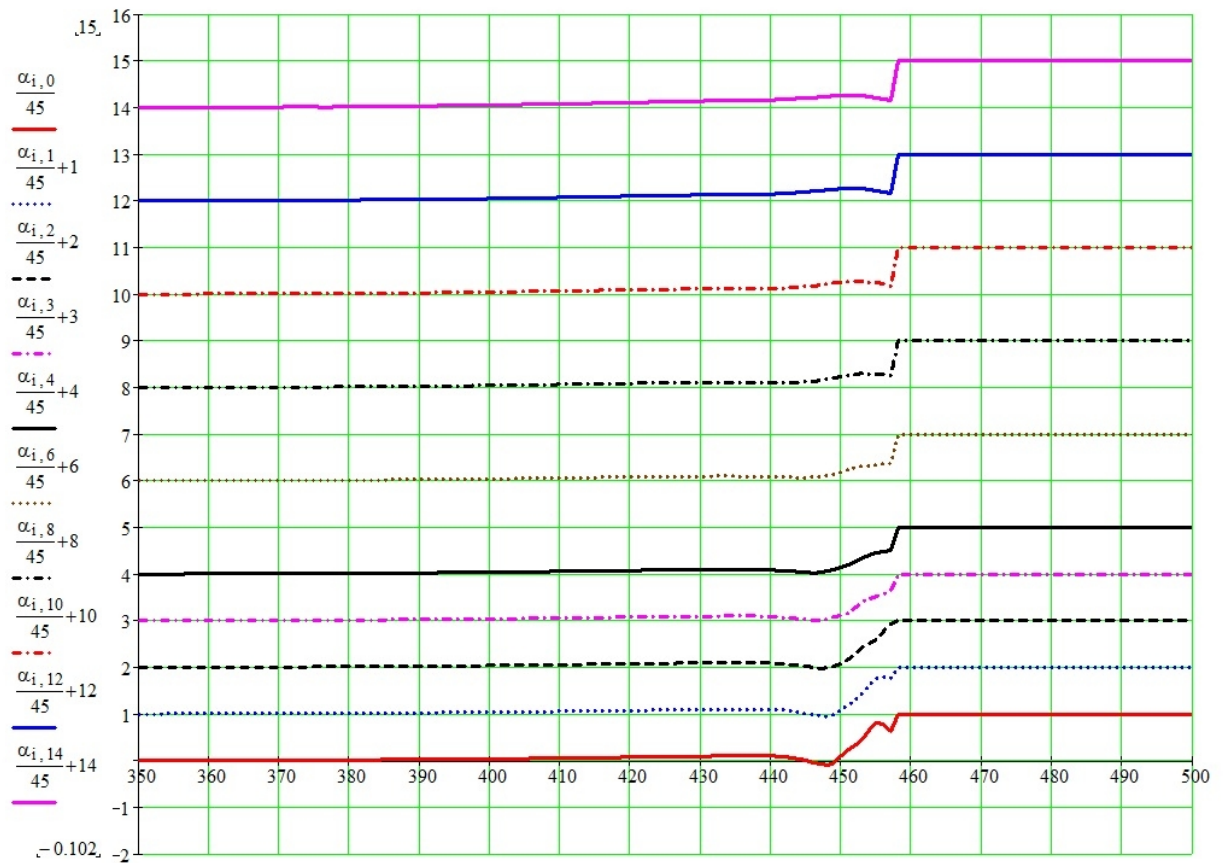


Рисунок 4.9 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №3

Спостерігається незначна зона руйнування нижньої часті шару основної покрівлі (рис. 4.10)

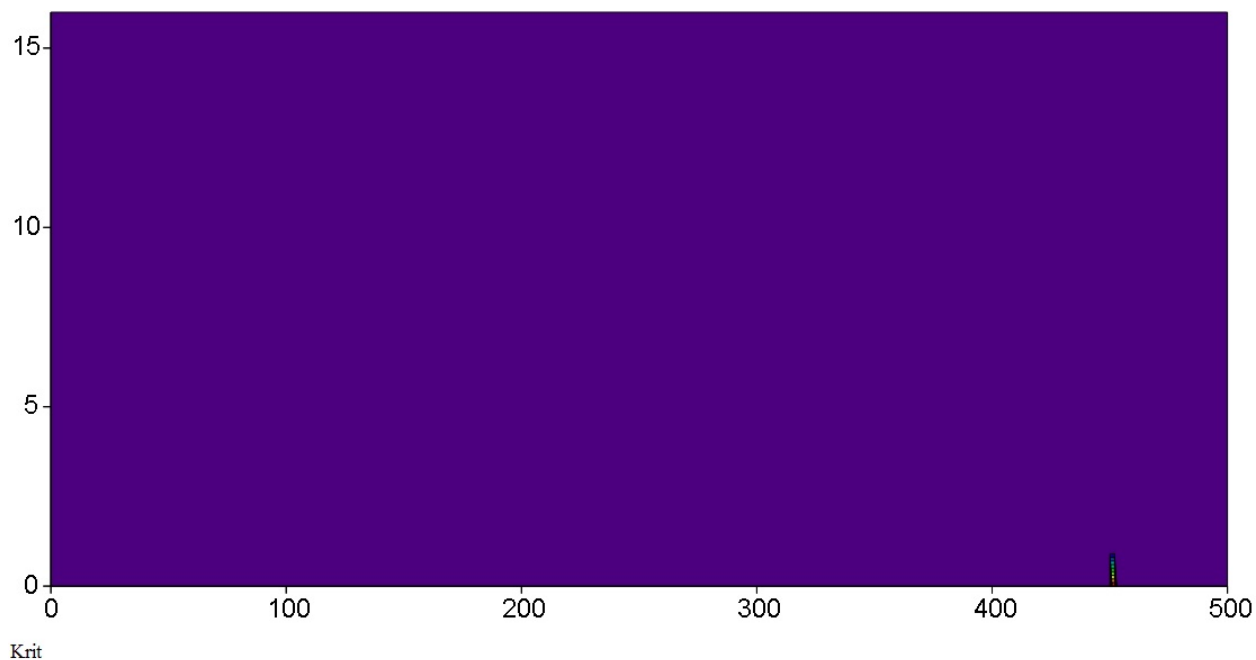


Рисунок 4.10 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №3

Після подальшого відходу очисного вибою на 10 м (Модель №4 рис. 4.11) утворилася консоль основної покрівлі.

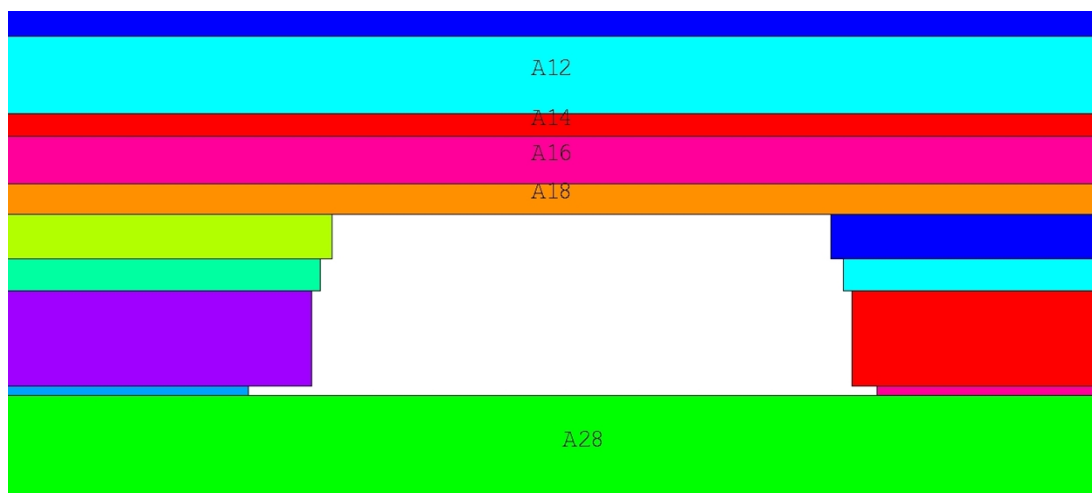


Рисунок 4.11 – Модель №4: Момент перед періодичним обваленням основної покрівлі

Кут положення площадок головних напружень різко змінюється на самої консолі основної покрівлі (рис. 4.12).

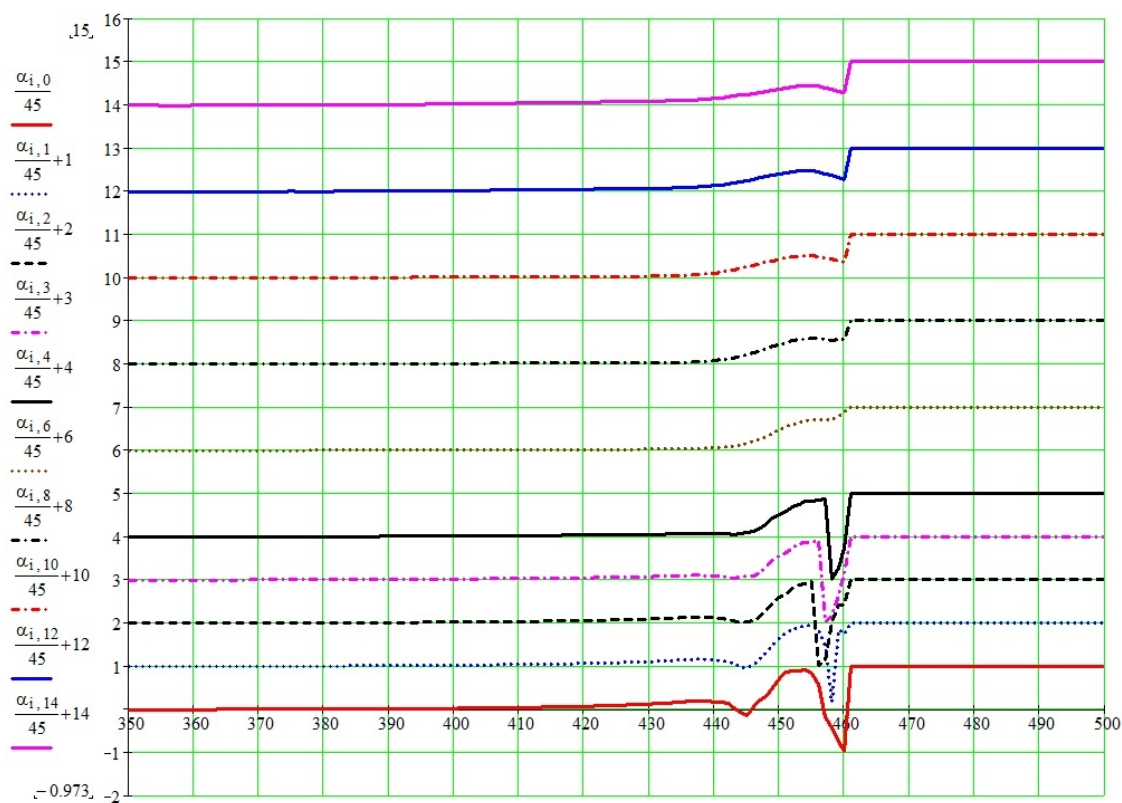


Рисунок 4.12 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №4

Критерій руйнування показав зони руйнування у вигляді вивалу у нижній частині основної покрівлі розміром: висота – 3,5 м, ширина – 10 м (рис. 4.13).

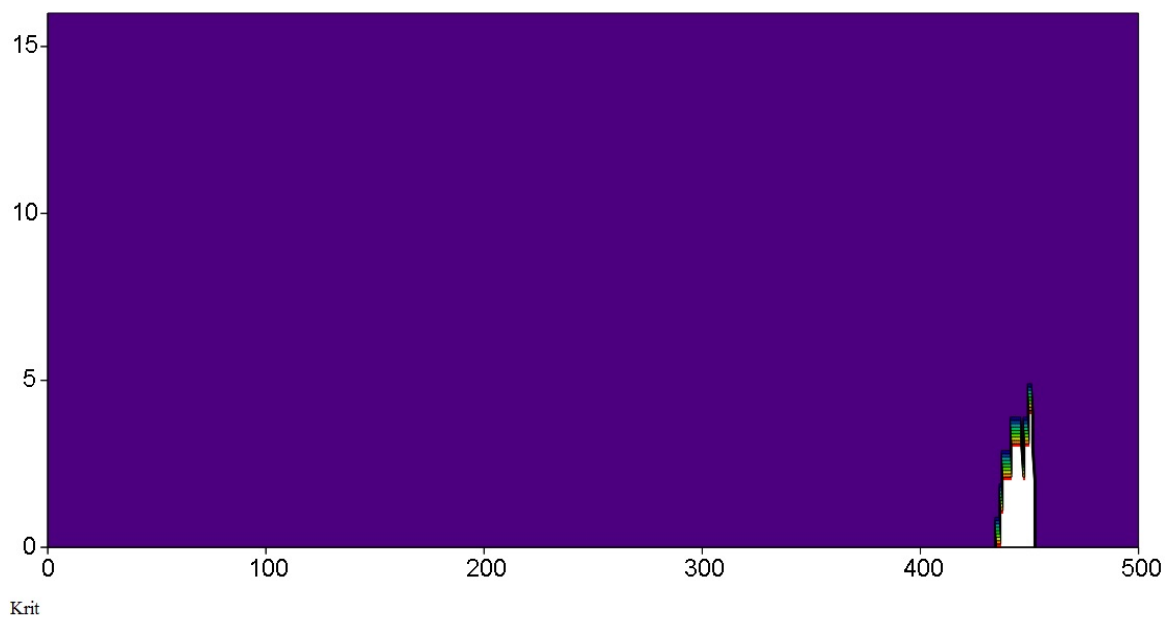


Рисунок 4.13 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №4

Після обвалення консолі основної покрівлі (Модель №5, рис. 4.14), відбулося перше періодичне обвалення.

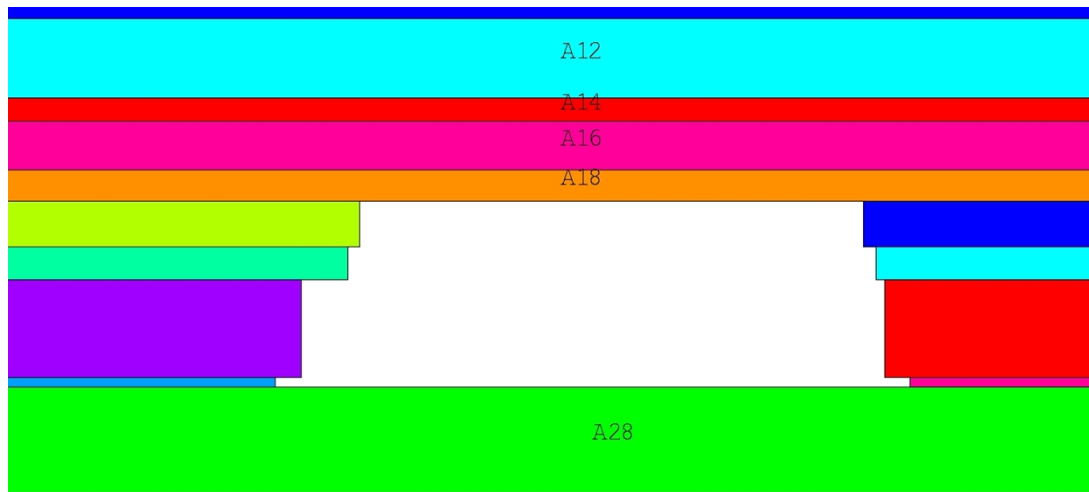


Рисунок 4.14 – Модель №5: Момент після періодичного обвалення основної покрівлі

Після обвалення консолі відбулося перерозподіл напруження. Кут площадок головних напружень плавно змінюється на бокових гранях покрівлі (рис. 4.15).

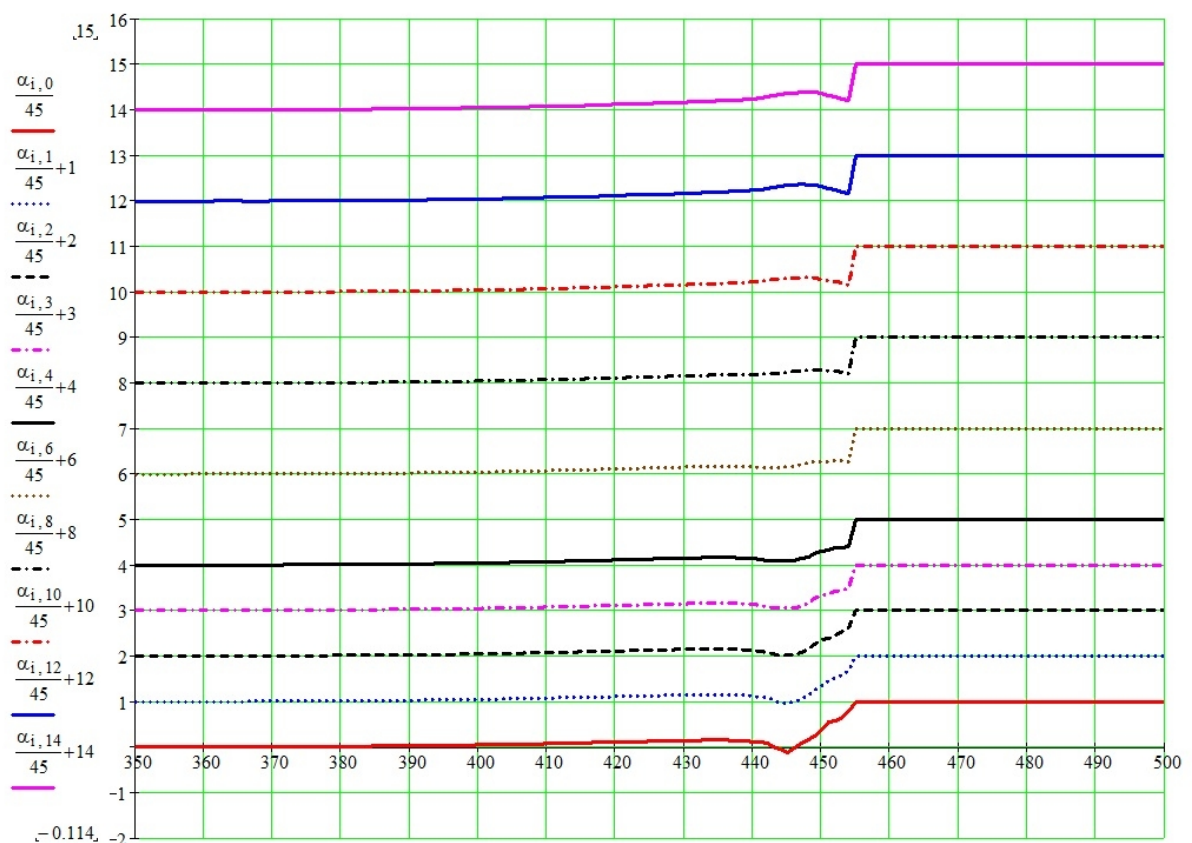


Рисунок 4.15 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №5

Спостерігаються незначні зони руйнування основної покрівлі у верхній і нижній частині шару, тобто утворюються нові тріщини (рис. 4.16).

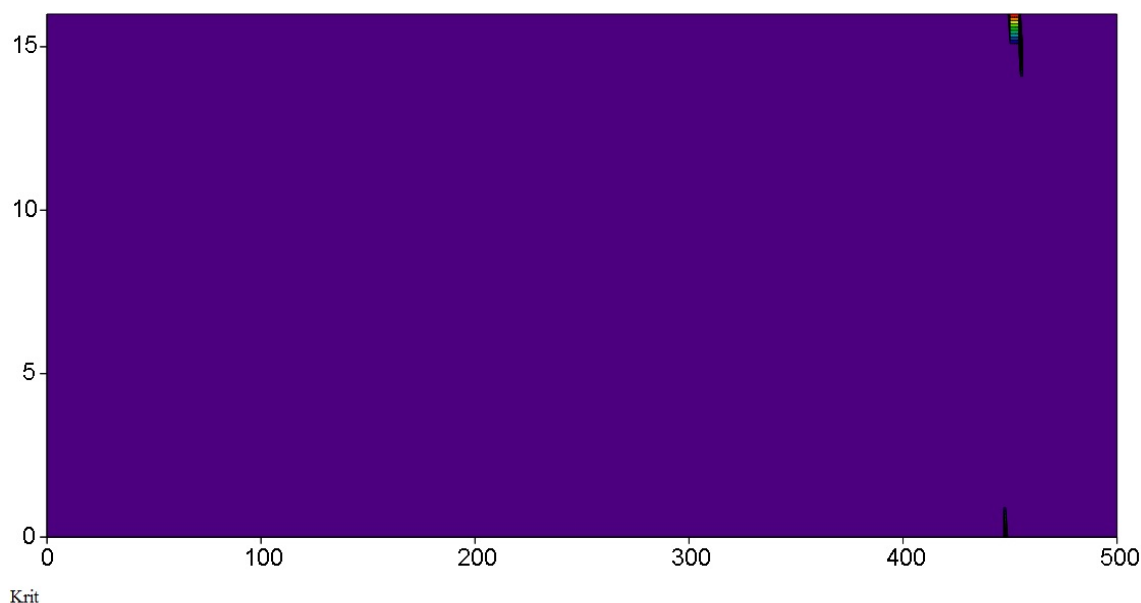


Рисунок 4.16 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №5

Подальший відхід лави ще на 10 м створює нову консоль з шару основної покрівлі (Модель №6, рис. 4.17)

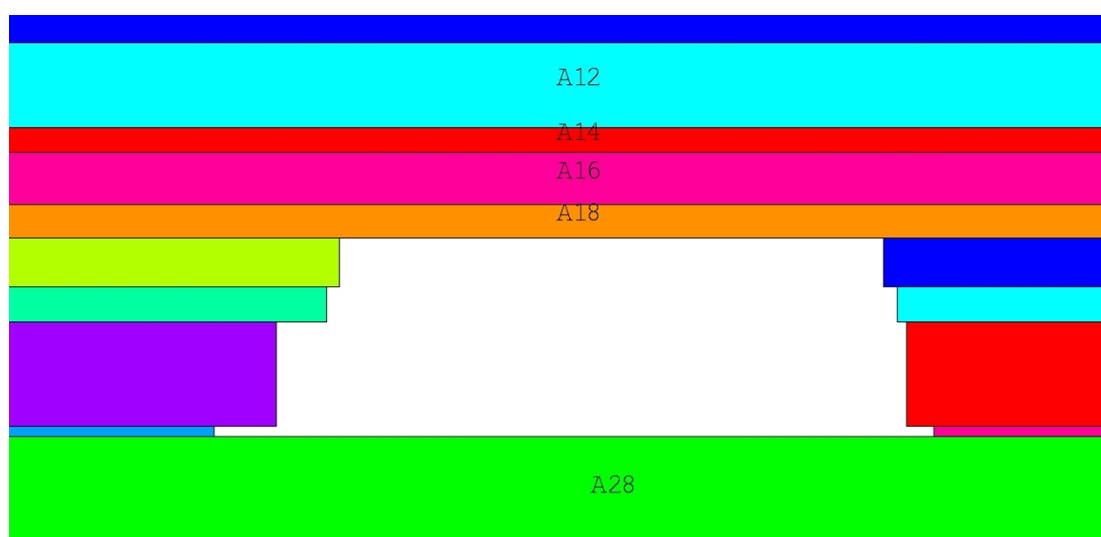


Рисунок 4.17 – Модель №6: Перед періодичним обваленням основної покрівлі

Кут положення площадок головних напружень у нижній частині шару основної покрівлі різко змінюється утворюючи тріщини різних систем і напрямків (рис. 4.18).

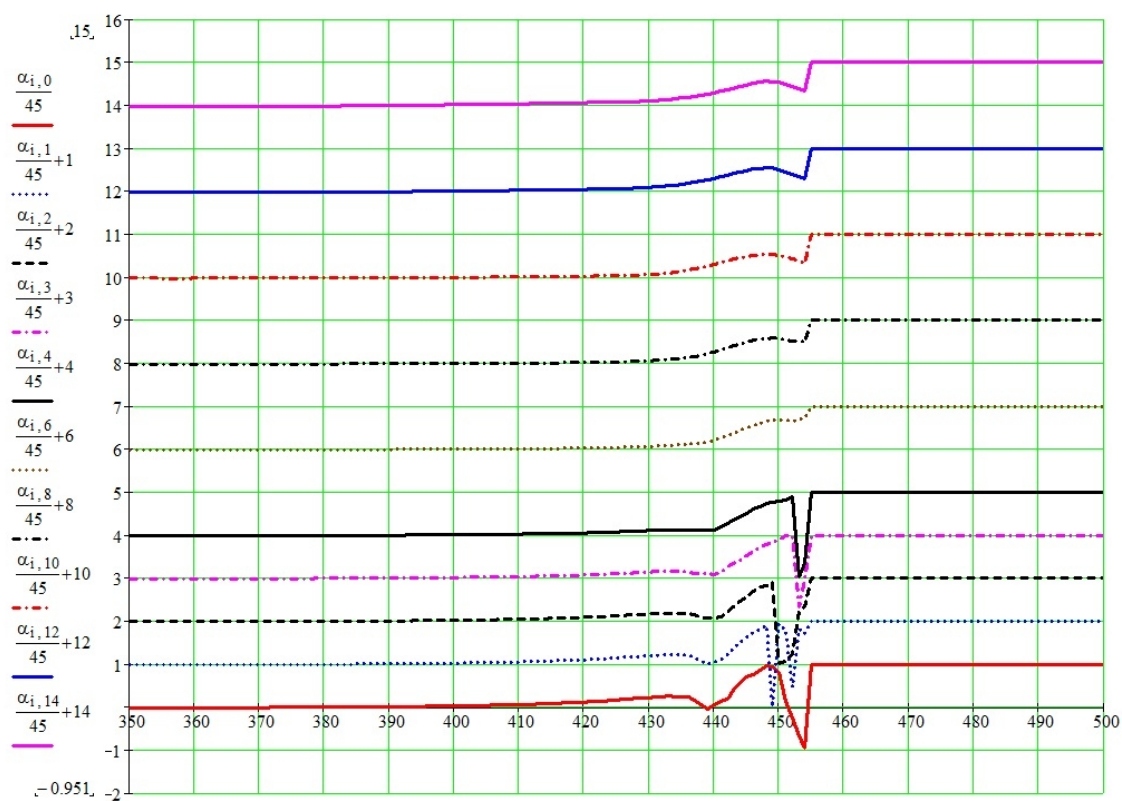


Рисунок 4.18 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №6

Це приводить до руйнування породи основної покрівлі на дрібні фракції з утворенням куполу вивалу (рис. 4.19), висотою до 4 м і шириною до 15 м

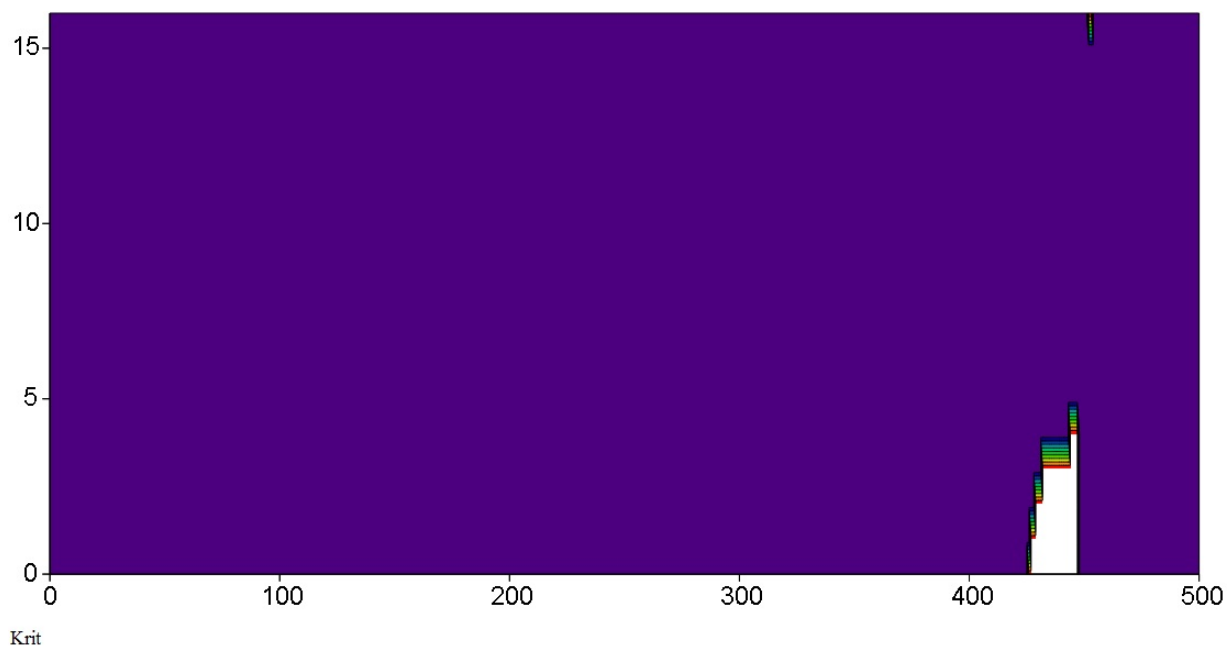


Рисунок 4.19 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №6

Розглянемо ще одну позицію на момент періодичного обвалення нижнього і верхніх шарів основної покрівлі (Модель №14, рис. 4.20). Відхід лави від монтажного ходка склав – 140 м

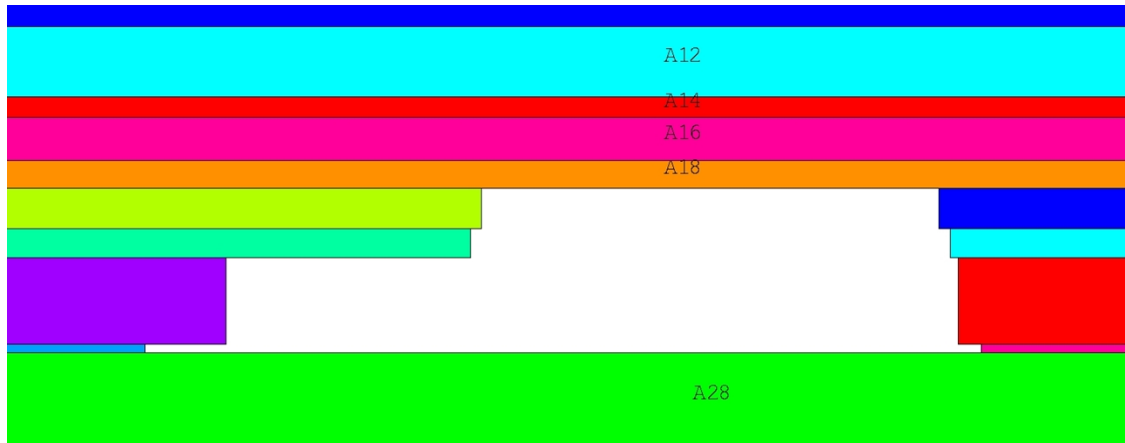


Рисунок 4.20 – Модель №14: Перед періодичним обваленням основної покрівлі

Як завжди у такому випадку кути положення площадок головних напружень для моделі №14 у нижній частині шару різко змінюються, утворюючи січні тріщини.

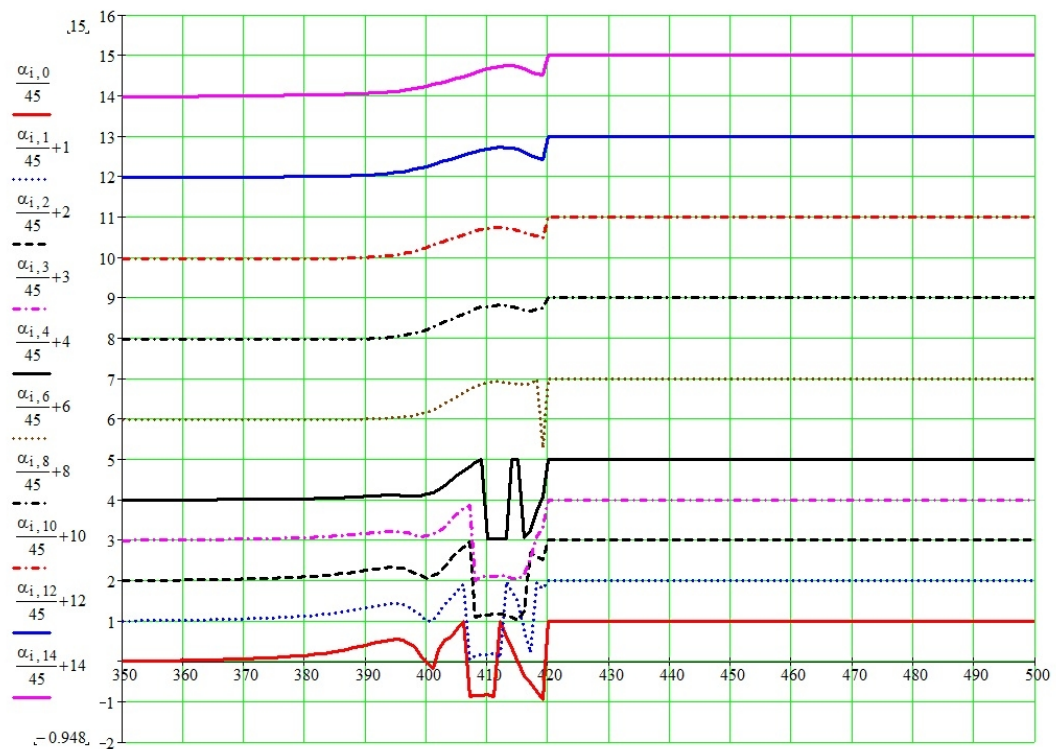


Рисунок 4.21 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №14

Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №14 утворюють вивал з січними тріщинами по всій потужності нижнього шару основної покрівлі (4.22).

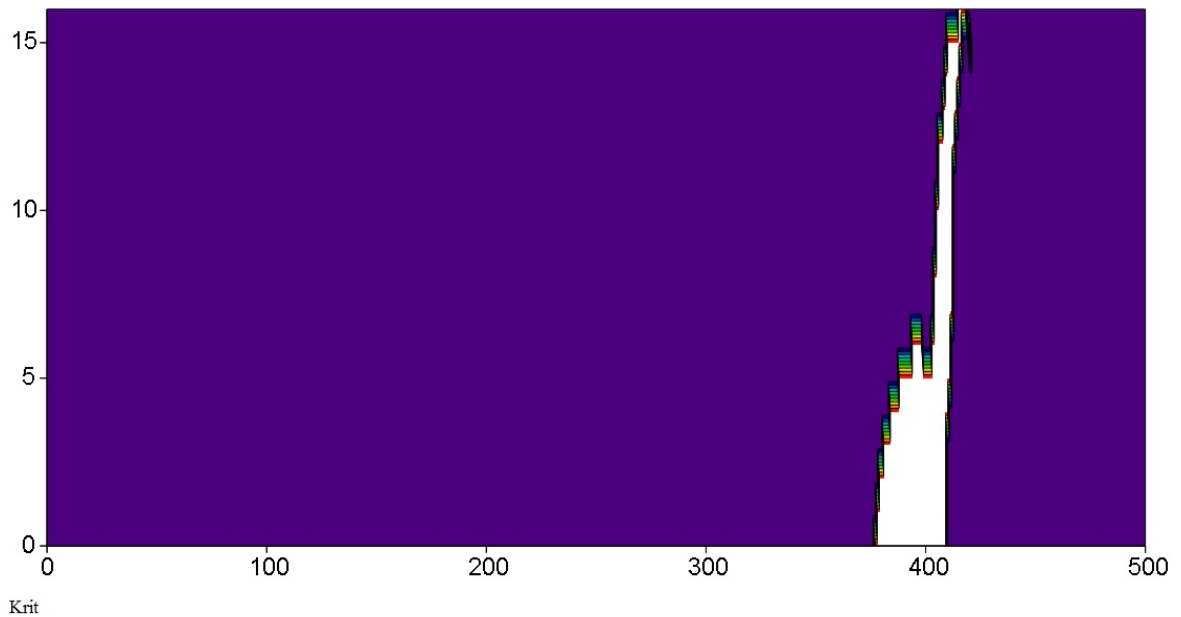


Рисунок 4.22 – Зони руйнування шару основної покрівлі для моделі №14

Після періодичного обвалення верхніх і нижніх шарів основної покрівлі (Модель №16) відбувся перерозподіл напруження і на несучому шарі збільшилися вертикальні напруження, що привело до утворення розколюючих тріщин у верхній його частині (рис 4.23 – 4.25). Вивалоутворення – відсутнє.

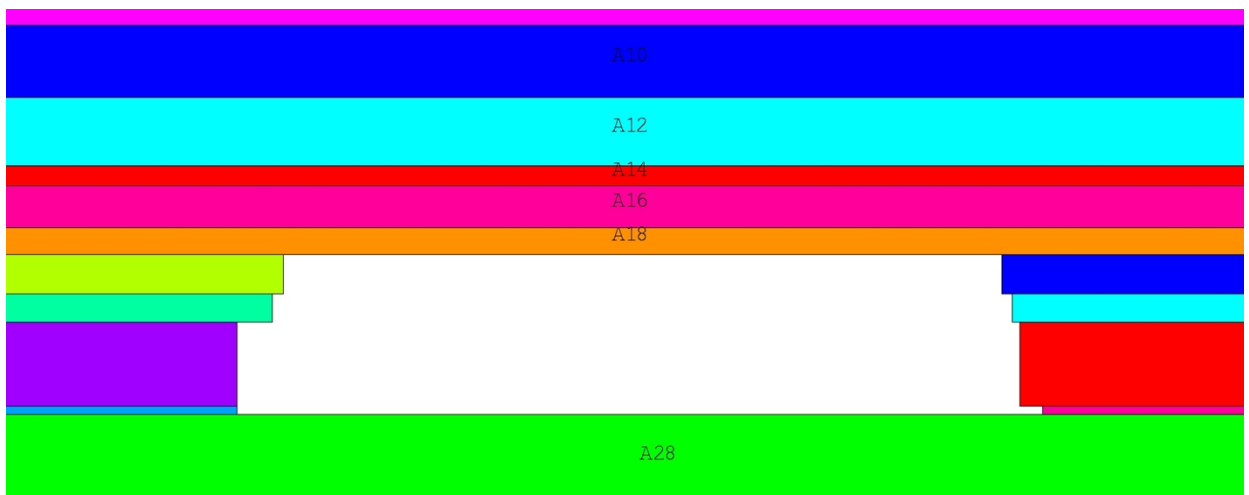


Рисунок 4.23 – Модель №16: Після періодичного обвалення верхніх і нижніх шарів основної покрівлі

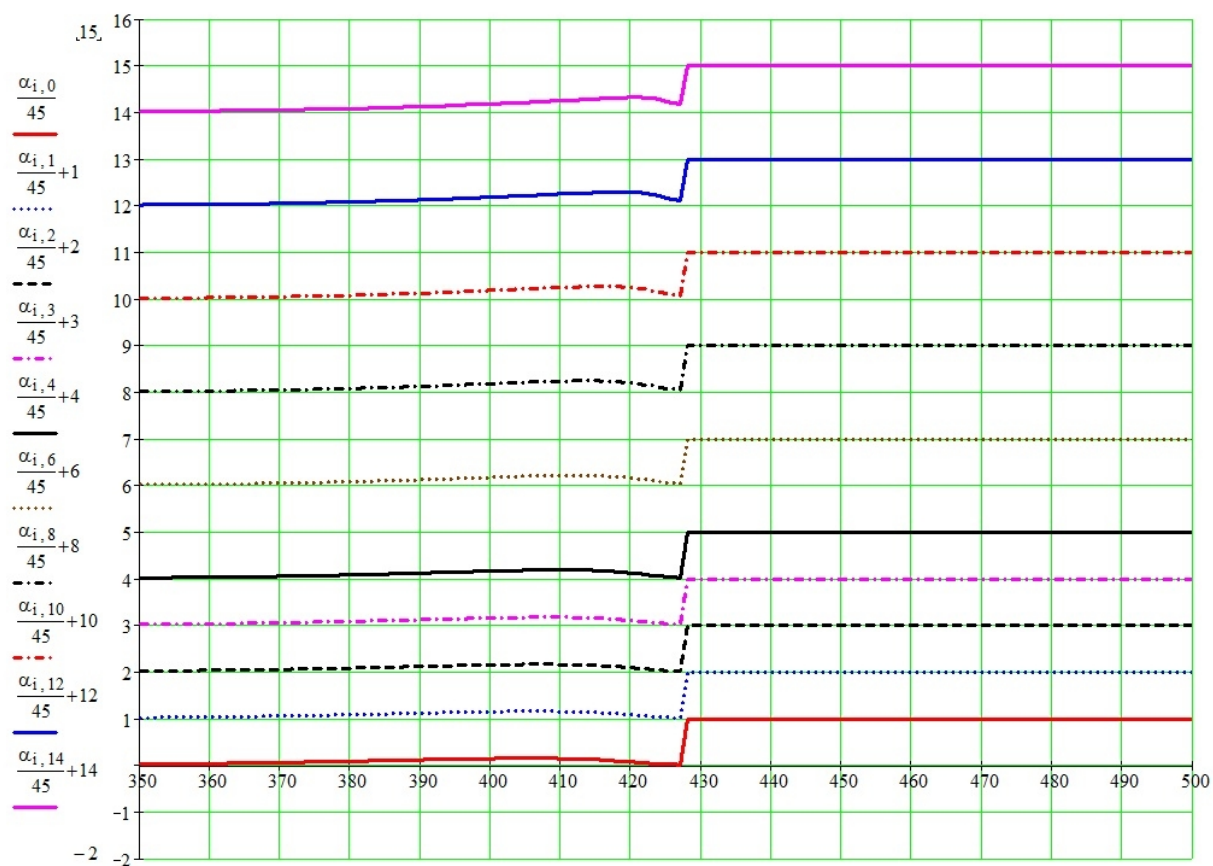


Рисунок 4.24 – Кут положення площадок головних напружень для моделі №16

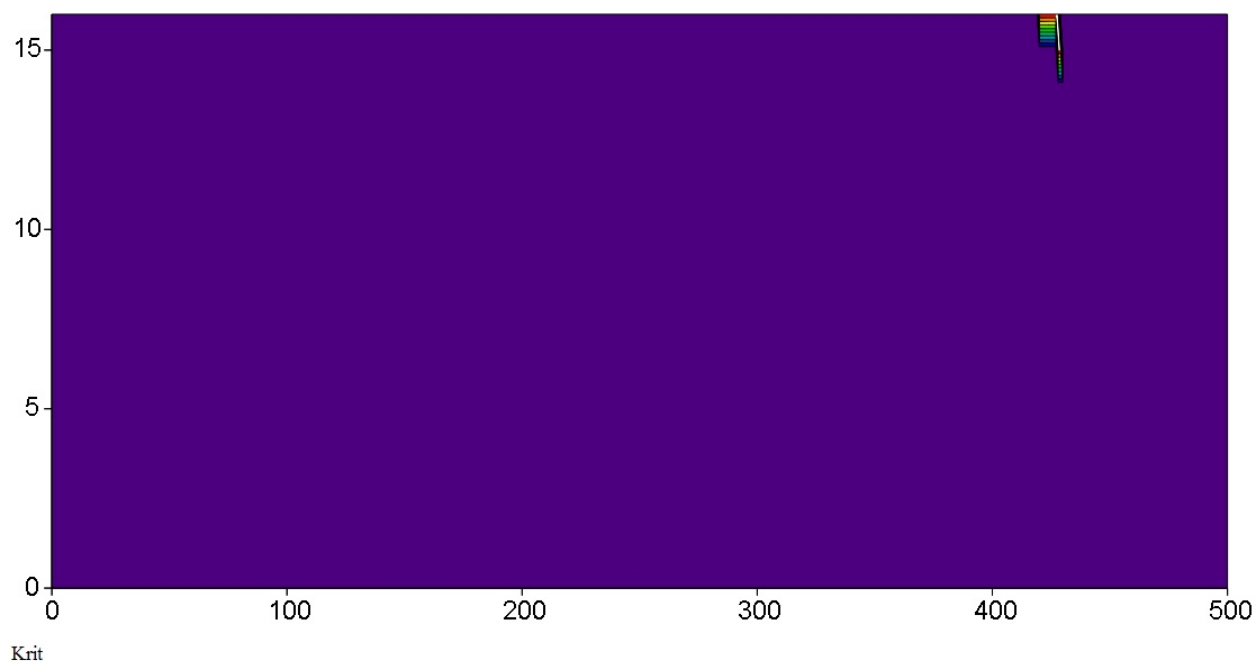


Рисунок 4.25 – Зони руйнування шару основної покритті для моделі №16

5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ ВИРОБОК В ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

5.1. Параметри нагнітання скріплюючих складів

До параметрів нагнітання скріплюючого складу у масив відносяться: довжина і кут нахилу шпуру до площини нашарування порід, відстань між шпурами, глибина герметизації устя шпуру, тиск і темп нагнітання, витрата скріплюючого складу на один шпур, а також кількість нагнітань. Величина параметрів нагнітання залежить від фізико-механічних властивостей зміцнюючих порід, їх тріщинуватості, потужності, карбонатності і обводнення, а також від застосовуваних засобів кріплення порід покрівлі і швидкості посування очисного вибою. Параметри нагнітання визначаються розрахунковим шляхом і потім уточнюються за фактичними результатами.

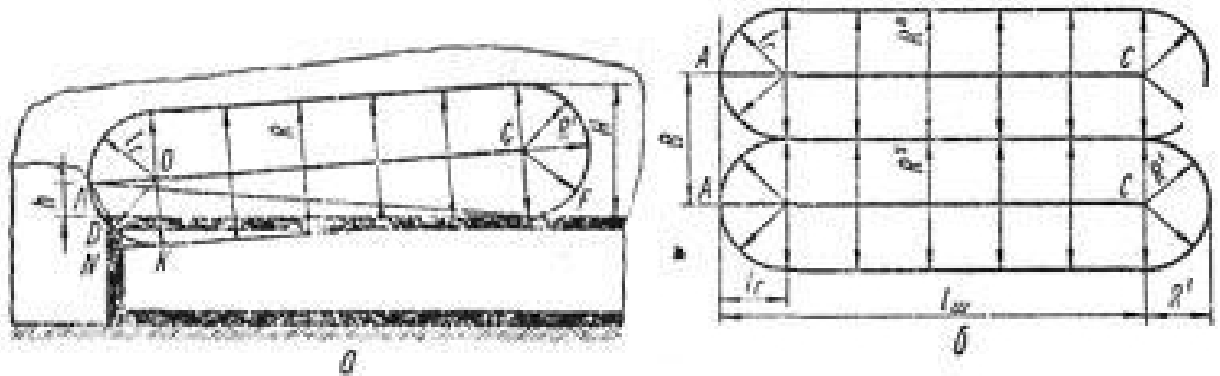


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема для визначення втрат скріплюючого складу: а – вертикальна проекція шпурів; б - горизонтальна проекція шпурів; ($l_{ш}=AC$ – довжина шпуру; l_2 – довжина герметизації; R – радіус поширення скріплюючого складу у вертикальній площині; R'' – радіус поширення скріплюючого складу у горизонтальній площині; R' – радіус поширення скріплюючого складу у глибину масиву; B – відстань між шпурами; H – потужність зміцнюваного шару)

Довжина шпурів повинна на 0,5 м перевищувати величину посування очисного вибою (рис. 5.1) [7]

$$l_{ш} = n \cdot l_c - R' + 0.5, \text{ м} \quad (5.1)$$

де l_c – добове посування лінії очисного вибою, м;

n – кількість діб, на час яких готується фронт роботи очисному вибою.

При зміцненні порід покрівлі на шахтах Донбасу довжина шпуру при їх бурінні з очисного вибою становила не більше 3,5 м.

Кут нахилу шпуру до площини нашарування порід визначається станом покрівлі перед роботами по її зміцненню. При наявності вертикальної площини обвалення порід шпури бурят практично паралельно нашаруванню порід. Висота h (рис. 5.1) повинна наближатися до половини величини потужності зміцнюваного шару порід $H/2$, радіус R поширення скріплюючого складу не повинен бути більш $H/2$. Дно шпуру раціональніше розміщувати у точці C (рис. 5.1, а), розташованої над пластом вугілля на висоті $H/2$. Якщо $h=0$, що може бути при профілактичному нагнітанні складів, то в залежності від глибини герметизації гирла шпуру l_r значна частина скріплюючого складу буде проникати у вугільний пласт.

Ці непродуктивні втрати скріплюючого складу з достатньою точністю можна порахувати, зробивши припущення, що площа $S_{AKF} = S_{ANF}$.

Тоді втрати складу визначають:

$$V_z = l_z \cdot h \cdot l_{ш} \cdot R'' \cdot q. \quad (5.2)$$

5.2. Параметри нагнітання для магнезійних в'язучих сумішей

Для встановлення технологічних параметрів нагнітання контрольні шпури, пробурені у зоні обвалення до основної покрівлі, інструментально досліджували з метою оцінки розташування і розкриття тріщин. Як показали дослідження шпурових каналів, максимальне розкриття тріщин не перевищувало 10-12 мм на відстані 0,3-0,8 м від устя шпуру і 1-2 мм на відстані 1,5-2 м.

За умови рівності максимальних напружень вигину і стиснення у зміцнюючій покрівлі потужність зміцнюваного шару 1,2-1,5м – визначається

із виразу:

$$h \geq \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{0.6 \cdot R \cdot \gamma \cdot H \cdot l}{[\sigma]}} \quad (5.3)$$

де γ – середня об'ємна вага порід, т/м³;

H – потужність безпосередньої покрівлі, м;

$[\sigma]$ – межа міцності порід на стиснення, МПа;

l – проліт обвалення, м;

B – ширина зміцнюючої смуги, м;

R – радіус поширення складу, м.

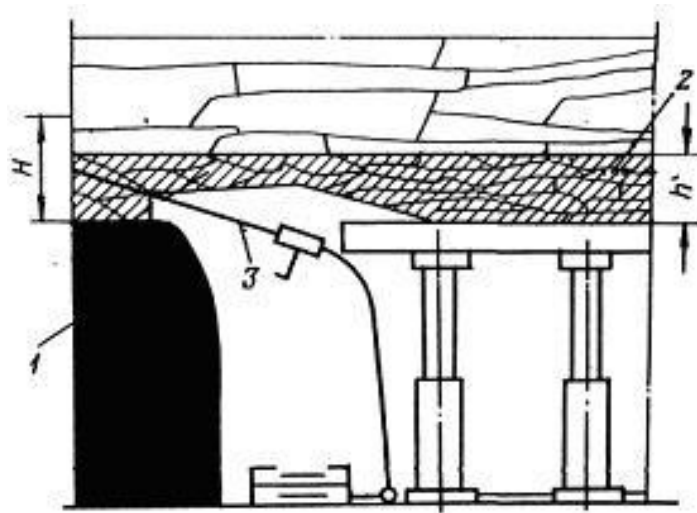


Рисунок 5.2 – Схема зміцнення помилкової покрівлі очисного вибою магnezіальними в'язучими: 1 – вугільний пласт; 2 – помилкова покрівля; 3 – нагнітальна апаратура.

Згідно з тріщинуватістю, а також граничним значенням радіусу розтікання магnezіального в'язучого, призначалися кількість шпурів, кут їх нахилу, розташування по обваленій покрівлі, а також вибиралася технологічна схема нагнітання в'язучого (рис. 5.2), при якій спочатку оброблялися верхні шари покрівлі, а потім нижні.

Граничне значення радіусу розтікання магnezіального в'язучого визначається за формулою

$$R_{\max} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot k_{np} \cdot P}{m \cdot \delta \cdot \tau_0} \quad (5.4)$$

де k_{np} – коефіцієнт проникності тріщинуватого середовища;

P – тиск нагнітання, МПа;

m – коефіцієнт шпаруватості;

δ – середня товщина тріщини, м;

τ_0 – граничне напруження зсуву, МПа;

α – коефіцієнт відносної проникності;

5.3. Техніко-економічна ефективність технології зміцнення порід

Технологія зміцнення порід і вугілля фізико-хімічним способом дозволяє досягти наступних техніко-економічних показників:

- підвищення продуктивності механізованого комплексу і збільшення обсягу видобутку внаслідок скорочення втрат часу на виконання непродуктивних операцій, пов'язаних з обваленням покрівлі, що збільшує чистий час роботи комплексу з видобутку вугілля;
- скорочення трудомісткості виконання робіт за рахунок зменшення обсягу робіт по зведенню випереджаючого кріплення і затягуванні покрівлі;
- зниження зольності вугілля, що видобувається.

При розрахунку економічної ефективності у якості порівнюваного, базового варіанту приймається спосіб підтримки порід покрівлі за допомогою випереджаючого кріплення (металевих рейок) з подальшим затягуванням лісоматеріалом.

Економічний ефект E (грн) від застосування технології зміцнення порід і вугілля фізико-хімічним способом підраховується за формулою:

$$E = [(c_1 - c_2) - E_n \cdot (k_2 - k_1)] \cdot A_2 + E_{nen}, \quad (5.5)$$

де c_1 і c_2 – собівартість 1 т вугілля, видобутої за базовим (1) і новому (2) варіантів, грн./т;

$E_H=0,15$ – нормативний коефіцієнт капітальних вкладень;

k_1 і k_2 – питомі капітальні вкладення на 1 т вугілля, видобутого за базовим і новим варіантам, грн./ т;

A_2 – обсяг видобутку вугілля за період застосування технології зміцнення, т;

$E_{\text{неп}}$ – непрямий ефект від впровадження нової технології зміцнення, грн.

При визначенні річного обсягу видобутку як за новим, так і базовим варіантом враховується добове навантаження на очисний вибій, тривалість відпрацювання стовпа, довжина стовпа і лави, виймальну потужність пласта, тривалість освоєння комплексу.

Для розрахунку собівартості вугілля без застосування і в результаті застосування технології зміцнення порід хімічними складами враховуються повна заробітна плата (пряма і доплати до неї), нарахування на зарплату, витрати на матеріали, витрати на електроенергію, амортизаційні відрахування від вартості обладнання та інших основних фондів, вартість монтажу і демонтажу комплексу.

У розрахунку слід також враховувати такі фактори, як амортизаційні відрахування, які визначаються на підставі розрахунку питомих капітальних вкладень і добових амортизаційних відрахувань, витрати на монтажньо-демонтажні роботи за всіма видами використовуваного обладнання, а також непрямі наслідки застосування технології зміцнення гірських порід і вугілля сполучними хімічними складами.

Непрямий ефект у результаті впровадження технології зміцнення гірських масивів фізико-хімічним способом виходить за рахунок підвищення навантаження на очисний вибій, зменшення зольності вугілля, що видобувається, скорочення втрат вугілля в результаті залишення при базовому варіанті захисної пачки у покрівлі.

При збільшенні навантаження на окремий очисний вибій і постійного видобутку вугілля по шахті в цілому, якщо відома величина умовно-

постійних витрат для даного вибою до і після підвищення навантаження, річний економічний ефект враховує умовно-постійні витрати на обслуговування очисного вибою до і після підвищення навантаження (тис. грн.) і коефіцієнт зростання навантаження на очисний вибій при введенні нової техніки.

Таким чином економічний ефект E (грн) від застосування технології зміцнення порід і вугілля фізико-хімічним способом складе:

$$E = [(c_1 - c_2) - E_n \cdot (k_2 - k_1)] \cdot A_2 + E_{неп} = \\ = (1250 - 1120) - 0.15 \cdot (960 - 870) \cdot 25000 \cdot 12 = 34 \text{ міль. грн / рік}$$

де c_1 і c_2 – собівартість 1 т вугілля, видобутої за базовим (1) і новому (2) варіантів, грн./т;

$E_n=0,15$ – нормативний коефіцієнт капітальних вкладень;

k_1 і k_2 – питомі капітальні вкладення на 1 т вугілля, видобутого за базовим і новим варіантам, грн./ т;

A_2 – обсяг видобутку вугілля за період застосування технології зміцнення, т;

$E_{неп}$ – непрямий ефект від впровадження нової технології зміцнення, грн.

ВИСНОВКИ

1. Виходячи з досвіду і практики, можна стверджувати, що область і обсяги хімічного анкерування порід і вугілля на шахтах і рудниках будуть безперервно зростати. Крім того, важливими областями підземних робіт, які вимагають застосування хімічного зміцнення вміщуючих порід, є:

- зони порушень у лавах, зміцнення тектонічно порушених породних шарів;
- вугільні укоси при комбайновому вийманні на потужних пластах;
- зруйновані шари покрівлі, зміцнення яких сприяє підтримці покрівлі лав, кріпленням без попередньої виїмки вугілля вручну.

Стійкість порід покрівлі у привибійному просторі істотно залежить від ступеня їх попередньої тріщинуватості, що сформувалася попереду очисного вибою під впливом опорного тиску, а також від величини осідань над виробленим простором прилеглих порід підробленої товщі. Позаду лави породи покрівлі розшаровуються, ростуть величини їх осідання і тріщинуватість породних шарів в результаті дії значних згинальних (розтягувальних) напружень.

У кожному конкретному випадку, виходячи з гірничо-геологічних умов, вирішується питання про ефективність застосування зміцнення порід покрівлі у очисному вибої шляхом нагнітання в них зміцнюючих сумішей або хімічного анкерування, а при великій висоті обвалень – споруди ангідритових перемичок. Застосування повної закладки виробленого простору поряд із запобіганням обвалень порід покрівлі дозволяє за рахунок залишення породи в шахті поліпшити екологічну обстановку в Донбасі і зменшити площу родючих земель, що відводяться під породні відвали.

Процес утворення тріщин в покрівлі пласта при різних способах управління покрівлею залишається поки недостатньо вивченим.

2. Лабораторні експерименти показали:

- Зі збільшенням кута нахилу зразка пісковика при випробуванні маємо тенденцію зменшення нормальних руйнуючих напружень;

- Зі збільшенням кута нахилу зразка при випробуванні маємо тенденцію лінійного зростання дотичних руйнуючих напружень;
- Зміна кута нахилу зразка змінює долю участі руйнуючих напружень – перетворюючи стискаючи напруження у дотичні і навпаки. Для руйнування зразка пісковику потребує: чим більше стискаючи напруження тим менш необхідно дотичних, і навпаки чим менш стискаючи напружень тим більш необхідно дотичних.
- Отриманий ефективний коефіцієнт інтенсивності напруження K_{ef} (середнє значення $2,083 \text{ МПа}\sqrt{м}$) уявляє собою в'язкість руйнування пісковику на площадці руйнування при дії нормальних та дотичних напруженнях. Критерій руйнування порід у масиві $K_{\partial.ef} \leq K_{ef}$.

3. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану гірських порід навколо очисних виробок, показали: послідовність обвалення породних шарів, а також участь шарів порід у формуванні напруженого стану і перерозподіл напруження до і після обвалення породних шарів.

4. Величини і напрямки дії головних нормальних напружень становить найбільший інтерес з точки зору не тільки міцності елемента, але і формування кута розповсюдження тріщини. Як для гірського масиву це проявляє особливий інтерес у якості характеру руйнування і обвалення порід.

Встановлено, що кут утворення тріщини у масиві залежить від положення головних нормальних напружень, площадка яких залежить від осьових нормальних і дотичних напружень. Чим більше дотичні напруження тим більш кут нахилу головних площадок.

Встановлено, що у зоні вивалу порід покрівлі кут нахилу площадок головних напружень змінюється дуже різко від -45° до $+45^\circ$ (відносно вертикальної осі), що вказує на те що руйнування масиву відбувається за рахунок декілька систем тріщин, які утворюють роздрібнений масив.

Для визначення зони руйнування (утворення вивалу) шару основної

покрівлі прийнятий критерій тріщиноутворення $\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \leq K_{ef}$. Отже якщо критерій не виконується призначаємо, що у цьому випадку почалось руйнування масиву, тобто утворення або поширення тріщини. Даний критерій показав непогані результати по визначенню зони вивалу порід покрівлі у очисному вибою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.В. Кара, Р.Г. Ильющенко, Ю. Н. Цедрик. Скрепляющие составы для упрочнения пород кровли в очистных забоях // Уголь Украины. - 1978. - № 1-с. 11-12.
2. Самойлов В.Л., Дёминов А.Н. Анализ мероприятий по предотвращению обрушений ложной кровли в очистном забое // «Геотехнология и управление производством 21 века». Сборник научных трудов 2 международной научно-практической конференции 2-3 октября 2007 г. Донецк 2007. с. 19-25.
3. В.К. Сальников, И.М. Данильченко, З. П. Кобрин. Испытания полиуретановых составов для укрепления неустойчивых пород // Уголь Украины. - 1983. - № 12 - с. 10-13.
4. В.В. Кара, В.К. Сальников. Химическое анкерование в очистных забоях // Уголь Украины. - 1977. - № 7.- с.20-22.
5. М.П. Зборщик, С.В. Подкопаев. Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при закладке выработанного пространства // Уголь Украины. - 1992. - № 5 - с.20-23.
6. Краэ Ю., Шрер Д., Шмидт Э. Заполнение вывалов породы из кровли ангидритом в лавах со щитовой крепью // Глюкауф. - 1987. - № 7 - с.6-9
7. Давыдов В.В, Белоусов И.Ю. Химический способ укрепления горных пород. – М.: Недра, 1977.
8. Беляев В.Ф., Механические и физико-химические способы укрепления горных пород. М., Недра 1987г.
9. А.П. Широков В.В. Давыдов. Армополимерная анкерная крепь “Уголь Украины”, декабрь, 1977г.
10. Врублевский В.И. Сопротивление горных пород разрушению. - Киев: «Техніка», 1964. - 222 с.
11. Руппенейт К.В., Механические свойства горных пород, Углетехиздат, 1956.
12. Фисенко Г.Л., Определение сцепления и коэффициента внутреннего

трения полускальных горных пород Коркинского месторождения, Сб. трудов Всесоюзного научно-исследовательского Макшейдеровского института (ВНИМИ), т. 27, Углетехиздат, 1953.

13. Ильницкая Е.И. Определение сопротивления угля сдвигу и разрыву, Сб. трудов ИГД АН СССР, 1954, №1.

14. Ягодкин Г.И., Чеканов А.Н., Терпигорев А.М., К вопросу об определении механических характеристик углей на образцах произвольной формы, «Уголь», 1956, № 3

15. Ягодкин Г.И., Чеканов А.Н., Терпигорев А.М., Определение механических характеристик углей на образцах произвольной формы, Сб. «Разрушение углей и пород», Углетехиздат, 1958.

16. Ильницкая Е.И. Определение сопротивления углей отрыву от целика в забое, Сб. трудов ИГД АН СССР, 2, 1955

17. Механика разрушения на базе компьютерных технологии. Практикум / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007, – 464 с.: ил.

18. Справочник по теории упругости (для инженеров-строителей) под редакцией Варвака П. М. и Рябова А. Ф. Киев, «Будівельник», 1971, стр. 418. (27–35 с.)

19. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. Учебник под ред. Г.С. Варданяна – М., Издательство АСВ, 1995.— 568 стр. с илл. (344–351 с.)

20. Подгорный А.Н. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач и др. Ин-т проблем машиностроения. – Киев: Наук, думка, 1989.– 232 с. (16–19 с.).

21. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.

22. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2005. – 448 с.: ил.

23. Реут Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учебно-методическое пособие по разделу курса «Механика

материалов» для студентов машиностроительных специальностей /Л.Е. Реут.
- Минск: БИТУ, 2001 - 107 с.